

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

LABORATOIRE DE GEOGRAPHIE DES MILIEUX ANTHROPISES CNRS FRE 2170



**MODIFICATIONS CLIMATIQUES AUX ECHELLES FINES GÉNÉRÉES  
PAR UN OUVRAGE LINÉAIRE EN REMBLAI :**

**L'exemple de l'incidence de la Ligne à Grande Vitesse du TGV Méditerranée sur  
le gel printanier et l'écoulement du mistral dans la basse vallée de la Durance**

**Hervé QUENOL**

**THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE LILLE 1  
GEOGRAPHIE (CLIMATOLOGIE)**



**Jury :**

**Gérard BELTRANDO**

**Daniel JOLY**

**Patrice PAUL**

**Sylvain BIGOT**

**François DURAND DASTES**

**Claude MERGOMARD**

**Max LEFEVRE**

Pr. des Universités, Univ. Denis Diderot Paris 7, Directeur de thèse

Dr. de recherches CNRS THEMA Besançon, Pré rapporteur

Pr. des Universités, Univ. Louis Pasteur Strasbourg 1, Pré rapporteur

M. de Conférence, Univ. des Sciences et Technologies de Lille 1

Pr. Emérite, Univ. Denis Diderot Paris 7

Pr. des Universités, Univ. des Sciences et Technologies de Lille 1

Ingénieur Chambre d'Agriculture des Bouches-du-Rhône

**17 JUIN 2002**

## REMERCIEMENTS

---

Je tiens particulièrement à remercier les personnes qui ont suivi et partagé ce travail :

- mon directeur de thèse Gérard BELTRANDO pour avoir dirigé cette thèse avec beaucoup d'intérêt et pour avoir suivi régulièrement l'avancée de mes travaux. Un grand merci pour tout ses conseils mais également pour tout le temps passé à chercher un financement. Et enfin, pour m'avoir fait découvrir et partager la passion de la climatologie depuis la maîtrise ;
- François DURAND DASTES qui a temporairement co-dirigé cette thèse et dont les enseignements m'ont beaucoup apporté durant tout mon cursus universitaire ;
- Daniel JOLY et Patrice PAUL qui ont accepté d'être rapporteur de cette thèse ;
- Claude KERGOMARD et Sylvain BIGOT pour leurs conseils et pour avoir donné de leur temps à la relecture de ce travail ;
- Monique BECU pour ses précieux services qui m'ont évité de nombreux déplacements à Lille. De même, Yécine CHARABI et Pierre LERICHE qui m'ont facilité tous les problèmes administratifs liés aux inscriptions universitaires.
- Ces travaux ont pu être réalisés grâce au soutien matériel et financier obtenu par l'intermédiaire de conventions de recherches dirigées par Gérard BELTRANDO, associant le Réseau Ferré de France et la Chambre d'Agriculture des Bouches du Rhône. Remerciements à Max LEFEVRE et Pierre LEMERY, respectivement responsables des services fonciers de la Chambre d'Agriculture et de la mission TGV Méditerranée.

Merci également à :

- Vincent PLAUCHUT et Frédérique pour leur accueil et les nombreux repas sous la tonnelle qui se finissaient généralement par une petite « poire du jardin » ;
- Michel FONTAINE (directeur du tronçon Orgon/Lambesc) pour son aide et pour son dévouement ;
- Pierre CHABERT (arboriculteur et président de la Station Arboricole de Mallemort), qui a mis à ma disposition un local pour travailler et pour entreposer mon matériel. Je tiens surtout à lui exprimer toute ma gratitude pour m'avoir aidé en mars 1998 (fin de mon service national à la Chambre d'Agriculture des Bouches du Rhône) ;
- la petite équipe de la Station Arboricole de Mallemort (Mireille, Bernard FLORENT, Bernard BONNEBEAU, Monsieur CHARTIER, Isabelle, Cathy, Jean-Michel, Christophe, Hélène, ...) pour l'ambiance familiale et tous les bons moments que nous avons partagé. De même, Michel LAJOURNADE pour son aide (capteurs), son soutien et pour m'avoir impliqué dans son étude sur les méthodes de lutte antigel ;
- mes amis Mireille, Franck, Babou et Camille qui m'ont accueilli avec beaucoup d'amitié et qui m'ont toujours aidé lorsque j'en avais besoin. Egalement Thierry et tous mes copains de Charleval (Jeannot, Lool, Gringo, Scot, Jo, Hervé, Fabien, ...) avec qui j'ai pu partager de très grands moments et de bonnes soirées (des fois un peu mouvementées) ;
- Charly CAIROLI et Dominique LEBAS pour leur apport important à la conception des capteurs ;

- mes camarades de « classe » Bertrand (le trappeur), Caroline et Malika ;
- mon ami et « fidèle acolyte » Sébastien avec qui je partage l'aventure de la recherche en climatologie depuis la maîtrise. **BQ-topo**
- Nad pour les nombreuses relectures et surtout pour m'avoir supporté durant les moments de doute ;
- mes parents, pour tout (notamment pour avoir cru en moi après des études secondaires assez médiocres) .

à Marcel, André et Brigitte

## RESUME

---

La Ligne à Grande Vitesse (LGV) Méditerranée qui relie Valence à Marseille traverse les terroirs agricoles des communes de Mallemort et Sénas dans la basse vallée de la Durance. En modifiant la rugosité de la surface, le remblai (hauteur maxi 15m) a une influence sur le système climatique local qui est à l'origine d'une accentuation du risque climatique pour les cultures fruitières. Deux phénomènes météorologiques sont abordés : gel printanier et mistral.

- Au printemps, en situation radiative, période où les bourgeons des arbres fruitiers sont sensibles aux basses températures, la présence d'un obstacle de plusieurs mètres de haut dans une topographie contrastée crée un véritable « lac d'air froid » en bloquant les écoulements gravitaires.
- Le mistral, dont l'orientation est similaire au tracé ferroviaire, est canalisé le long du remblai. La compression de l'air dans l'emprise engendre de fortes turbulences latérales et une déviation du vent sur les parcelles avoisinantes. Le vent violent et turbulent provoque des dommages qualitatifs sur les fruits.

Un réseau de capteurs météorologiques disposé sur le terrain expérimental selon un système d'échelles spatiales imbriquées a permis d'évaluer l'action des différents éléments du milieu (relief, haies,...) sur les aléas météorologiques, puis de définir l'influence du remblai ferroviaire. Les données météorologiques acquises ponctuellement ont été extrapolées et spatialisées à l'aide d'un Système d'Information Géographique.

Cette étude met en évidence plusieurs aspects du risque climatique provoqué par l'implantation du remblai. L'aérologie locale est modifiée différemment suivant le type de temps. Par temps radiatif, le remblai crée une zone d'abri au sud-ouest de la LGV où le risque de gel est accentué (env. 100ha de parcelles arboricoles). Par temps de mistral, les turbulences induites par la compression du vent contre le remblai représentent un risque supplémentaire pour les parcelles limitrophes de la LGV (env. 20ha).

**Mots clés :** climatologie appliquée, échelles fines, remblai de la LGV, gel printanier, mistral, cultures fruitières, contrôle agronomique, mesures itinérantes et fixes, SIG.



## **ABSTRACT :**

---

The Mediterranean high speed line (LGV) which connect Valence to Marseilles crosses the agricultural soils of the cities of Mallemort and Senas (13) in the low valley of Durance.

By modifying the roughness of the land, the embankment (15 meters high) has an influence on the local climatic system, which generates a stressing of the climatic risk for the fruit cultures (economic loss for arboriculturist).

Two weather phenomenon are observed : spring freezing and mistral wind.

- In the spring (in radiative situation), period when the buds of the fruits are sensitive to the low temperatures, the presence of an obstacle of several meters high in a contrasted topography creates a cold air lake by blocking the gravity flows.
- The mistral orientation, similar to the railways layout, is canalised along the embankment. The air compression in railway generates strong side turbulence and a deviation of the wind in the neighbouring fruit parcels. The violent and turbulent wind causes damages on the fruits.

A network of weather sensors placed on the experimental field are there to evaluate the influence of the various elements of the site (ex: relief, edges shelter belt) on the weather risks, then to define the impact of the railway embankment. The punctually weather data were extrapolated and spatialized with a Global Information System (GIS).

This study highlights several aspects of the climatic risk caused by embankment implantation. Local aerology is modified differently according to the weather type. In "radiative" weather, the embankment creates a sheltered area in the south-west of the LGV where the risk of freezing is accentuated (approximately 100 ha of fruit parcels). During mistral weather, the turbulences induced by the compression of the wind against the embankment represent an additional risk for the fruit parcels bordering on LGV (approximately 20 ha).

**Key words :** applied climatology, fine spatial scales, LGV embankment, spring frost, mistral, fruit cultures, agronomic study, itinerant and fixed measurements, GIS.

## ABREVIATIONS

---

|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a               | Albédo du sol                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| CA13            | Chambre d'Agriculture des bouches du Rhône                                                                                                                                                                                                                                                        |
| CSTB            | Centre Scientifique et Technique du Bâtiment                                                                                                                                                                                                                                                      |
| CTIFL           | Centre Interprofessionnel des Fruits et Légumes                                                                                                                                                                                                                                                   |
| INRA            | Institut National de la Recherche Agronomique                                                                                                                                                                                                                                                     |
| LGV             | Ligne à Grande Vitesse                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| MNT             | Modèle Numérique de Terrain                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| OMM             | Organisation Météorologique Mondiale                                                                                                                                                                                                                                                              |
| RA              | Rayonnement atmosphérique provenant au sol                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Rd              | Rayonnement solaire diffus                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| RD              | Rayonnement solaire direct                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| RFF             | Réseau Ferré de France (depuis le 13 février 1997, un établissement public industriel et commercial dénommé RFF a été créé avec pour objectif d'aménager et de développer le réseau ferroviaire français. Depuis cette date, le maître d'œuvre des lignes nouvelles n'est plus la SNCF mais RFF). |
| RN              | Bilan radiatif                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| RN              | Rayonnement net                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| RT              | Rayonnement terrestre                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| SIG             | Système d'Information Géographique                                                                                                                                                                                                                                                                |
| X/H             | Distance représentant le nombre de fois la hauteur de la haie brise-vent                                                                                                                                                                                                                          |
| $\varnothing C$ | Flux de convection dans l'air                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $\varnothing L$ | Flux de chaleur latente                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| $\varnothing V$ | Flux de conduction dans le sol                                                                                                                                                                                                                                                                    |

# TABLE DES MATIERES

|                                                                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>                                                                                         | <b>1</b>  |
| Présentation de l'étude.....                                                                                               | 2         |
| Les étapes de la démarche .....                                                                                            | 12        |
| <b>PARTIE 1 : ACQUISITION DES DONNEES ET TECHNIQUE DE MODELISATION SPATIALE.....</b>                                       | <b>15</b> |
| <b>1 GELEE DE PRINTEMPS ET MISTRAL : DESCRIPTION ET MECANISMES ? .....</b>                                                 | <b>19</b> |
| 1.1 Variabilité spatiale du gel printanier .....                                                                           | 19        |
| 1.1.1 Les composantes du bilan énergétique .....                                                                           | 19        |
| 1.1.2 Les mécanismes du refroidissement nocturne .....                                                                     | 21        |
| 1.1.3 Les gelées de printemps .....                                                                                        | 28        |
| 1.1.4 Les arbres fruitiers face au refroidissement nocturne.....                                                           | 29        |
| 1.2 Variabilité spatiale du vent (mistral) .....                                                                           | 34        |
| 1.2.1 Le mistral .....                                                                                                     | 34        |
| 1.2.2 Les arbres fruitiers face aux effets mécaniques du vent.....                                                         | 36        |
| <b>2 ECHELLES D'ESPACE IMBRIQUEES : HIERARCHISATION DES ELEMENTS PERTURBATEURS DU MICROCLIMAT .....</b>                    | <b>38</b> |
| 2.1 Application de méthodes de classification des échelles locales à la basse vallée de la Durance.....                    | 38        |
| 2.2 La gelée de printemps : une forte variabilité spatiale.....                                                            | 40        |
| 2.2.1 Application de la classification : prise en compte du milieu et des conditions atmosphériques .....                  | 40        |
| 2.2.2 Délimitation des site de mesures en fonction des niveaux d'échelle .....                                             | 41        |
| 2.3 Le mistral : un vent influencé en surface par les aspérités du substrat.....                                           | 43        |
| 2.3.1 Application de la classification : prise en compte du milieu.....                                                    | 43        |
| 2.3.2 Délimitation des site de mesures en fonction des niveaux d'échelle .....                                             | 44        |
| <b>3 MESURES METEOROLOGIQUES ET AGRONOMIQUES AUX ECHELLES FINES : METHODES D'ANALYSE ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX.....</b> | <b>47</b> |
| 3.1 Les techniques de mesures : fixes et itinérantes .....                                                                 | 48        |
| 3.2 Les instruments de mesures : capteurs et stations d'acquisition de données.....                                        | 49        |
| 3.3 Installation des instruments de mesures : précautions pour limiter les erreurs .....                                   | 52        |
| 3.3.1 Environnement du poste de mesure.....                                                                                | 52        |
| 3.3.2 Positionnement du capteur.....                                                                                       | 54        |
| 3.4 Un protocole de mesures adapté à chaque niveau d'échelle .....                                                         | 54        |
| 3.5 Expérimentation agronomique pour valider les mesures météorologiques.....                                              | 57        |

|                                                                                                                                                              |                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>4 CONSTRUCTION D'UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (S.I.G.) : UNE METHODE D'EXTRAPOLATION SPATIALE DES DONNEES « TERRAIN »</b>                        | <b>60</b>      |
| 4.1 Constitution d'un S.I.G. : formats raster ou/et vecteur                                                                                                  | 61             |
| 4.2 Combinaison des deux formats                                                                                                                             | 63             |
| 4.3 Différentes étapes de la modélisation par SIG                                                                                                            | 63             |
| 4.3.1 Les données géographiques : graphiques et attributaires                                                                                                | 63             |
| 4.3.2 Intégration des données météorologiques                                                                                                                | 64             |
| 4.3.5 Les limites du SIG                                                                                                                                     | 65             |
| <br><b>PARTIE 2 : VARIABILITE METEOROLOGIQUE AUX ECHELLES FINES</b>                                                                                          | <br><b>67</b>  |
| <b>1 MICROCLIMAT ENGENDRE PAR LES HAIES BRISE-VENT</b>                                                                                                       | <b>71</b>      |
| 1.1 Les effets des brise-vent en situation gélive                                                                                                            | 71             |
| 1.1.1 Les connaissances actuelles sur l'action des haies en situation gélive                                                                                 | 71             |
| 1.1.2 Résultats expérimentaux                                                                                                                                | 79             |
| 1.2 Les effets des brise-vent sur le vent                                                                                                                    | 111            |
| 1.2.1 Les connaissances actuelles sur les effets aérodynamiques des haies                                                                                    | 111            |
| 1.2.2 Résultats expérimentaux                                                                                                                                | 115            |
| <br><b>2 IMPACT DE LA LIGNE FERROVIAIRE SUR LE GEL PRINTANIER</b>                                                                                            | <br><b>125</b> |
| 2.1 Echelle locale ou topoclimatique                                                                                                                         | 125            |
| 2.1.1 Par temps anticyclonique : refroidissement limité par une brise de vallée descendante                                                                  | 127            |
| 2.1.2 Par temps advectif et arrêt de mistral : refroidissement accru dans les secteurs abrités du vent                                                       | 134            |
| 2.2 Echelle mésolocale ou du bassin versant                                                                                                                  | 136            |
| 2.2.1 Modification de l'aérologie nocturne en situation radiative : une atténuation de la brise de vallée descendante au profit des écoulements gravitaires  | 138            |
| 2.2.2 Modification du champ de températures en situation radiative : un comportement thermique différent suivant les conditions atmosphériques de la journée | 141            |
| 2.2.3 Modification du champ de températures en situation advective et d'arrêt de mistral : combinaison des facteurs convectifs et radiatifs                  | 154            |
| Bilan                                                                                                                                                        | 162            |
| <br><b>3 IMPACT DE LA LIGNE FERROVIAIRE SUR LE MISTRAL</b>                                                                                                   | <br><b>165</b> |
| 3.1 Modification de l'écoulement du mistral après la destruction des haies brise-vent sur un large couloir                                                   | 165            |
| 3.2 Modification de l'écoulement du mistral après la construction du remblai L.G.V. ....                                                                     | 167            |
| Bilan                                                                                                                                                        | 172            |
| <br><b>CONCLUSION DE LA PARTIE 2</b>                                                                                                                         | <br><b>173</b> |

**PARTIE 3 : VALIDATION DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES A PARTIR  
DE L'OBSERVATION DES CULTURES ..... 175**

|                                                                                                                                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1 LES VERGERS APRES LE GEL PRINTANIER.....</b>                                                                                                   | <b>179</b> |
| 1.1 Methode d'observation de la répartition des fruits gelés sur une parcelle arboricole .                                                          | 179        |
| 1.2 Contrôle sur fruits combiné à des données météorologiques à l'échelle microclimatique<br>.....                                                  | 184        |
| 1.3 Contrôles sur fruits à l'échelle mésolocale et microclimatique : validation des mesures<br>météorologiques et localisation du risque gélif..... | 196        |
| Bilan .....                                                                                                                                         | 205        |
| <b>2 OBSERVATION DE LA VEGETATION APRES DES EPISODES DE VENTS FORTS.....</b>                                                                        | <b>207</b> |
| 2.1 Méthode d'observation de la répartition des fruits abîmés par les effets mécaniques du<br>mistral sur une parcelle arboricole.....              | 207        |
| 2.2 Validation de la distance de protection d'une haie imperméable et d'une haie<br>imperméable .....                                               | 209        |
| 2.3 Validation du secteur influencé par la ligne ferroviaire .....                                                                                  | 212        |
| Bilan .....                                                                                                                                         | 214        |
| <b>CONCLUSION DE LA PARTIE 3.....</b>                                                                                                               | <b>214</b> |

**PARTIE 4 : MODELISATION SPATIALE DES RISQUES CLIMATIQUES INDUITS  
PAR LE REMBLAI ..... 215**

|                                                                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1 ESTIMATION DU RISQUE DE GEL AUX ECHELLES FINES .....</b>                                                                        | <b>219</b> |
| 1.1 Construction d'un S.I.G : un ensemble de logiciels spécifiques mis en relation par une<br>« passerelle informatique ».....       | 219        |
| 1.2 Traitements des données en mode raster : le Krigeage ?.....                                                                      | 225        |
| 1.2.1 Les champs de températures.....                                                                                                | 226        |
| 1.2.2 Le Modèle Numérique de Terrain .....                                                                                           | 228        |
| 1.3 Traitement des données relatives à l'occupation du sol en mode vectoriel.....                                                    | 230        |
| 1.4 « La matrice vectorielle » : une passerelle entre les logiciels et les différents formats de<br>données (raster et vecteur)..... | 233        |
| 1.5 Intégration des données météorologiques d'échelles microclimatiques : précision<br>indispensable du mode vectorielle.....        | 235        |
| 1.5.1 Modélisation du blocage de l'air froid en amont des haies imperméables en situation<br>radiative .....                         | 235        |
| 1.5.2 Modélisation des zones d'abri en aval des haies imperméables en situation advective<br>.....                                   | 236        |
| 1.6 S.I.G. : système de modélisation spatiale du risque gélif prenant en compte<br>l'imbrication des échelles.....                   | 239        |
| 1.6.1 Cartographie des températures minimales de la nuit.....                                                                        | 239        |
| 1.6.2 Cartographie du risque gélif imputable au remblai L.G.V. ....                                                                  | 241        |
| Bilan .....                                                                                                                          | 245        |
| <b>2 ESTIMATION DU RISQUE LIE AUX EFFETS MECANIQUES DU MISTRAL .....</b>                                                             | <b>247</b> |
| 2.1 Modélisation de la protection en aval des haies brise-vent .....                                                                 | 248        |
| 2.2 Modélisation des secteurs à risques à proximité de la LGV.....                                                                   | 252        |
| Bilan .....                                                                                                                          | 252        |
| <b>CONCLUSION DE LA PARTIE 4.....</b>                                                                                                | <b>252</b> |

|                                                                                                                                |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>CONCLUSION GENERALE .....</b>                                                                                               | <b>255</b>    |
| <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>                                                                                                     | <b>261</b>    |
| <b>FIGURES ET TABLEAUX.....</b>                                                                                                | <b>275</b>    |
| <b>ANNEXES.....</b>                                                                                                            | <b>I</b>      |
| <b>ANNEXE 1 : LOI DE FOURIER .....</b>                                                                                         | <b>III</b>    |
| <b>ANNEXE 2 : VENT, BRISE ET ECOULEMENTS GRAVITAIRES ? .....</b>                                                               | <b>IV</b>     |
| <b>ANNEXE 3 : FICHE TECHNIQUE ET DETAILS DE LA CONSTRUCTION DES CAPTEURS.....</b>                                              | <b>V</b>      |
| A.3.1 Fabrication des capteurs météorologiques : girouettes et anémomètres.....                                                | V             |
| A.3.2 Autres instruments de mesures météorologiques .....                                                                      | X             |
| A.3.3 Les centrales d'acquisit'on .....                                                                                        | XI            |
| <b>ANNEXE 4 : DISTANCE A LA HAIE EN « NOMBRE DE FOIS LA HAUTEUR DE LA HAIE » .....</b>                                         | <b>XII</b>    |
| <b>ANNEXE 5 : LOCALISATION DES PARCELLES EXPERIMENTALES.....</b>                                                               | <b>XIV</b>    |
| <b>ANNEXE 6 : CARACTERISTIQUES ET EXEMPLES DE DISPOSITION DES POSTES DE MESURES<br/>SUR LES PARCELLES EXPERIMENTALES. ....</b> | <b>XV</b>     |
| <b>ANNEXE 7 : MICRO-CLIMAT ENGENDRE PAR LES HAIES BRISE-VENT EN SITUATION GELIVE<br/>(DETAILS DES NUIITS DE MESURES).....</b>  | <b>XVI</b>    |
| <b>ANNEXE 8 : MESURES LIEES AU GEL A L'ECHELLE LOCALE (DETAILS DES NUIITS DE<br/>MESURES) .....</b>                            | <b>XX</b>     |
| <b>ANNEXE 9 : MESURES LIEES AU GEL A L'ECHELLE MESO-LOCALE (DETAILS DES NUIITS DE<br/>MESURES) .....</b>                       | <b>XXII</b>   |
| <b>ANNEXE 10 : CONSTRUCTION DE LA « MATRICE VECTORIELLE » .....</b>                                                            | <b>XXVII</b>  |
| <b>ANNEXE 11 : DETERMINATION DES ZONES D'ACCUMULATION D'AIR FROID EN AMONT DES<br/>HAIES IMPERMEABLES .....</b>                | <b>XXVIII</b> |
| <b>ANNEXE 12 : DIFFERENTES PHASES DE LA CONSTRUCTION DE LA LGV. ....</b>                                                       | <b>XXIX</b>   |

## INTRODUCTION GENERALE

---

Depuis quelques années, avec l'accroissement de l'industrialisation et de l'urbanisation, l'action anthropique sur le milieu « naturel » est devenue un des domaines de recherche privilégiés des géographes. Les problèmes liés aux activités humaines (qualité de l'air, de l'eau, déforestation,...) ainsi que certaines catastrophes environnementales (accidents nucléaires, marées noires, ...) ont fait prendre conscience à l'opinion publique de la sensibilité du milieu naturel et des conséquences qu'ils peuvent avoir sur la qualité de la vie. C'est dans ce contexte que les géographes, notamment « physiciens », *« répondent à cette demande sociale clairement exprimée »* (Vincent, 1999) en intégrant au cœur de leurs préoccupations scientifiques le rapport Homme/milieu. *« Le temps n'est plus d'une géographie globale, prenant en compte les éléments constitutifs de l'environnement. Les interrogations environnementales d'actualité sont avant tout des interrogations sociales à dimensions économiques et culturelles ... chacun sait que le développement durable ou la biodiversité sont des notions récentes qui renvoient à un contexte de société précis et daté »* (Gumuchian et al., 2000).

Face aux inquiétudes liées aux catastrophes climatiques ou météorologiques, à la qualité de l'air et à la question du réchauffement de la planète, les climatologues et en particulier les géographes-climatologues ont fait de l'action anthropique sur le climat un de leur pôles de recherches. De nombreux programmes de recherches abordent, à diverses échelles spatiales, le risque anthropique dans le sens d'un danger pour la vie de l'homme. Par exemple, à l'échelle planétaire, le changement climatique fait l'objet de nombreux projets (ex : Tropical Ocean and Global Atmosphere), mais les géographes-climatologues sont généralement exclus des recherches théoriques très pointues et *les principales avancées de ces dernières décennies montrent l'extrême complexité du système Terre-Océan-Atmosphère* (Beltrando, 2000). A l'échelle régionale, l'étude des transferts de polluants dans l'atmosphère en milieu urbain (Escourou, 1996 ; Roussel, 1997) ou en milieu à topographie complexe (Pelli, 1977 ; MAGS, 1982 ; Clements et al., 1989 ; Berlincourt, 1991 ; Fallot, 1992 ; REKLIP, 1995 ; Fallot et Hertig, 1998) aboutit à des avancées importantes sur la circulation des polluants ou sur les moyens à mettre en œuvre pour limiter la pollution (ex : ferroutage en Suisse). Ces études traitent de l'influence des activités industrielles ou de pratiques ayant un impact sur la qualité de l'air et par conséquent sur la santé.

Les programmes de recherche sur l'impact climatique des grandes infrastructures (remblais ferroviaires et routiers, lacs-réservoirs...) sont plus rares. Pourtant, en modifiant la nature et/ou la rugosité de la surface, un ouvrage d'art de plusieurs mètres de haut a une influence sur le système climatique local. Pendant longtemps, notamment en France, ce type d'impact climatique a peu interpellé l'opinion publique et les scientifiques ; probablement, parce que l'aire d'influence de ces obstacles est très localisée (échelles spatiales fines) et qu'elle n'engendre pas un risque, dans le sens d'une atteinte à la vie des individus. Généralement, le préjudice provoqué par ces variations météorologiques et climatiques locales est d'ordre économique et ne concerne qu'une minorité ou une catégorie spécifique de personnes (par exemple des agriculteurs). Les premières études sur l'influence climatique des

grandes constructions ont été réalisées en Allemagne. Geiger (1980) montre que la présence d'obstacles de plusieurs mètres de haut accentue le risque de gel dommageable pour les cultures viticoles dans la Haardt (Allemagne). En conclusion de son article, il préconise que l'impact climatique soit intégré dans les projets de grandes constructions : « *les études topoclimatiques devraient être prises en considération pour la construction des routes... on a dressé récemment des remblais routiers jusqu'à une hauteur de 10 m au-dessus des fonds de vallée. Ceux-ci peuvent provoquer des variations climatiques locales, qui ont des conséquences négatives sur la viticulture ou sur l'habitat* ».

En France, au début des années 90, l'avant-projet sommaire de la Ligne à Grande Vitesse (LGV) Est européenne, a suscité l'attention de certains professionnels viticoles (Syndicat des Vignerons de Champagne), sur la question de l'impact climatique du remblai ferroviaire sur le risque gélif. Une expérimentation topoclimatique dirigée par G. Beltrando a permis d'observer qu'un remblai, mesurant plus de 5 m de haut et disposé en bas d'un coteau sur plusieurs centaines de mètres de long, accentuait le refroidissement nocturne en bloquant les écoulements gravitaires. Au printemps, période où les bourgeons des vignes sont sensibles aux basses températures, la présence d'un obstacle représente donc, localement, un risque supplémentaire de gel notamment pour les situations radiatives (ciel clair, vent régional  $\leq 2$  m/s) (Beltrando *et al*, 1995 ; Bridier *et al*, 1995 ; Quénol et Bridier, 1995). Réseau Ferré de France (RFF) a reconsidéré les caractéristiques du tracé dans le secteur à risque potentiel pour réduire le lac d'air froid -*abaissement du profil, diminution de la longueur du remblai, remodelage du terrain*- (une seconde étude s'est déroulée au printemps 2001 pour observer l'impact du nouvel aménagement<sup>1</sup>) ; mais surtout, elle a permis une meilleure prise de conscience de l'utilité d'intégrer l'aspect climatique local dans les études d'impact des futurs tracés, notamment celui de la Ligne à Grande Vitesse Méditerranée qui relie Valence à Marseille.

## Présentation de l'étude

Au sud d'Avignon, la LGV Méditerranée traverse les terrains agricoles (maraîchage, arboriculture) des communes de Mallemort/Senas dans la basse vallée de la Durance. L'implantation d'infrastructure ferroviaire (remblai et merlons antibruit atteignant 15 m de haut) nécessite la destruction des cultures et des haies brise-vent sur un couloir pouvant atteindre 100 m de large (35 m + 4 fois la hauteur de l'ouvrage). Suite aux inquiétudes des agriculteurs liées à la probabilité d'un impact climatique local de la LGV et d'un éventuel risque supplémentaire de gel pour les cultures fruitières, un programme de recherche dirigé par G. Beltrando a été mis en place entre le Laboratoire de géographie des Milieux Anthropisés (LGMA) de l'Université de Lille (USTL), la Chambre d'Agriculture des Bouches-du-Rhône (CA13) et RFF.

---

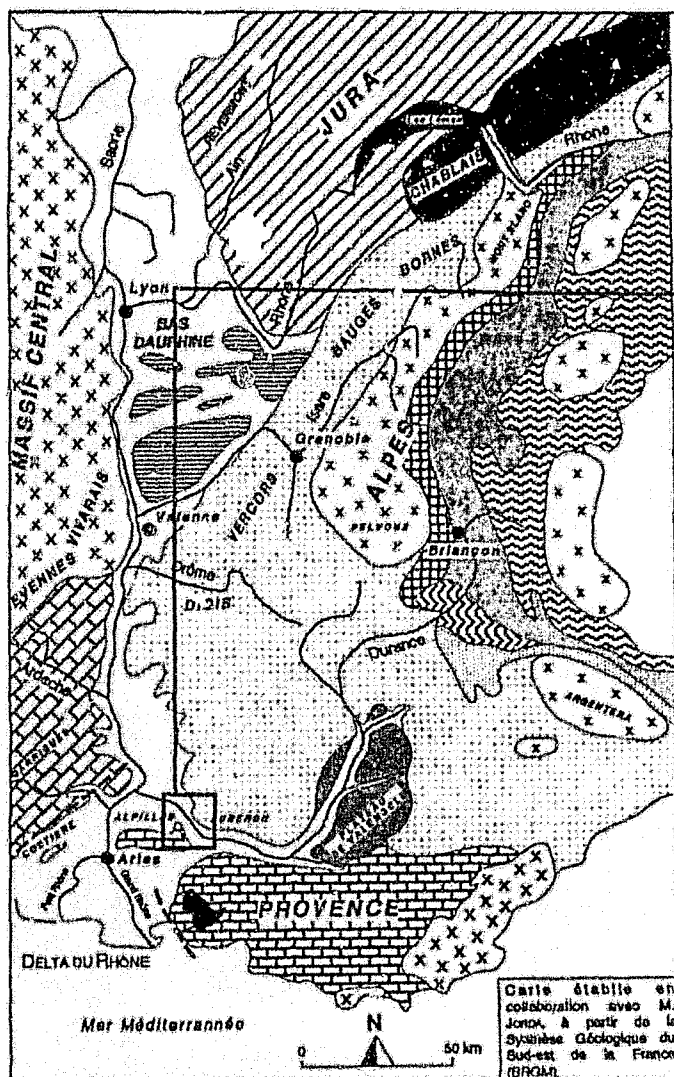
<sup>1</sup> Les résultats de cette étude ont fait l'objet d'un rapport d'étude et d'un article soumis à la revue « Hommes et terres du nord » (Beltrando *et al*, 2002).



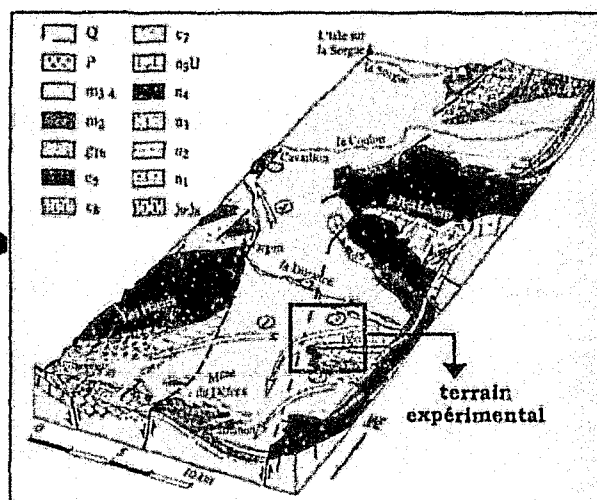
## Entre Alpilles et Luberon, un espace agricole à forte valeur ajoutée

L'espace étudié se situe dans la basse vallée de la Durance, entre les massifs des Alpilles et du Luberon. Entre la cluse d'Orgon et La Roque d'Anthéron, la plaine alluviale façonnée par la Durance a une altitude variant de 90 m à 145 m (fig I.1 a et b). De Senas à Mallemort, les basses terrasses de la Durance s'élargissent vers l'ouest jusqu'à la cluse de Lamanon où s'écoulait le fleuve jusqu'à la fin du Würm. Géologiquement, les secteurs les plus bas (90 m) sont constitués d'alluvions récentes (Holocène) à base de limons, de sables et de galets (Isclès). Quelques mètres au-dessus du lit majeur, des terrasses, rattachées au Würm, sont composées de sables, de galets et de graviers. C'est le cas de « la Crau » de Mallemort et d'Alleins (Battiau-Queney, 1993 ; Peulvast *et al.*, 1999). Entre Senas et Mallemort, des sédiments plus anciens, datés du Crétacé supérieur, constituent les chaînons calcaires de la Cabre (152 m), du Pécoule (167 m), du Pas des Lanciers (153 m), de Pierredon (139 m) et de Mallemort (135 m). La plaine alluviale est encadrée, au nord, par le massif du Petit Luberon et à l'ouest, par la partie orientale de la chaîne des Alpilles (fig I.2a et b). A l'inverse du Petit Luberon, qui est principalement recouvert de forêts, les bas de versant des Alpilles sont souvent cultivés (vignes, arbres fruitiers et oliviers). En plaine, l'occupation du sol est peu diversifiée. Hormis la végétation « naturelle » composée de la ripisylve à proximité de la Durance, le réseau routier (ex : RN7 et A7) et les villages (Mallemort, Senas, Lamanon, Alleins, ...), l'agriculture est omniprésente. Les cultures dominantes sont les plantations fruitières et le maraîchage (fig I.3). Le climat, de type méditerranéen, se caractérise notamment par de faibles précipitations (<600 mm/an) et une insolation supérieure à 2800 h/an. A Salon-de-Provence, le Mistral, de direction N-NO (340°) est le vent le plus fréquent (Météo-France, 1996). Dévié et accéléré par les massifs du Petit Luberon et des Alpilles (effet venturi), le mistral prend une direction générale entre 290° et 310° au niveau de Mallemort et de Senas. Pour limiter les effets négatifs liés aux vents forts sur les cultures, des haies brise-vent ont été plantées en amont des parcelles agricoles. La plantation des haies date du début du XIX siècle et correspond au début de l'arboriculture dans la vallée (Gade, 1978). Les haies brise-vent créent un microclimat favorable à la croissance des cultures fruitières en accentuant le gain thermique à l'échelle annuelle. Le bon ensoleillement et les températures relativement douces expliquent que la précocité des cultures est l'un des atouts majeurs de l'agriculture régionale puisque le produit financier le plus intéressant est souvent obtenu dans les premiers jours de la récolte.

Depuis 1995, et le début des travaux de terrassement, la LGV Méditerranée traverse les parcelles agricoles (principalement fruitières et maraîchères) entre Orgon et Mallemort selon un axe Nord/Sud. La succession de déblais et de remblais, atteignant une hauteur proche de 15 m avec les inérlons antibruit, sont des nouveaux éléments majeurs du milieu (fig I.3).



a)



b)

Q : Quaternaire P : Pliocène  
 m3-4 : Langhien-Serravallien  
 m2 : Burdigalien g1b : Ludien  
 e5 : Lutétien c8, c7 : Maastrichtien  
 n5U : Bédoulien n4 : Barrémien  
 n3 : Hauterivien n2 : Valanginien  
 n1 : Berriasien j9-j8 : Tithonique

Les flèches blanches indiquent les cours successifs de la Durance au Messinien et au Plio-Pléistocène (1), au Pléistocène moyen (2), au Pléistocène supérieur (3), à la fin du Würm et à l'Holocène (4).

# UNITES GÉOLOGIQUES RÉGIONALES

## ALPES OCCIDENTALES

### Zone interne

- Massifs cristallins internes
- Schistes lustrés
- Calcaires massifs et quartzites Briançonnais
- Calcaires et flyschs à faciès diversifié
- Flyschs de l'Ubaye / Embrunais
- Nappe de flyschs franco-suisse (Chablais)

### Zone subalpine

- Calcaires et calcaires marneux mésozoïques plissés
- Molasse, conglomérats et marnes néogènes de la Valencole
- Conglomérats et calcaires du bas Dauphiné

## JURA

- Châlonnais plissés calcaire de type alpin

## BASSE PROVENCE

- Massifs cristallins provençaux
- Basse Provence calcaire plissée

## MASSIF CENTRAL

- Cristallin, métamorphique et volcanique

## BAS LANGUEDOC CALCAIRE

- Avant-pays calcaire des Cévennes (Garrigues)

- Formations quaternaires

- Principales failles affectant la région du delta du Rhône

Fig I.1 : Diversité géologique aux échelles du bassin versant rhodanien (a) et de la basse vallée de la Durance (b) : d'après Arnaud-Fasseta, 1999 (a) et Peulvast et al, 1999 (b).

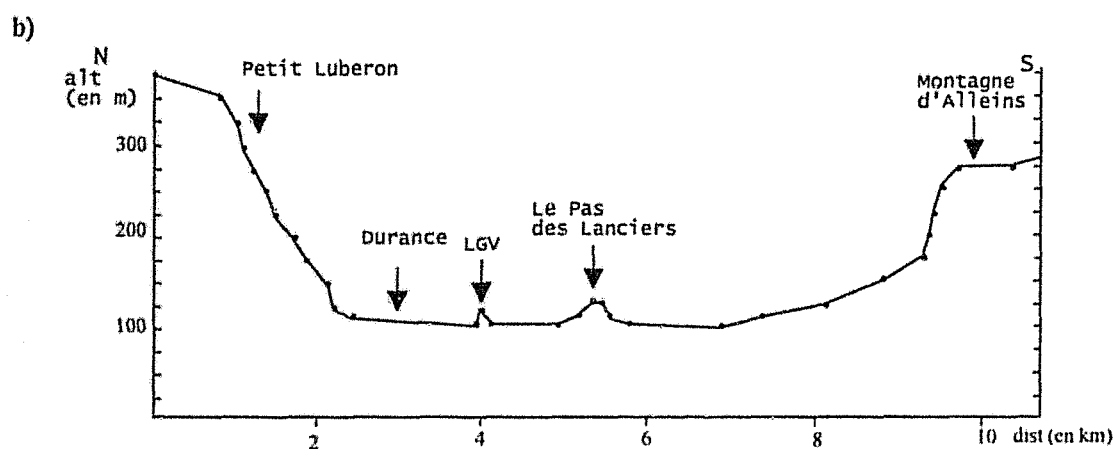
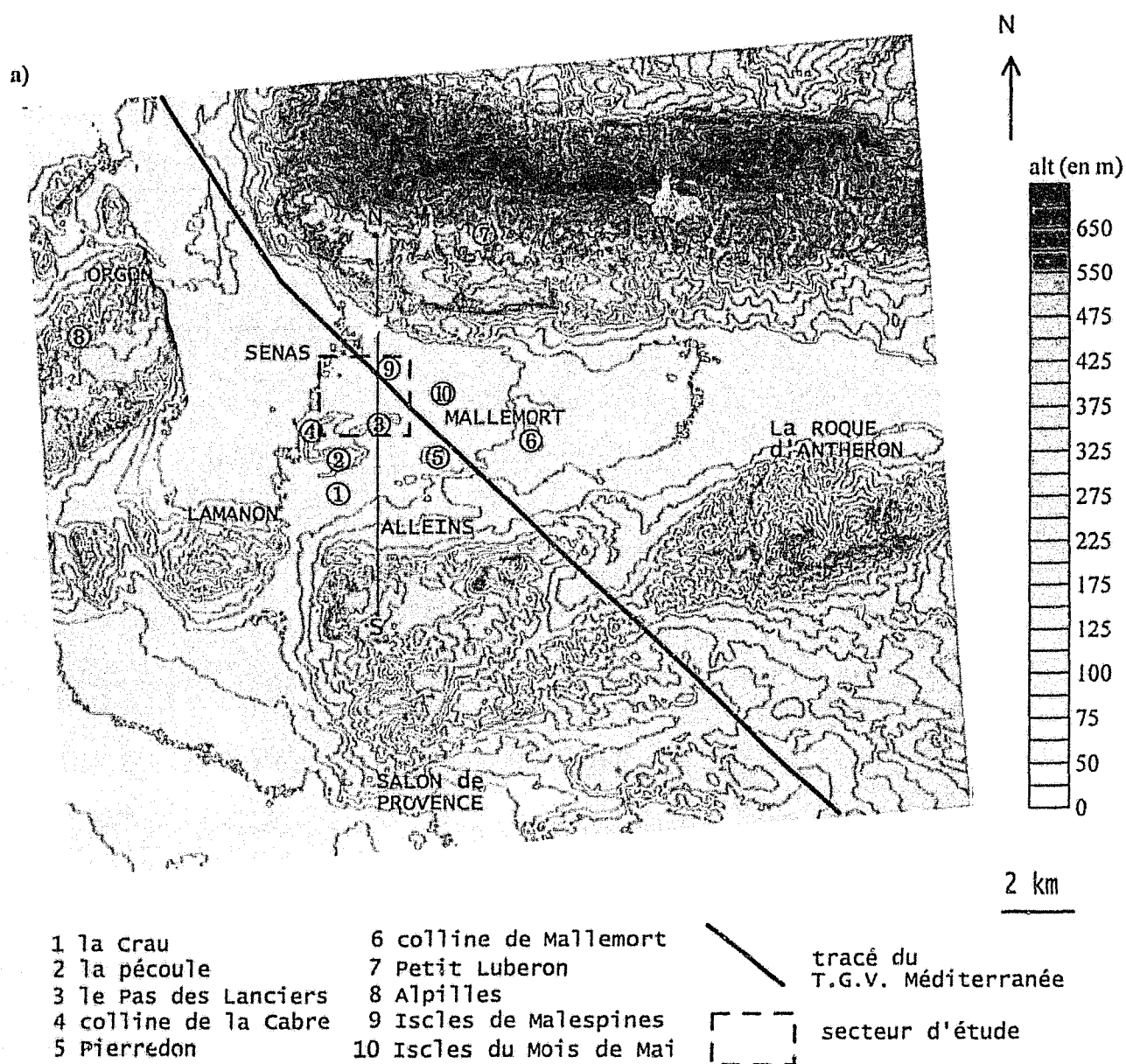


Fig I.2 : Topographie de la basse vallée de la Durane,  
Modèle Numérique de Terrain (a) et coupe topographique (b).  
données morphométriques Visual Dem, équidistance de 20 m et résolution verticale de 1 m.



-  infrastructures de la ligne ferroviaire (remblai, merlons antibruit) d'une hauteur variant de 8 à 13 m
-  infrastructures de la ligne ferroviaire (remblai) d'une hauteur variant de 2 à 8 m
-  ouvertures sous la ligne ferroviaire
-  haies brise-vent
-  routes et chemins
-  bâtiments
-  cultures fruitières
-  grandes cultures, maraîchage et fleurs
-  autre (friches, ...)
-  courbes de niveau
-  Durance

(la construction du S.I.G. est présenté dans la partie 4).

Fig I.3 : Occupation du sol et topographie du secteur d'étude.

## Les modifications micro-climatiques provoquées par la LGV

Aux échelles fines, les conditions atmosphériques au niveau de la couche limite sont tributaires des conditions de surface. La morphologie, les aspérités et la nature de la surface définies par le relief, la végétation ou par diverses infrastructures humaines, modifient le comportement des variables météorologiques et caractérisent à terme le *microclimat*.

Pour déterminer l'action d'un obstacle anthropique sur les variables météorologiques, il est nécessaire d'aborder le milieu dans sa globalité et d'adopter une approche systémique. *« Il est logique en premier lieu de mettre en cause l'hétérogénéité spatiale des milieux comme invariants : énergie du relief et géométrie des formes, lithologie du substratum, formations superficielles... Mais les obstacles majeurs soulevés par l'analyse résident dans l'évaluation du rôle essentiel joué par des variables que lient des interrelations complexes : les entrées climatiques, les écoulements qui gouvernent l'hydrosystème et ses flux de matières. Or dans la plupart des cas se combinent aux processus naturels des actions anthropiques. Elles font parties intégrantes du système en le modifiant, non seulement par le biais du couvert végétal ou plus généralement par des transformations dans l'occupation du sol, mais encore par des aménagements plus ou moins lourds »* (Godard, 1995). Dans cette citation se dégage la notion de géosystème. Le géosystème est constitué d'une combinaison de composantes - topographique, géologique, géomorphologique, hydrologique, phytologique, atmosphérique et anthropique - étroitement liées entre elles par un réseau d'interrelations qui définit la structure du système. Si une des composantes est modifiée, cela peut se répercuter sur les autres et déséquilibrer le système. L'homme est amené par ses inventions et son organisation en société à exploiter le milieu et à construire un certain nombre d'infrastructures ; cela provoque des déstabilisations plus ou moins importantes du milieu.

La basse vallée de la Durance, comme toute portion d'espace, est un système à multiples composantes. L'implantation du remblai ferroviaire (*composante anthropique*), en brisant l'équilibre préexistant dans ce milieu déjà fortement aménagé par l'homme pour permettre l'agriculture (haies brise-vent), constitue un élément perturbateur supplémentaire, notamment pour les variables météorologiques. En arrachant les haies brise-vent (*composante phytologique*) sur un large couloir, puis en construisant un obstacle linéaire de plusieurs mètres de haut, l'aérodynamisme local (*composantes météorologique et climatique*) subit des perturbations. C'est en particulier le cas lors des situations de refroidissement nocturne radiatif, les plus basses températures sont alors relevées dans les secteurs où l'air froid stagne (ex : cuvette). La présence de constructions de plusieurs mètres de haut est susceptible de créer un véritable « lac d'air froid » en bloquant les écoulements gravitaires. Par temps de mistral, la destruction des brise-vent perturbe l'écoulement du vent et amoindrit l'efficacité du réseau de haies sur les parcelles à proximité de la ligne ferroviaire. Le mistral, dont l'orientation est similaire au tracé ferroviaire, est canalisé le long du remblai. La compression de l'air dans l'emprise engendre de fortes turbulences et une accélération du vent. Ces modifications climatiques microlocales peuvent à terme accentuer les risques pour les cultures fruitières et générer un préjudice économique important pour les arboriculteurs (fig 1.4).

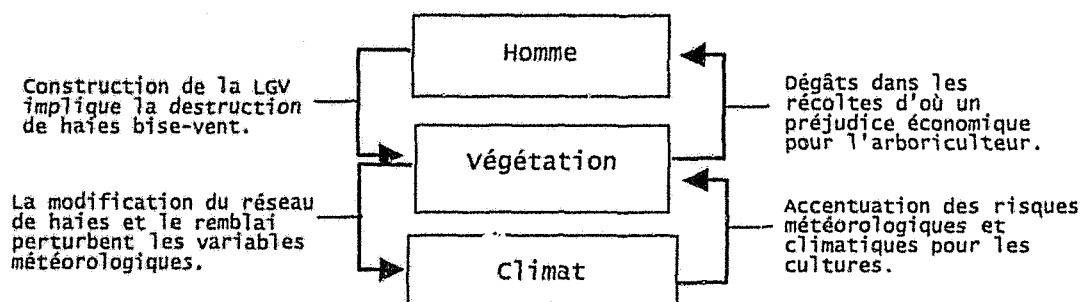


Fig I.4: Schéma de l'interaction entre plusieurs composantes du milieu montrant les perturbations engendrées par l'implantation de la LGV.

### Le risque climatique supplémentaire imputable à la LGV

Ici, le risque agricole (arboricole pour l'essentiel) est abordé dans le sens d'un préjudice économique (perte financière) ; mais dans la première moitié du siècle dernier, la destruction des cultures par des phénomènes météorologiques pouvaient engendrer un risque vital (ex : pénurie de nourriture) : « *c'est le sort du paysan. Quand c'est pas la guerre, c'est la grêle ou la gelée : pour le paysan, il n'y a point de paix sur la terre*<sup>2</sup> ». En Provence - et en particulier dans la basse vallée de la Durance -, où la précocité et la qualité sont les atouts principaux de l'arboriculture, le gel printanier, la grêle et le mistral sont les phénomènes météorologiques qui engendrent les dégâts les plus importants (Bordreuil, 1975). Suite à ces phénomènes, le végétal subit des dommages soit d'ordre quantitatif (destruction), soit d'ordre qualitatif (déformation, blessures) et dans les deux cas, cela se traduit par des pertes économiques pour l'arboriculteur.

Le risque climatique en arboriculture dépend, d'une part de l'*aléa météorologique* et d'autre part de la *vulnérabilité* des cultures soumises aux phénomènes météorologiques. L'aléa se caractérise suivant « *l'intensité, la fréquence et l'extension spatiale du phénomène météorologique* » (Vinet, 1997 et 1999). Par exemple, pour les gelées radiatives, les dépressions ou les cuvettes sont généralement les secteurs où l'aléa est le plus fort. Ces formes topographiques favorisant l'accumulation et la stagnation d'air froid, l'intensité du refroidissement et la fréquence des épisodes gélifs sont plus importantes que sur un terrain en pente. L'aléa est à l'origine du risque puisqu'il engendre une probabilité de dommages pour les cultures. Mais, comme l'indique Veyret et Pech (1993), le risque n'existe que dans la mesure où il affecte un bien, ainsi « *la notion de vulnérabilité désigne la valeur qui serait perdue en cas d'aléa* ». La vulnérabilité agronomique se traduit par la capacité du végétal à résister aux phénomènes météorologiques. Celle-ci varie fortement suivant les espèces et les variétés fruitières. Par exemple, après une nuit gélive printanière intense, les bourgeons d'une variété de pomme sensible aux basses températures peuvent être complètement détruits (destruction des ovaires et du pistil) alors que ceux d'une autre variété vont mieux résister et subiront des dommages moins importants (Louis, 1988). A l'échelle d'une exploitation

<sup>2</sup> J.P. Sartre, « La mort dans l'âme » (1949)

arboricole, la forte variabilité spatiale de l'aléa et de la vulnérabilité se traduit par des récoltes très hétérogènes d'une parcelle à une autre.

La plupart des travaux sur la relation *aléa météorologique / vulnérabilité agronomique* sont consacrés à la viticulture (Endlicher, 1980 ; Sarmir, 1995 ; Bonnardot, 1996 ; Bonnardot *et al.*, 2001) et abordent ce thème à l'échelle régionale. Pourtant, la variabilité spatiale de l'aléa ou de la vulnérabilité montre que le risque agronomique doit également être traité à l'échelle micro-climatique. Les modifications du milieu provoquées par la construction de la LGV sont responsables de l'accentuation de l'aléa pour les variables météorologiques (en particulier pour le gel et le vent, la localisation de la grêle étant plus aléatoire) ainsi que de l'augmentation de la vulnérabilité agronomique. Sur les communes de Mallemort/Senas, le remembrement agricole, provoqué par les expropriations, a entraîné une augmentation de la surface cultivée en arboriculture au détriment des petites exploitations maraîchères (fig. I.5). Sur une bande d'environ 290 ha de part et d'autre de la LGV, l'emprise ferroviaire a nécessité la destruction des cultures sur une surface de 39 ha. C'est principalement dans le domaine du maraîchage (13 ha en 1998 sur 44 ha en 1995) et des grandes cultures (41,5 ha en 1998 sur 85 ha en 1995) que la diminution des terres cultivées a été la plus importante. Par contre, pour l'arboriculture, malgré la présence de l'emprise (18 ha d'arbres fruitiers arrachés), la surface cultivée a augmenté (138 ha en 1998, soit 13 ha de plantations nouvelles par rapport à 1995).

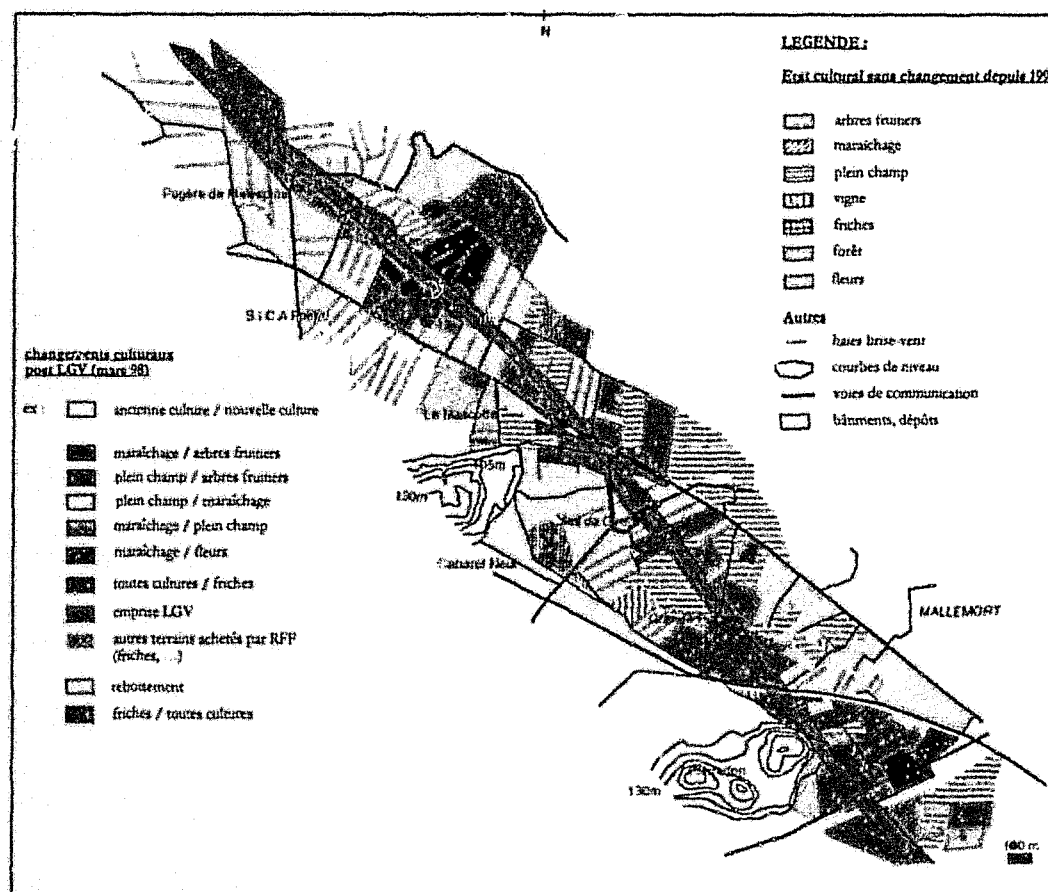


Fig I.5 : Modification de l'occupation du sol, à Mallemort, entre 1995 et 1998, sur une bande de 290 ha, de part et d'autre de la LGV (Quénol et Beltrando, 1999).



La probabilité de pertes pour les arbres fruitiers soumis au gel et au mistral est plus forte que pour les cultures maraîchères. En effet, une forte gelée printanière peut détruire la totalité des organes fruitiers (bourgeons, fleurs ou petits fruits) très sensibles aux faibles températures à cette période de reprise de la végétation (Bonhomme et Rageau, 1989). De même que la succession d'épisodes de mistral occasionne des dommages qualitatifs sur les fruits (boisage provoqué par des frottements). Les cultures maraîchères sont peu exposées au gel printanier et le risque potentiel lié au mistral, même s'il existe (ex : destruction des serres), est moins fort que pour les cultures fruitières.

La perturbation du milieu, avec l'apport d'un nouvel obstacle - *infrastructures ferroviaires* - accentue probablement le risque climatique pour les cultures fruitières. Pour évaluer l'impact de la LGV sur la répartition du gel printanier et sur l'écoulement du mistral, nous devons déterminer l'influence des différents éléments de la surface susceptibles de modifier le comportement des paramètres météorologiques. La variabilité spatiale des températures nocturnes en situation gélive semble plus complexe à étudier que celle du mistral. En effet, elle dépend des caractéristiques du milieu (rugosité et nature de la surface) mais également d'autres variables météorologiques telles que l'humidité relative, le vent (même faible), le rayonnement infrarouge... qui elles-mêmes sont influencées par le milieu (Guyot, 1997). Sachant qu'il se produit deux types de gel (radiatif et advectif) correspondant à des conditions atmosphériques différentes (et ces deux types peuvent se combiner), nous devons, pour étudier la variabilité spatiale des températures, prendre en compte l'influence des différents éléments du milieu sur les températures mais également sur les autres variables météorologiques. Ces paramètres météorologiques et environnementaux associés à la sensibilité du végétal aboutissent à la variabilité du gel et donc à la localisation du risque pour l'arboriculteur. La variabilité spatiale du mistral dépend essentiellement des caractéristiques du milieu (relief, haies brise-vent, ...). Combinée à la sensibilité des cultures fruitières, elle aboutit également à la répartition spatiale des dégâts et des préjudices économiques pour l'arboriculteur.

Dans cette thèse, on cherche à étudier les modifications climatiques, aux échelles fines, que peut générer un ouvrage linéaire en remblai dans un milieu arboricole. Après avoir évoqué succinctement le « fonctionnement » du milieu et la notion de risque agronomique, plusieurs interrogations se posent sur les méthodes à employer, **d'une part pour évaluer l'impact du talus ferroviaire sur la répartition du gel et sur l'écoulement du mistral et d'autre part, pour réaliser une carte exhaustive des risques micro-climatiques supplémentaires imputables à l'ouvrage en remblai.**

Pour déterminer l'impact climatique d'un ouvrage anthropique aux échelles fines, plusieurs méthodes sont envisageables :

- ♦ la simulation en laboratoire (ou la modélisation « *physique* ») est couramment utilisée notamment pour déterminer les propriétés aérodynamiques des bâtiments et des ouvrages d'art (Rebuffet, 1969 ; Gandemer, 1981 ; Struijs et Morteo, 1992). La construction d'une maquette de l'obstacle étudié et l'utilisation d'une soufflerie (aérodynamique ou numérique)



permettent de simuler les mouvements de l'atmosphère au niveau de la couche limite. Cette technique apporte des informations précises sur le comportement aérodynamique d'un obstacle et semble adaptée pour évaluer l'impact du remblai sur l'écoulement du mistral mais elle s'avère très onéreuse (ex : plusieurs milliers d'euros l'heure d'expérimentation dans la soufflerie du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Nantes) et elle ne permet pas de prendre en compte l'ensemble des paramètres du terrain lorsque le milieu est complexe (ex : simulation des haies, des arbres fruitiers, ...);

♦ la modélisation « *numérique* » consiste à évaluer et à quantifier le comportement des variables météorologiques au niveau de la couche limite par l'intermédiaire d'équations mathématiques (Wanner, 1991). Même si certains modèles expérimentaux comme Mésio-Nh de Météo-France sont conçus pour tenir compte des conditions de surface réalistes et à haute résolution (Kastendeuch, 1996), ce type d'approche ne permet pas de simuler précisément des processus à grande échelle (ordre de grandeur de quelques mètres). Par conséquent, cette méthode semble peu adaptée à notre problématique puisque l'influence climatique du remblai et des autres facteurs environnementaux de l'espace étudié (haies brise-vent, bâtiments, ...) n'est perceptible qu'aux échelles spatiales fines.

♦ la méthode « *empirique* » consiste à simuler l'obstacle et à mesurer les variables atmosphériques sans, puis avec, la présence de l'obstacle, afin d'établir un différentiel entre les deux. Par exemple, cette démarche a été suivie dans le cadre de l'étude d'impact micro-climatique de la future LGV Est Européenne où le remblai ferroviaire a été matérialisé par une bâche ayant la longueur et la hauteur du talus (Beltrando *et al*, 1995 ; Bridier *et al*, 1995 ; Beltrando *et al*, 2002). L'approche empirique permet de réaliser des mesures prenant en compte la réalité du terrain mais cette méthode est onéreuse (construction de la bâche) et ne concerne que les études d'impact préalables à la construction de l'ouvrage ;

♦ la dernière démarche, fréquemment employée en climatologie locale, réside dans la mesure des variables météorologiques sur le terrain expérimental à proximité de l'obstacle étudié. Cette méthode présente l'intérêt d'être assez souple et beaucoup moins onéreuse que les précédentes. Généralement, ce type d'expérimentation consiste à mesurer les variables météorologiques sur le site initial puis après l'implantation de l'infrastructure anthropique, de manière à réaliser une étude comparative entre les deux situations.

C'est cette dernière démarche qui est choisie pour déterminer l'influence du remblai ferroviaire sur l'écoulement du mistral. Pour le gel printanier, la situation est différente parce que l'expérimentation se déroule après l'implantation du talus ferroviaire. Les mesures météorologiques doivent être effectuées en conséquence de manière à évaluer l'action du remblai par rapport aux autres facteurs environnementaux qui modifient également les variables météorologiques.

## Les étapes de la démarche

Pour répondre à ces interrogations, nous avons mis en place une méthode permettant, d'abord, de comprendre l'influence du remblai de la LGV sur le gel printanier et sur le mistral<sup>3</sup>, puis de simuler sur l'ensemble du site expérimental, les secteurs où le risque pour les cultures fruitières est accentué par la ligne ferroviaire.

La principale difficulté de ce travail provient des caractéristiques et du fonctionnement du milieu. La répartition spatiale des paramètres météorologiques, dans les premiers mètres de la couche limite, est conditionnée par des perturbations successives engendrées par les composantes topographiques (relief), phytologiques (haies brise-vent, forêt, ...), anthropiques (obstacles artificiels, ...), hydrographiques (canaux, cours d'eau ...), géologiques (substrat) et autres éléments caractérisant le milieu. Pour déterminer l'impact du remblai sur la répartition du gel et du mistral, l'ensemble de ces éléments doit être pris en compte en fonction de leur influence. Par conséquent, avant d'aborder les expérimentations sur le terrain, il faut essayer de hiérarchiser ces différents éléments suivant des niveaux d'échelles spatiales emboîtées. Réalisées selon un emboîtement « cohérent » d'échelles spatiales, c'est-à-dire de l'échelle la plus vaste à la plus fine, les mesures météorologiques permettront d'étudier la variabilité spatiale des paramètres météorologiques et à terme, d'estimer l'impact du remblai de la LGV. Mais les mesures météorologiques ne sont pas suffisantes pour définir le risque agricole. Ce ne sont pas forcément dans les secteurs enregistrant les paramètres météorologiques les plus intenses (ex : secteurs les plus froids en situation gélive) que les dégâts sont les plus importants. En effet, en arboriculture, il faut également tenir compte de la capacité du végétal à résister aux phénomènes météorologiques. Une expérimentation et un suivi agronomique sont donc nécessaires en complément des mesures météorologiques pour contrôler les végétaux (bourgeons, fleurs ou fruits), afin d'en déduire les secteurs où les dommages sont les plus importants. La deuxième phase de l'expérimentation sur le terrain consiste donc à effectuer des contrôles sur fruits, soit après un épisode météorologique intense (ex : forte gelée), soit à la fin de la croissance du fruit (ex : succession des épisodes de mistral) afin d'analyser l'aspect du végétal. La combinaison de ces deux types d'expérimentation permet de localiser les secteurs arboricoles à risques.

Après avoir acquis, ponctuellement, des données sur le terrain par l'intermédiaire de mesures météorologiques et d'observation du végétal, la troisième phase de ce travail consiste à réaliser une modélisation spatiale sur l'ensemble du site afin d'obtenir un document cartographique représentant les différents secteurs où le risque est accentué par l'ouvrage en remblai (fig 1.6). Le passage du « terrain » à la modélisation nécessite l'utilisation d'un outil s'inscrivant dans la démarche scientifique suivie pour l'expérimentation sur le terrain, c'est-à-dire : étudier l'influence de chaque élément du milieu pouvant modifier la répartition du gel et de l'écoulement du mistral en fonction de l'imbrication des échelles spatiales. L'utilisation d'un SIG combinant plusieurs formats de données (vectoriels et raster) permet de mettre en relation des informations de nature (données météorologiques, occupation du sol, sensibilité des arbres fruitiers, ...) et d'échelles différentes afin de réaliser une cartographie des modifications micro-climatiques générées par l'ouvrage linéaire en remblai.

<sup>3</sup> Compte tenu de sa violence et de sa fréquence, le mistral est le seul vent sur lequel nous avons travaillé.

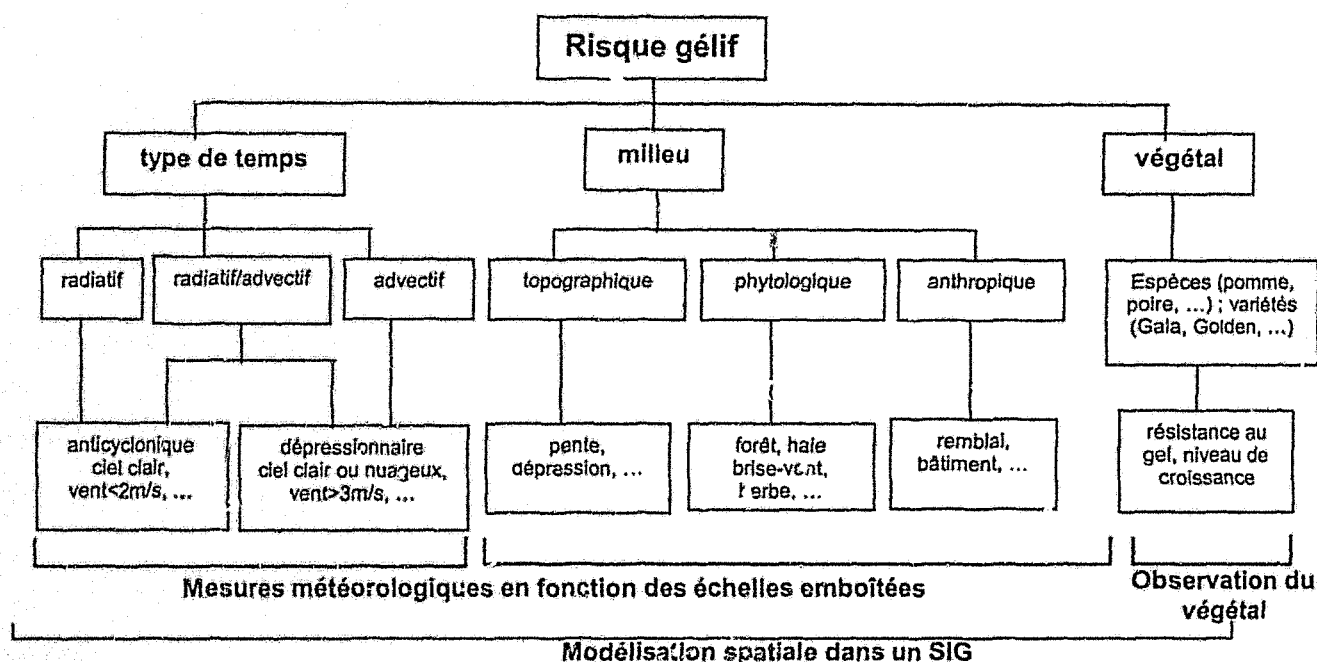


Fig I.6 : Interaction des différents paramètres définissant le risque gélif.

Nous savons que la variabilité spatiale des températures nocturnes en situation d'olive est plus complexe à étudier que celle du mistral. Les protocoles expérimentaux de mesures terrain et de modélisation sont développés en détails pour l'étude sur le gel ; dans le cadre de l'étude sur le mistral, ils ne sont qu'appliqués. L'essentiel de cette thèse est ainsi consacré aux différentes étapes d'analyse de la variabilité du gel aux échelles fines.

Ce travail s'articule en 4 parties :

- dans un premier temps, nous présentons la démarche scientifique - état des connaissances ; détermination des terrains de mesures en fonction des échelles spatiales imbriquées ; mesures sur le terrain pour collecter les données météorologiques et agronomiques ; méthode de modélisation spatiale - mise en place pour étudier les modifications micro-climatiques entraînées par la LGV ;
- puis, nous exposons les résultats des mesures météorologiques réalisées aux diverses échelles spatiales. Un chapitre est consacré spécifiquement au microclimat engendré par les haies brise-vent, parce que la forte variabilité micro-climatique engendrée par celles-ci peut être apparentées à des phénomènes d'échelles plus vastes, notamment celle du remblai ;
- les résultats de l'expérimentation agronomique viennent valider les mesures météorologiques et elles apportent des informations permettant d'extrapoler (de généraliser) les mesures ponctuelles afin de déterminer les secteurs où le risque est accentué par les infrastructures ferroviaires ;

### *Introduction générale*

- enfin, nous détaillons les différentes étapes de la modélisation spatiale sur l'ensemble du site expérimental à partir des diverses données obtenues ponctuellement sur le terrain. Cette dernière étape permet d'aboutir à un ensemble de cartes des risques microclimatiques provoqués ou accentués par la LGV.

## PARTIE 1 : ACQUISITION DES DONNEES ET TECHNIQUE DE MODELISATION SPATIALE

---

Evaluer l'influence du remblai ferroviaire implique une méthode de recherche adaptée prenant en compte l'ensemble des facteurs agissant sur le climat local. La connaissance de l'état de l'atmosphère est fondamentale, mais comme celle-ci varie à des échelles spatiales et temporelles emboîtées, les protocoles de mesures (météorologique et agronomique) et de modélisation doivent être établis en conséquence. Cette partie présente les étapes successives de cette étude :

- ♦ des recherches bibliographiques de manière à connaître les différents mécanismes, entre les paramètres météorologiques, et le milieu qui déterminent la variabilité spatiale du gel et du mistral aux échelles fines ;
- ♦ à partir des connaissances bibliographiques, essai de hiérarchisation de chaque élément perturbateur suivant l'emboîtement des échelles spatiales afin de définir les terrains expérimentaux et le protocole de mesures ;
- ♦ Une fois les terrains expérimentaux et la disposition des capteurs météorologiques choisis, en fonction des niveaux d'échelles spatiales, collecte des mesures météorologiques et agronomiques. Les mesures se déroulent différemment pour l'étude du gel et du mistral.
- Pour l'expérimentation sur la variabilité spatiale des températures nocturnes, nous ne disposons pas de données avant l'implantation du remblai. Nous réalisons les mesures (météorologiques et agronomiques) aux différentes échelles spatiales prédéfinies, de la plus vaste à la plus fine, de manière à étudier l'influence des différents obstacles du milieu et d'en déduire l'impact du remblai. La répartition spatiale des basses températures variant suivant les conditions atmosphériques, nous effectuons les campagnes de mesures en situations de refroidissement radiatif (*temps anticyclonique, vent  $\leq 2$  m/s, ciel clair*) et advectif (*vent  $> 3$  m/s, apport d'une masse d'air froid*) (fig I.5) ;
- pour le mistral, l'expérimentation commence avant le début des travaux ; des mesures sont réalisées sur le site initial, puis aux différentes phases de la construction de la LGV de manière à analyser les modifications successives de l'écoulement du vent.
- ♦ Après avoir acquis ponctuellement et analysé les données, l'étape suivante consiste à les spatialiser afin d'obtenir une cartographie des secteurs où le risque climatique est accentué par le remblai de la LGV. La modélisation des risques aux échelles fines requiert la construction d'un Système d'Information Géographique (SIG). Cet outil informatique permet de mettre en relation les données terrain (météorologiques et agronomiques), obtenues ponctuellement, avec les différents obstacles (relief, occupation du sol) qui influent sur la variabilité spatiale des paramètres météorologiques. Certaines informations nécessitant des traitements de données préalables (interpolation de températures, réalisation d'un Modèle Numérique de Terrain), le SIG se compose de plusieurs logiciels (Mapinfo et Surfer) et d'une passerelle informatique qui permet d'assurer une liaison entre ces logiciels qui ont des fonctions spécifiques. Après divers traitements informatiques et statistiques, l'ensemble des informations, qui sont de formats (raster et vecteur) et d'échelles différents, est intégré dans le logiciel vectoriel (Mapinfo) sous la forme de couches que nous superposons afin d'obtenir une cartographie des modifications micro-climatiques engendrées par la LGV Méditerranée.

## 1 GELEE DE PRINTEMPS ET MISTRAL : DESCRIPTION ET MECANISMES ?

---

### 1.1 Variabilité spatiale du gel printanier

La variabilité spatiale du gel aux échelles fines dépend fortement de l'état, de la morphologie et des aspérités de la surface terrestre. Pour comprendre et évaluer l'impact du remblai de la LGV sur le climat local, il faut d'abord connaître les différents mécanismes qui peuvent influencer la répartition des températures en situation gélive.

#### 1.1.1 Les composantes du bilan énergétique

Le comportement des températures, notamment en situation gélive, dépend des différents transferts d'énergie qui s'effectuent soit par radiation, soit par advection/convection, soit par conduction. C'est le rapport entre l'apport et les pertes énergétiques qui va déterminer la température de l'air ou d'un corps (Guyot, 1997).

Le bilan énergétique est fonction de la quantité d'énergie reçue et perdue en un point donné. Les transferts de chaleur sensible - *chaleur qui modifie la température des corps à l'exclusion de toute quantité d'énergie correspondant à un changement de phase* - s'opèrent dans l'air surtout par rayonnement ou advection et dans le sol essentiellement par conduction. Les flux de chaleur latente se produisent uniquement lors des changements de phase de l'eau principalement par condensation (libération d'énergie) et par évaporation (consommation d'énergie).

L'ensemble des flux d'énergie échangés est défini suivant l'équation du bilan d'énergie :

#### Equation du bilan d'énergie

$$RN + \emptyset L + \emptyset C + \emptyset V = 0$$

RN = Rayonnement net (bilan radiatif)

$\emptyset L$  = Flux de chaleur latente

$\emptyset C$  = Flux de convection dans l'air

$\emptyset V$  = Flux de conduction dans le sol

Le *bilan radiatif* ou le rayonnement net (RN) correspond au bilan de l'ensemble des échanges de rayonnement de courte (solaire) et de grande longueur d'onde (atmosphère terrestre) au niveau de la surface du sol (Guyot, 1997 ; Hufty, 1997). La quasi totalité de la chaleur acquise par la surface de la terre provient du rayonnement solaire. La totalité de l'énergie solaire n'atteint pas le sol puisqu'une partie est absorbée, diffusée ou réfléchie par l'atmosphère. Le rayonnement global (Rg) reçu par la surface des terres et des mers est composé de la radiation directe (RD) à laquelle s'ajoute le rayonnement diffus (Rd), réfléchi par des molécules de gaz ou de poussières contenues dans l'air. Au niveau du gain énergétique du sol, il faut également inclure le rayonnement atmosphérique (RA) de grande longueur d'onde qui résulte des rayonnements émis par la vapeur d'eau. Ces divers mécanismes d'acquisition énergétique par le sol représentent le côté positif du bilan énergétique. Le côté négatif constitue la part énergétique émise par la terre en direction de

l'espace sous forme de rayonnement infrarouge (rayonnement terrestre RT) ainsi que l'énergie réfléchi par le sol (albédo  $a$ ). Plus l'albédo est faible (faible réflexion du rayonnement solaire), moins les déperditions énergétiques superficielles sont importantes.

La somme algébrique de ces différents facteurs de gains et de pertes énergétiques représente le bilan énergétique. Positif durant la journée, il devient négatif durant la nuit, le rayonnement atmosphérique n'étant pas suffisant pour compenser les pertes de la surface du substrat. Le solde positif ou négatif du bilan radiatif varie aussi selon les conditions atmosphériques. La présence de vapeur d'eau renforce le rayonnement atmosphérique (effet de serre) et limite les pertes énergétiques, notamment la nuit. Durant la journée, l'action positive de la vapeur d'eau (nuage ou brouillard) n'est pas perceptible car le couvert nuageux restreint le rayonnement solaire (Carrega, 1994). L'effet de serre, provoqué avant tout par la vapeur d'eau, diminue l'intensité du solde positif (jour) ou négatif (nuit) du bilan radiatif, ce qui explique la faible amplitude thermique quotidienne en situation nuageuse. Inversement, par temps clair, l'apport énergétique diurne et les déperditions nocturnes sont très importants, d'où une amplitude thermique très forte.

Equation du bilan radiatif

$$RN = Rg (1-a) - (RT-RA)$$

$$Rg = RD + Rd$$

RD = Rayonnement solaire direct

Rd = Rayonnement solaire diffus

$a$  = Albédo du sol

RA = rayonnement atmosphérique provenant au sol (effet de serre)

RT = rayonnement terrestre

La part du rayonnement dans les transferts énergétiques entre le sol et l'air est essentielle mais elle ne rend pas compte de l'ensemble des mécanismes. La chaleur peut également se transmettre par conduction (pour les solides) et par convection (pour les fluides).

Les échanges énergétiques par *conduction* ( $\emptyset V$ ) concernent les transferts de chaleur dans le sol. Ceux-ci varient en fonction de la composition physique, de la nature de la couche superficielle (sol nu, enherbé, ...) et du taux d'humidité du sol. «*La conductance thermique dépend du rapport conductivité/capacité calorifique du sol et pour un même sol, elle augmente au fur et à mesure que celui-ci se rapproche de la saturation en eau jusqu'à une limite légèrement inférieure à cette dernière*» (Carrega, 1994).

La *convection* ( $\emptyset C$ ) se produit à travers un fluide en mouvement. Les mouvements de brassage sont provoqués soit par des différences de températures (gradients verticaux de température), soit par le vent (advection). Les échanges énergétiques par convection sont importants si le vent et l'amplitude thermique sol/air sont forts. Les changements de phase de l'eau ou de la vapeur d'eau constituent un mécanisme important de transfert d'énergie (Guyot, 1997).

La condensation (passage de l'état gazeux à l'état liquide) et la solidification (passage de l'état liquide à l'état solide) libèrent de l'énergie sous forme de *chaleur latente* ( $\emptyset L$ ) alors que l'évaporation en consomme. L'ensemble des mécanismes de transferts d'énergie conditionnent le comportement des températures (air, sol et végétation) au niveau de la couche limite.

La variabilité spatiale et temporelle de la température en un lieu ne dépend pas seulement des différents mécanismes de transferts d'énergie (rayonnement, advection,



convection, conduction, évaporation et condensation) que nous venons d'évoquer, mais également de facteurs géographiques locaux (altitude, exposition, effet d'abri, couche superficielle du sol...). Ces différents facteurs jouent un rôle important sur le refroidissement nocturne et sur la répartition spatiale des températures.

### 1.1.2 Les mécanismes du refroidissement nocturne

En faisant abstraction des échanges de chaleur latente (évaporation/condensation, ...) et de l'apport d'une masse d'air « extérieure » par advection, le refroidissement nocturne s'opère par déficit du rayonnement radiatif (rayonnement atmosphérique (RA) < rayonnement terrestre (RT)). La variabilité spatio-temporelle des températures nocturnes est forte d'autant que RA et RT diffèrent selon les conditions atmosphériques et selon les caractéristiques de l'environnement (sol, végétal, obstacles artificiels, ...) et du relief (pente, replat, cuvette, ...). Afin de mieux saisir la complexité du refroidissement par rayonnement au niveau de la couche limite, nous abordons séparément chaque paramètre du milieu ayant une quelconque influence sur le comportement spatio-temporel des températures nocturnes. A la base, considérons *une portion de terrain à topographie plane, avec un sol nu au cours d'une nuit radiative (anticyclonique, ciel clair ou peu nuageux, vents faibles)* (fig 1.1). A partir de la bibliographie, nous faisons évoluer les paramètres atmosphériques, la couche superficielle et profonde du sol, la topographie ainsi que l'occupation du sol, afin d'explorer l'ensemble des mécanismes et des interactions expliquant l'importante variabilité spatiale des températures nocturnes.

#### ✓ Au niveau des basses couches de l'atmosphère

Le refroidissement par *rayonnement* nocturne se produit lorsque le rapport entre l'énergie reçue par le sol (RA) et l'énergie renvoyée vers l'atmosphère (RT) est négatif. L'absence de rayonnement solaire après le coucher du soleil provoque une baisse de la température jusqu'au lever du jour. Les pertes énergétiques par rayonnement sont maximales, si les conditions atmosphériques sont anticycloniques avec un ciel clair, un vent faible et un air sec (Carrega, 1994). La quantité d'énergie du rayonnement terrestre (RT) perdue par la surface d'un sol à 0°C est d'environ 300 W/m<sup>2</sup> (2 600 000 kcal/h/ha) alors que le rayonnement atmosphérique (RA) se limite à environ 200 W/m<sup>2</sup> (1 700 000 kcal/h/ha) (AVC, 1991). Le ciel étant clair, le rayonnement atmosphérique provient des couches de l'atmosphère très élevées et donc très froides. Le bilan énergétique négatif de 100 W/m<sup>2</sup> (900 000 kcal/h/ha) se traduit par une baisse de la température pouvant atteindre 15 à 20°C entre le coucher et le lever du soleil (Paltridge et Platt, 1976 ; Choisnel, 1977 ; AVC, 1991). La présence de brouillard ou d'un couvert nuageux limite les déperditions calorifiques rayonnées par le sol (interception du rayonnement infrarouge par les gouttelettes d'eau). Le déficit énergétique, inférieur à 20 W/m<sup>2</sup> (180 000 kcal/h/ha) génère une faible baisse des températures durant la nuit. Le gain thermique apporté par le brouillard est accentué par le dégagement d'énergie causé par la formation des gouttelettes (fig 1.1 et 1.2). Un vent supérieur à 2 m/s au niveau du sol restreint le refroidissement par rayonnement et tend à rehausser les températures minimales (Cellier, 1989 ; Beltrando *et al.*, 1992). Par une action de brassage, les molécules

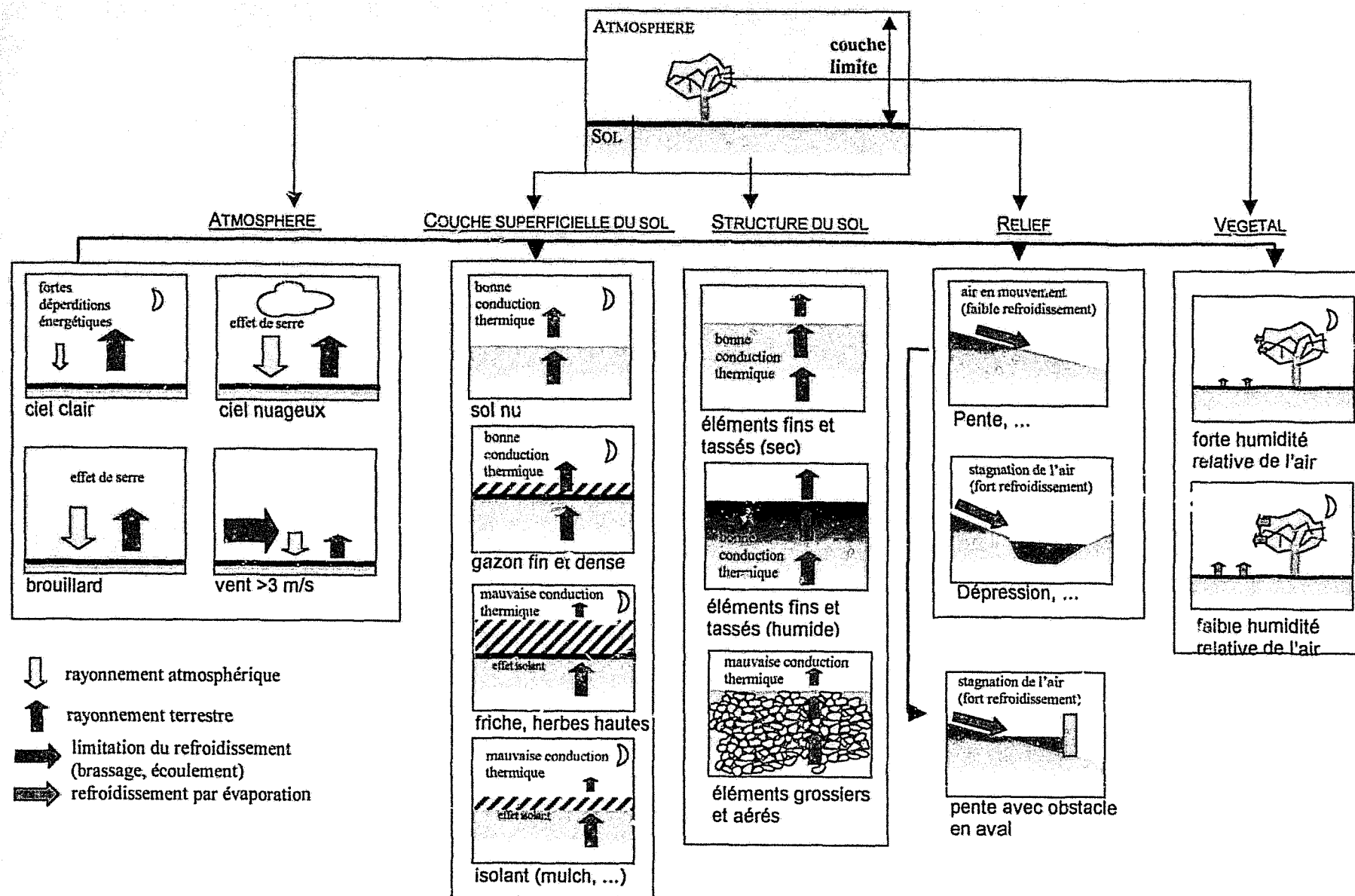


Fig 1.1 : Différents facteurs intervenant sur le refroidissement nocturne radiatif.

d'air se mélangent ce qui engendre un dégagement de chaleur. Selon Guyot (1997), «dans un fluide visqueux (ex : air), le frottement des couches entraîne une dissipation d'énergie cinétique sous forme de chaleur». Le brassage des couches d'air (vent) et l'effet de serre (nébulosité) modèrent le refroidissement nocturne par rayonnement. Le rôle bénéfique du vent et de la nébulosité reste toutefois à nuancer. L'intensité du refroidissement dépend non seulement des conditions atmosphériques nocturnes, mais également du capital énergétique acquis durant la journée. La nébulosité réduit le rayonnement solaire, de même qu'un vent du nord, par exemple, peut véhiculer une masse d'air froid.

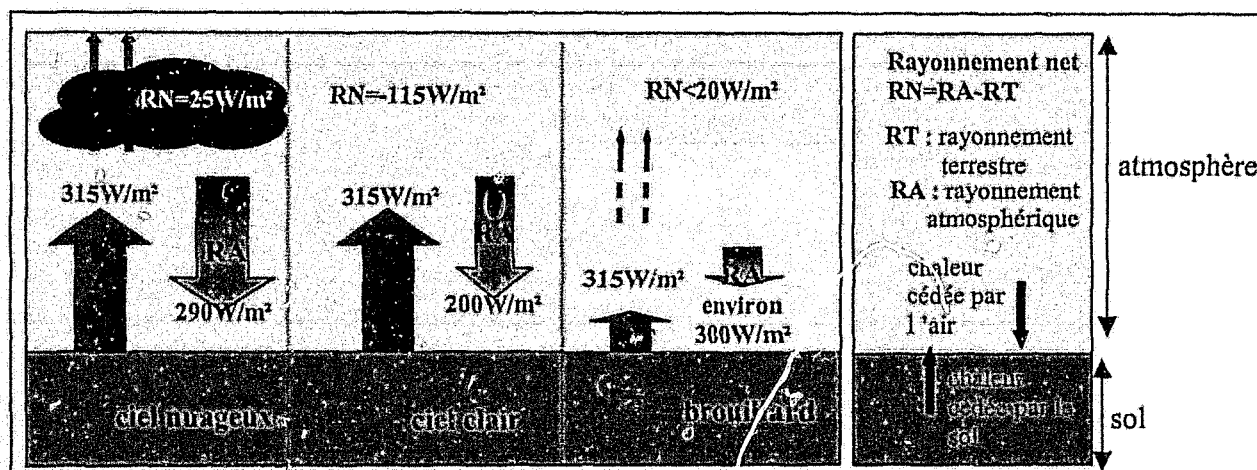


Fig 1.2 : Mécanismes du refroidissement nocturne en fonction de la situation atmosphérique (adapté de AVC, 1991 et Hufty, 1997).

Nous retiendrons que les mécanismes de transfert d'énergie dans l'atmosphère donnent lieu à un refroidissement par rayonnement d'autant plus important que le ciel est clair, le vent faible et l'air sec. Le déficit radiatif génère une diminution à la température de la surface du sol qui s'étend aux couches atmosphériques les plus basses et au sous-sol adjacent. Par conséquent, la variabilité du refroidissement nocturne est également fonction des propriétés thermiques du sol (Fig 1.1).

#### ✓ Variabilité thermique en fonction des caractéristiques du sol

La température de l'air est fortement liée à celle du sol puisqu'elle intervient sur l'ensemble des composantes du bilan énergétique (Ceiger, 1965 ; Seguin, 1990 ; Baret *et al.*, 1996). Selon Yoshino (1977), le transfert d'énergie vers l'atmosphère est tel que tout volume d'air qui stationne suffisamment longtemps au-dessus d'une surface homogène en acquiert les propriétés thermiques. La capacité du sol à accumuler ou à restituer de l'énergie par rayonnement dépend de sa composition, de sa structure et des caractéristiques de la couche superficielle. En surface, la quantité d'énergie emmagasinée par un sol nu varie suivant l'albédo, la chaleur spécifique et sa conductance (Carrega et Glinsky-Olivier, 1997 ; Charabi *et al.*, 2001). Plus la couleur du sol est claire, plus le rayonnement solaire est réfléchi vers l'atmosphère, ce qui restreint l'absorption de chaleur. Un sol brun peut absorber jusqu'à 80% de l'énergie calorifique alors qu'un sol clair réfléchit plus de 50% du rayonnement vers l'atmosphère (Bonneau et Souchier, 1994). Le gain thermique par faible réflexion est

accentué sur un sol composé de matériaux à faible chaleur spécifique (ex : sable, argile). Les corps à faible chaleur spécifique ont la particularité d'avoir besoin de peu d'énergie pour s'échauffer. Cette chaleur présente au niveau des couches sous-jacentes du sol se diffuse en profondeur grâce à la conductance du sol. Suivant la loi de Fourier, le sens du flux de chaleur dépend de la position relative des températures de surface par rapport aux couches profondes (annexe 1). « *La nuit, lorsque la température de surface est inférieure à celles des couches sous-jacentes, la restitution de chaleur du sol se réalise de la profondeur vers sa surface. Ce flux se réalise d'autant plus vite que la température de surface décroît* » (Girard, 1994). Par conséquent, un sol ayant une bonne conductivité thermique permettra un meilleur transfert de la chaleur et limitera le refroidissement nocturne puisque d'après Girard (1994), près de 80% des pertes énergétiques de la surface sont compensées par l'apport thermique venu de la profondeur. La conductance relève de la structure du sol : un sol poreux, aéré et sec a une faible conductivité ; par contre, dans un sol humide et dense, l'eau assure la conduction entre les particules du sol. Cependant, un sol de faible profondeur ayant une mauvaise conductivité mais absorbant une grosse quantité d'énergie solaire (albédo et chaleur spécifique faible) peut limiter le refroidissement nocturne en gardant la chaleur à proximité de la surface et en la restituant durant la nuit (« *effet bouillotte* »).

Le transfert d'énergie entre les profondeurs du sol et l'atmosphère est optimal lorsque la couche superficielle du sol est nue et tassée (Fig 1.1). Un sol où la couche superficielle est recouverte (herbe, mulch, compost, ...), est un obstacle à la conduction thermique (Carrega, 1994). La couverture du sol agit comme un isolant en réduisant les remontées de chaleur des profondeurs. Ce problème de transfert vertical de chaleur se produit également sur des sols travaillés ou labourés. La présence de volumes d'air importants entre les particules de terre limite la conduction thermique dans le sol. De nombreuses études ont montré que l'écart de température entre la surface d'un sol nu et d'un sol couvert peut atteindre 2 à 3°C (Tabard, 1965 ; AVC, 1991 ; Charabi *et al.*, 2000).

#### ✓ Ecoulements et blocage d'air froid

Quelque soit les caractéristiques du sol, l'air sus-jacent se refroidit tout au long de la nuit. L'air froid, plus dense et plus lourd que l'air ambiant, reste au niveau du sol par subsidence. « *L'air se refroidit également, par contact, à proximité du sol et vu sa densité plus grande, s'écoule vers l'aval par gravité* » (Fallot, 1992). Les nappes d'air froid descendent les pentes, formant ainsi les *brises descendantes ou catabatiques*<sup>4</sup> (Foulonneau, 1964 ; Bouchet, 1965 ; Geiger, 1968 ; Yoshino, 1975 ; Endlicher, 1980 ; Mahrt et André, 1982). Ces écoulements gravitaires nocturnes fonctionnent selon un système complexe d'échelles imbriquées. A l'échelle d'une vallée, la *brise de vallée descendante* draine l'air froid en direction de la plaine. Elle est alimentée par des *brises de versant* qui glissent le long des versants adjacents (fig 1.3). Par conséquent, la brise de vallée descendante correspond au cumul des courants catabatiques de tous les versants qui la borde (Aupetit, 1991).

La géographie des températures nocturnes est tributaire de la vitesse des écoulements gravitaires. Une vitesse élevée de l'écoulement limite le refroidissement par brassage des molécules d'air (dégagement de chaleur) alors qu'un ralentissement provoque une stagnation

<sup>4</sup> Les termes qui caractérisent les différents types d'écoulements d'air qui sont évoqués dans ce travail sont présentés dans l'annexe 2.

de l'air et l'accentuation du refroidissement. La vitesse de l'écoulement dépend principalement de la morphologie du relief. Dans une vallée large et droite, la canalisation de l'air froid peut engendrer une vitesse de la brise supérieure à 10 m/s, alors qu'un resserrement de la vallée ou la présence de coude ralentit l'écoulement de l'air (Foulonneau, 1967 ; Endlicher, 1980 ; Janex, 1990 ; Fallot, 1992 ; Carrega, 1994 ; Paul, 1997) (fig 1.4). A l'échelle d'un bassin versant, le phénomène est similaire mais la variabilité spatiale peut être plus importante. Etant donné la viscosité de l'air et les irrégularités de la surface, l'air glisse par pulsations ou par saccades à une vitesse de l'ordre de 1 à 3 m/s (Mahrt et Larsen, 1982). Le moindre obstacle à l'écoulement ralentit ou bloque les nappes d'air froid. Une cuvette, un replat ou une haie brise-vent peuvent engendrer à une échelle très fine une stagnation de l'air froid et un refroidissement intense (Geiger, 1980 ; Choissnel *et al.*, 1993). L'expérimentation réalisée par Geslin et Hilaire en 1956 est couramment utilisée pour illustrer l'effet de la topographie sur la répartition des températures minimales à une échelle fine. Les relevés actinothermiques démontrent que l'écart de température entre le sommet d'une butte et le bas d'un versant avec un dénivelé de 15m (cuvette) atteint 6°C. Ces dépressions, appelées « *trous à gelée* », sont des « micro bassin collecteurs d'air froid », comparables, à une échelle spatiale plus vaste, à une plaine remplie totalement d'air froid par une brise de vallée descendante (fig 1.1 et 1.5).

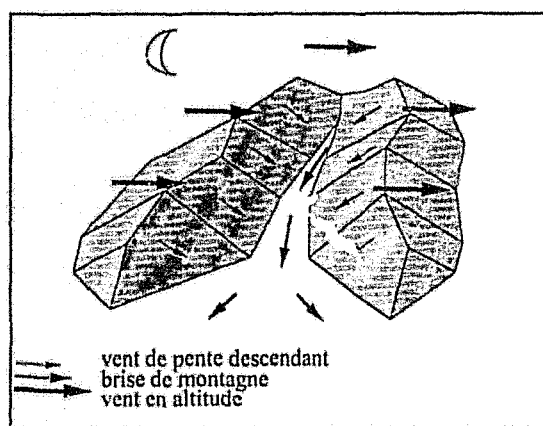


Fig 1.3 : Représentation schématique des brises nocturnes soufflant dans une vallée (d'après Fallot, 1992).

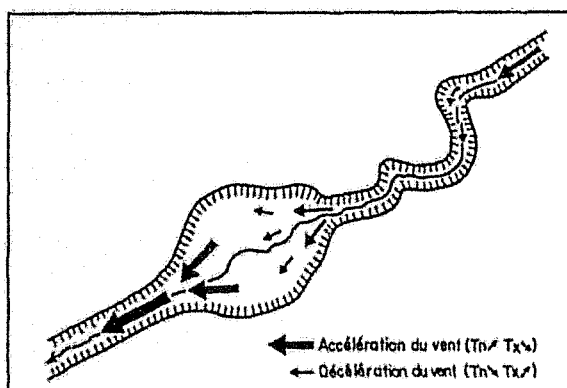


Fig 1.4 : Influence du tracé d'une vallée sur la vitesse du vent, et effet thermique induit (d'après Carrega, 1994).

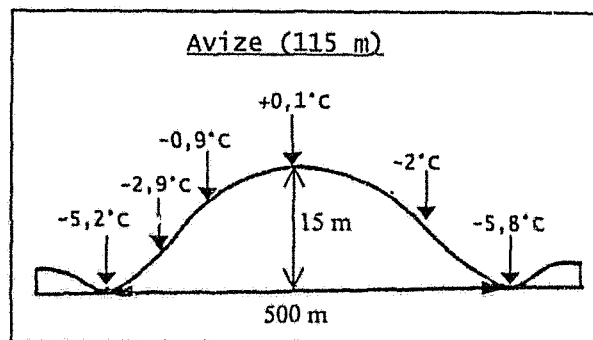


Fig 1.5 : Variation des températures minimales en fonction de la topographie (d'après Geslin et Hilaire, 1956).

#### ✓ Inversion thermique

L'accumulation d'air froid au niveau du sol induit une inversion thermique variant de quelques dizaines de centimètres à plusieurs centaines de mètres de haut. Par subsidence, les couches d'air sus-jacentes à la surface sont les plus froides. La température augmente en fonction de l'altitude jusqu'à un niveau appelé «plafond d'inversion», ensuite elle recommence à baisser avec l'altitude (environ  $-6^{\circ}\text{C}$  par 1000m). La limite du plafond d'inversion varie en fonction de l'épaisseur de la masse d'air froid. L'intensité de l'inversion - *amplitude thermique entre la surface du sol et le plafond* - est maximale lorsque le vent est nul et le ciel clair. L'écart de température entre 50cm et 10m au-dessus du sol peut dépasser  $5^{\circ}\text{C}$  (AVC, 1991). En cas de vent ou de nébulosité, la stratification verticale des températures s'homogénéise et l'inversion thermique s'amenuise. Dès le lever du soleil, l'inversion thermique se désagrège par la base. La surface du sol, plus conductrice que l'air, a tendance à se réchauffer plus rapidement sous l'action du rayonnement solaire (Fallot, 1992).

L'analyse des mécanismes du refroidissement nocturne par rayonnement au niveau de la couche limite met en évidence une importante variabilité spatio-temporelle des températures en fonction des interactions entre les conditions atmosphériques, la morphologie du relief et les caractéristiques de l'environnement (fig 1.1). Par exemple, dans le vignoble champenois, Beltrando *et al.* (1995, 1998) montrent que la présence d'un champ de blé dans un bassin collecteur accentue fortement la production d'air froid. En fin de nuit, un léger vent peut véhiculer la masse d'air froid vers les vignes plantées sur les coteaux adjacents. Ce phénomène, également observé par Cellier (1989), montre qu'une forme topographique (pente) généralement peu encline à une forte baisse de température peut subir un important refroidissement.

### 1.1.3 Les gelées de printemps

Les différents mécanismes émanant du refroidissement par rayonnement peuvent aboutir, lorsque la température descend en-dessous de 0°C, à des gelées. Le gel de *rayonnement* (ou *radiatif*) se produit au cours de situations atmosphériques calmes de type anticyclonique avec un ciel clair et une faible vitesse du vent ( $< 2\text{ m/s}$ ). Lorsque l'air est riche en humidité, il se transforme en givre et recouvre le sol et les végétaux, d'où le nom de « gelée blanche ». On distingue également deux autres types de gel : le *gel advectif* et le *gel d'évaporation*. Le premier est dû à l'arrivée d'une masse d'air froid différente de celle qui est en place. Les conditions atmosphériques qui le caractérise sont une vitesse du vent supérieure à 3 m/s, une humidité relative faible et des températures minimales très basses, notamment en hiver avec l'arrivée de masse d'air polaire (gelées noires). Contrairement au refroidissement radiatif où la grande variabilité spatiale des températures minimales est liée à la morphologie, à l'état et aux aspérités de la surface, la variabilité thermique en situation advective est faible. Le deuxième processus de refroidissement nocturne concerne le *gel d'évaporation*. La baisse de température se produit après la transformation d'eau en vapeur au niveau des végétaux. L'évaporation s'accompagne d'une consommation d'énergie. Plus l'humidité relative de l'air est faible, plus l'eau présente à la surface du sol ou sur la végétation tend à s'évaporer pour combler le déficit de saturation de l'air. Le gel d'évaporation est plus un facteur aggravant du refroidissement advectif et radiatif qu'un type de gel à part entière. Par exemple, après un après-midi frais avec de petites averses, si le ciel se dégage brusquement en début de soirée, le refroidissement de l'air et de la végétation est rapide puisqu'il résulte des effets cumulés des pertes d'énergie par rayonnement et de l'évaporation. Les plus fortes gelées sont souvent provoquées par la combinaison de ces trois phénomènes - *radiatif, advectif et évaporation* -, avec des conditions atmosphériques diurnes spécifiques. Généralement, la journée précédant le gel, il se produit un refroidissement de l'atmosphère (advection d'air froid ou faible apport solaire dû à la nébulosité). Puis la nuit, le ciel s'éclaircit favorisant le rayonnement nocturne (Ctifi, 1998). Ce type de situation est particulièrement fréquent dans le Sud Est de la France, où l'apport énergétique solaire déjà important au printemps, limite l'intensité du refroidissement par rayonnement. Une journée nuageuse ou pluvieuse peut engendrer un faible apport de chaleur solaire et accentuer la baisse de température en cas de nuit radiative. Mais, la majorité des gelées printanières dans cette région, en particulier dans le département des Bouches du Rhône (80 à 90% selon Bordreuil, 1975), sont consécutives à un arrêt nocturne des courants de nord à nord-ouest (mistral). Les gelées provoquées par un « arrêt de mistral » se déroulent en deux phases : tout d'abord une phase *advective* où l'apport d'une masse d'air provenant du nord refroidit l'atmosphère, puis une phase *radiative* où le ciel dégagé par le vent est favorable aux fortes pertes radiatives. Au moment où le vent de nord s'arrête, l'air froid et sec se cale au niveau du sol par subsidence. Ces conditions favorables à un refroidissement par évaporation sont accompagnées d'un fort rayonnement nocturne. Le cumul de ces divers facteurs se caractérise par une baisse très intense de la température dans les premières minutes après l'arrêt du vent (nous avons mesuré des variations de 5-6°C en une ½ heure dans la basse vallée de la Durance) et par la possibilité d'une forte gelée provoquant des dégâts sur les cultures sensibles (Bordreuil, 1975). Selon une étude statistique (données BHER Météo France et CIRAME) menée par S. d'Alessio (1996) sur les caractéristiques des gelées printanières dans la basse vallée de la Durance réalisée sur la période de 1987 à 1996,

il apparaît que les températures nocturnes les plus fraîches sont mesurées, après au minimum, deux jours de vent très violent, avec une fraction d'insolation supérieure à 80%.

Les conséquences agronomiques des gelées varient suivant le type de gel (radiatif, advectif ou arrêt de mistral). Les épisodes les plus catastrophiques concernant de vastes espaces sont souvent la conséquence d'épisodes advectifs. Dimacopoulos et Durand (1969) font référence aux gelées de février 1956 et du printemps 1957 provoquées par des advections d'air arctique et polaire. En 1956, la quasi totalité des oliviers de Provence ont gelé et en 1957, 2/3 de la production de pommes de l'ensemble de la France a été détruite. En 1974 et 1975, la majeure partie des cultures fruitières (80% des pêches et des abricots) du sud-est de la France a été détruite après des arrivées d'air froid provenant du nord (mistral) et de l'est de l'Europe (Bordreuil, 1975). Les dommages dus au gel de rayonnement revêtent un caractère local sans grandes conséquences au niveau national, mais très grave au niveau de l'exploitant. Les dégâts agronomiques après un épisode radiatif, sont très hétérogènes dans l'espace, ils dépendent de la topographie et de l'environnement mais également des caractéristiques du végétal.

#### 1.1.4 Les arbres fruitiers face au refroidissement nocturne

En situation de fort refroidissement nocturne, les organes végétaux réagissent de la même manière que le sol. Les pertes énergétiques, par rayonnement ou par évaporation, se traduisent par une baisse de la température du végétal. Le gel des arbres fruitiers est fonction de la température atteinte et de la capacité des végétaux à résister aux forts refroidissements. Celle-ci varie tout au long de l'année selon le cycle végétatif et les caractéristiques du végétal.

##### ✓ Mécanismes du gel dans le végétal

Un organe végétal exposé à des températures inférieures à 0°C se refroidit jusqu'à des températures proches de -2/-3°C. Les liquides circulant entre les cellules, jusqu'alors en surfusion, se congèlent et provoquent la remontée de la température vers -1°C. Mais, si la température extérieure continue de baisser, celle de l'organe chute à nouveau, ce qui peut aboutir, suivant l'intensité et la rapidité du refroidissement, à des blessures ou à la destruction du bourgeon floral (Foulonneau, 1964).

Le gel d'un organe végétal s'opère de l'extérieur vers l'intérieur. Il induit la formation de cristaux de glace dans la plante. Celle-ci se produit d'abord dans les espaces extracellulaires. La glace attire l'eau des cellules et provoque une déshydratation. Si le refroidissement est lent, le pompage de l'eau des cellules est localisée vers la partie extérieure du végétal et n'atteint pas les cellules internes. Les dégâts sont généralement superficiels et se manifestent par des décollements de l'épiderme. Dans ce cas là, la fleur réagit en formant du liège (photo 1). C'est ainsi qu'apparaissent définitivement les anneaux de liège sur les fruits (Macouin, 1991). Lorsque la pression de la glace a engendré le déchirement de l'épiderme, la plaie forme, en cicatrisant, un bourrelet liégeux causant une déformation du fruit. Si le refroidissement est rapide ou se prolonge, la formation de glace et la déshydratation des cellules atteignent l'intérieur du bourgeon, ce qui produit la rupture des membranes (Foulonneau 1964). Il s'agit de la cristallisation intracellulaire qui correspond à la mort de



l'organe végétal (fig 1.6). Le pistil et les ovaires apparaissent bruns et desséchés. Précisons qu'en hiver, les cellules sont petites et les espaces intercellulaires grands, l'eau peut sortir facilement tant que ces derniers ne sont pas pleins de glace. La cristallisation intracellulaire intervient plus facilement au printemps, où les cellules développées et riches en eau sont rapidement remplies de glace (Bouchet, 1965). Ceci explique, en partie, pourquoi le risque de gel des organes végétaux est accentué lorsqu'ils ont été préalablement mouillés (ex : refroidissement radiatif faisant suite à une journée pluvieuse).

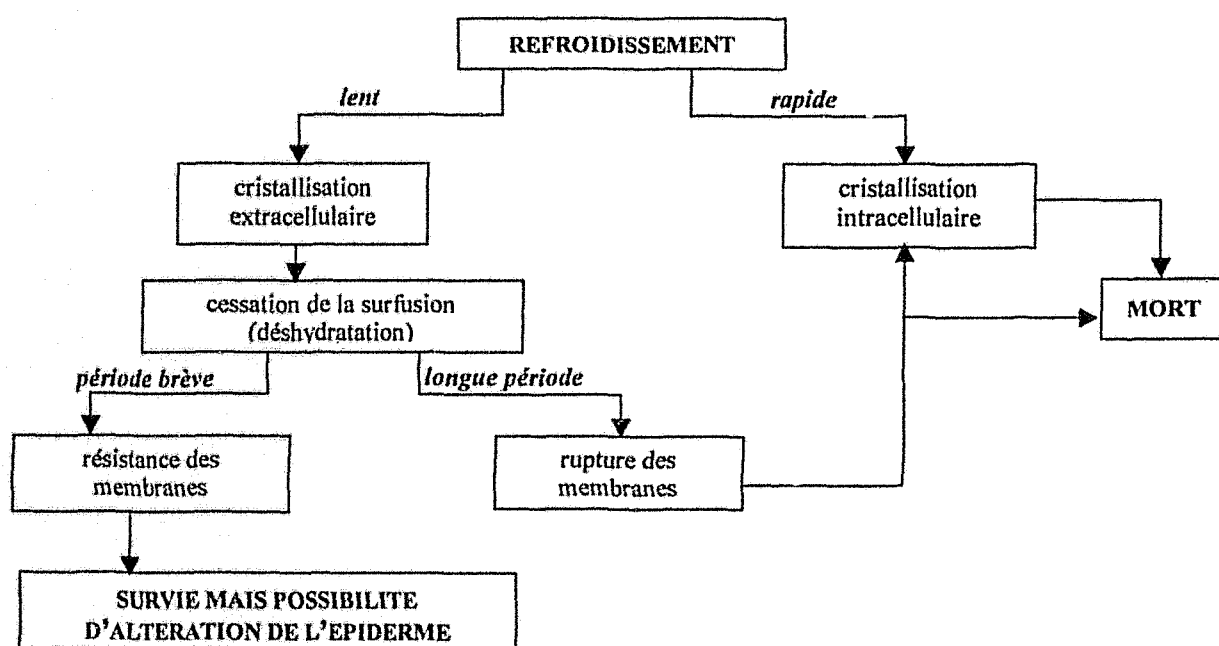


Fig 1.6 : Mécanisme du gel dans le végétal (adapté du schéma de Girard, 1994).



a : jeune poire déformée (William's).



b : anneau de gel sur jeune poire (Harrow Sweet).



c : anneau de gel sur poire à maturité (William's).

Photo 1 : Défauts qualitatifs sur poiriers provoqués par le gel (cliché H. Quéno).

✓ Une résistance au gel variable suivant le niveau de croissance

On distingue deux périodes spécifiques durant lesquelles le végétal réagit différemment face aux températures négatives extrêmes : le *repos de l'arbre* (dormance) et la *période de végétation* (fig 1.7).

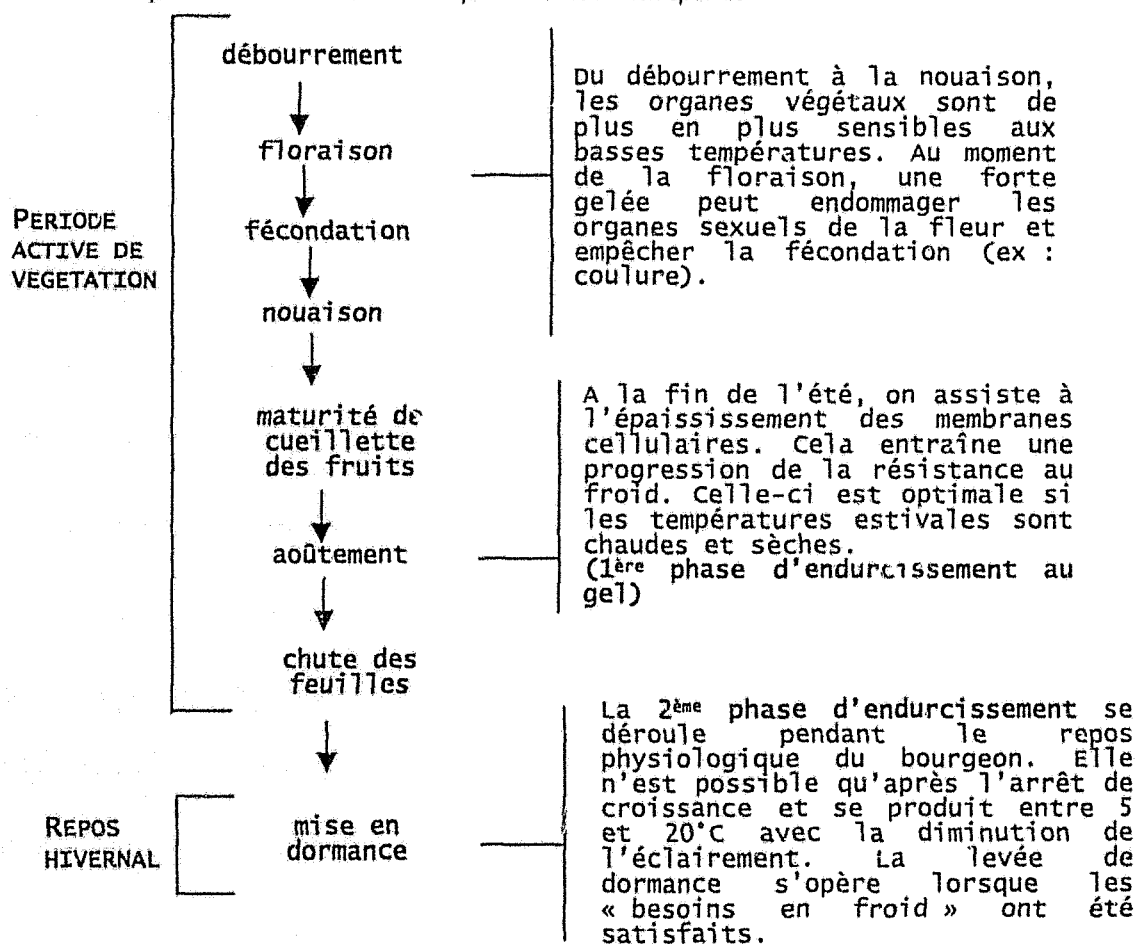


Fig 1.7 : Cycle annuel végétatif des arbres fruitiers (adapté de Louis, 1988).

La dormance se produit en hiver lorsque les températures sont les plus basses, pourtant les dégâts dus aux gelées hivernales sont relativement peu fréquents. Durant cette période, le bourgeon est en « repos physiologique » et peut résister à des températures proches de -15°C (par exemple, de -12 à -15°C pour l'ensemble des pêchers, abricotiers et pruniers). A la fin de l'hiver, après la levée de dormance, la reprise de la végétation se caractérise par le gonflement et l'ouverture des bourgeons. La capacité de résistance au gel diminue avec l'évolution physiologique du bourgeon. « Les organes végétaux sont d'autant plus sensibles qu'ils sont développés et c'est généralement à la nouaison (formation du fruit) que la sensibilité est la plus grande » (Durand, 1965). Au moment du gonflement, les écailles recouvrant le bourgeon le protège encore efficacement. Suivant les espèces et les variétés fruitières, le bourgeon peut résister à des températures inférieures à -6/-8°C. La sensibilité au froid augmente fortement dès que le bourgeon éclate et que les boutons floraux apparaissent. Les organes sexuels (étamines, styles et ovaires), composés de jeunes tissus sont très fragiles. Plus la fleur se développe, plus les organes sexuels sont exposés au froid et plus le seuil de résistance baisse. D'ailleurs, les enveloppes florales ne semblent pas suffisantes pour protéger ces organes, puisqu'il n'est pas rare d'observer des styles et des ovaires « grillés » par le gel dans des fleurs encore complètement fermées (fig 1.8) (Gautier 1987, 1988 ; Louis, 1988 ; Bonhomme et Rageau, 1989 ; Ctifl, 1998). Au moment de la nouaison, après la chute des pétales, le seuil critique se situe entre -2 et -1°C.

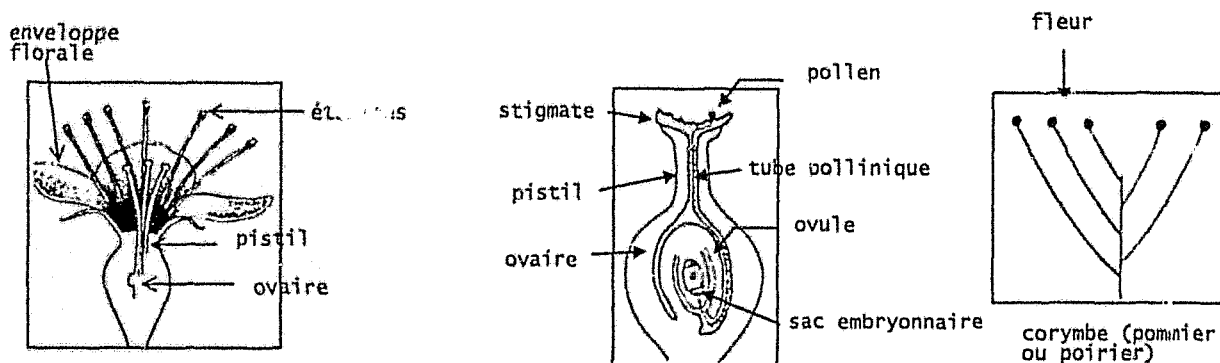


Fig 1.8 : Schéma des organes floraux du pommier et du poirier (d'après Louis, 1988).

Au printemps, les organes les plus récemment développés sont les plus sensibles parce qu'ils sont les moins lignifiés et les plus hydratés : bourgeons débourrés, feuilles, fleurs, petits fruits. La variabilité de développement des espèces et des variétés fruitières explique, lors d'un épisode gélif, l'hétérogénéité des dégâts.

✓ Une sensibilité différente suivant l'espèce et la variété du végétal

Le gel constitue un facteur limitant à la répartition géographique des végétaux. Les espèces ou variétés fruitières dont la physiologie n'est pas adaptée aux basses températures ne sont pas représentées dans les régions où les périodes hivernales et printanières sont rigoureuses. A l'échelle d'un même bassin agricole, les seuils de résistance au gel sont également variables. Ils dépendent toujours des caractéristiques physiologiques et de la vigueur de la plante (âge de l'arbre, niveau de réserve, production de l'année précédente, ...) mais surtout du niveau de croissance (stade phénologique) au moment du gel. La levée de dormance et le début du débourrement des arbres fruitiers varient suivant les espèces et les variétés. Cependant, les espèces présentes en Provence peuvent être classés selon un ordre croissant, des plus précoces aux plus tardives : abricotier, pêcher, prunier, cerisier, poirier et pommier. Au sein d'une même espèce, apparaît une importante variabilité de la reprise de croissance. Par exemple, dans le sud-est de la France, la floraison de la poire Harrow Sweet<sup>cov</sup> se produit en moyenne vers le 20 mars alors que la poire William's<sup>cov</sup> fleurit entre le 1<sup>er</sup> et 5 avril. Début avril, l'abricot Orangered Bhart (floraison début mars) est déjà en phase de nouaison. Dans ces conditions, entre le 1<sup>er</sup> et 5 avril, le seuil critique de température sera proche de -2°C pour la variété William's<sup>cov</sup>, de -1.5°C pour la Harrow Sweet<sup>cov</sup> et de -0.5°C pour l'abricot. Au moment de la floraison de l'abricot, l'écart du seuil de température critique est encore plus important (-6/-5°C pour les poires et -3/-2 pour l'abricot) (Ctifl, 1998). Par conséquent, une espèce ou une variété précoce est beaucoup plus exposée au risque gélif qu'un arbre fruitier dont la reprise de croissance est tardive puisque la probabilité de températures négatives extrême est plus importante à la fin de l'hiver qu'au printemps.

De nombreuses expérimentations (simulation de refroidissement en laboratoire ou contrôle de dégâts) ont été effectuées sur la gélivité des organes fruitiers afin de fixer des seuils de températures à risque suivant le niveau de croissance des végétaux (Fleckinger, 1948 ; Baggiolini, 1952 ; Durand, 1964 et 1965 ; Perraudin, 1965 ; Monnet, 1982 ; Itier *et al.*, 1989 ; Jones, 1992). Les divers tests montrent qu'il existe de grosses différences de sensibilité entre chaque espèce mais également entre chaque variété, d'où la difficulté d'élaborer des

fiches de seuils critiques en fonction des stades phénologiques. Dans une étude sur la résistance au gel de plusieurs variétés de cerisiers en Hongrie, Z. Szabo *et al.* (1996) observent que la température critique entre deux variétés au même stade phénologique peut varier de 2 à 3°C. Des analyses similaires sont faites sur différentes variétés d'abricots, de pêches, de pommes et de poires (Ashworth *et al.*, 1985 ; Rayo-Diaz *et al.*, 1996 ; Cannell, 1997 ; Coletto-Martínez, 1998). Même s'ils sont à prendre à titre indicatif, les seuils de sensibilité au gel apportent des indications intéressantes pour l'arboriculteur qui désire protéger ses cultures avec un système « *antigel* ». Depuis quelques années, les températures critiques sont affinées par des tests supplémentaires sur certaines variétés mais également par l'estimation des températures lorsque 10% et 90% des fruits sont susceptibles d'être abîmés (fig 1.9 a et b) (Ballard, 1997).

|                |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |                                                                                       |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| a)             |    |    |    |    |    |
|                | bourgeon d'hiver                                                                    | début de gonflement                                                                 | gonflement apparent                                                                 | chute des derniers pétales                                                            | nouaison                                                                              |
| seuil critique |                                                                                     | -7°C                                                                                | -4°C                                                                                | -4°C                                                                                  | -2,8°C                                                                                |
| 10% dégâts     |                                                                                     | -9,4°C                                                                              | -7,7°C                                                                              | -5°C                                                                                  | -3,5°C                                                                                |
| 90% dégâts     |                                                                                     | -16,7°C                                                                             | -12,2°C                                                                             | -9,4°C                                                                                | -6,1°C                                                                                |
|                |   |   |   |   |   |
|                | Couleur des pétales visibles                                                        | première fleur                                                                      | pleine floraison                                                                    | chute des derniers pétales                                                            | nouaison                                                                              |
| seuil critique | -2,2°C                                                                              | -2°C                                                                                | -1,8°C                                                                              | -1,6°C                                                                                | -1,6°C                                                                                |
| 10% dégâts     | -2,2°C                                                                              | -2,2°C                                                                              | -2,2°C                                                                              | -2,2°C                                                                                | -2,2°C                                                                                |
| 90% dégâts     | -4,4°C                                                                              | -3,9°C                                                                              | -3,9°C                                                                              | -3,9°C                                                                                | -3,9°C                                                                                |
| b)             |  |  |  |  |  |
|                | bourgeon d'hiver                                                                    | début de gonflement                                                                 | gonflement apparent                                                                 | chute des derniers pétales                                                            | nouaison                                                                              |
| seuil critique |                                                                                     | -7°C                                                                                | -6°C                                                                                |                                                                                       | -4,5°C                                                                                |
| 10% dégâts     |                                                                                     | -9,4°C                                                                              | -6,7°C                                                                              |                                                                                       | -4,4°C                                                                                |
| 90% dégâts     |                                                                                     | -17,6°C                                                                             | -14,4°C                                                                             |                                                                                       | -9,4°C                                                                                |
|                |  |  |  |  |  |
|                | pétales visibles                                                                    | première fleur                                                                      | pleine floraison                                                                    | chute des pétales                                                                     | nouaison                                                                              |
| seuil critique | -2,8°C                                                                              | -2°C                                                                                | -1,6°C                                                                              | -1,5°C                                                                                | -1°C                                                                                  |
| 10% dégâts     | -3,3°C                                                                              | -2,8°C                                                                              | -2,2°C                                                                              | -2,2°C                                                                                |                                                                                       |
| 90% dégâts     | -5,6°C                                                                              | -5°C                                                                                | -4,4°C                                                                              | -4,4°C                                                                                |                                                                                       |

Fig 1.9 : Températures critiques du pommier (a) et du poirier (b) en fonction des stades phénologiques. (d'après Ctifl, 1998)

La forte variabilité du risque agronomique liée au gel printanier est conditionnée par l'influence du milieu (relief, sol, occupation du sol) sur les variables météorologiques (température, humidité relative, rayonnement solaire, ...) ainsi qu'à la capacité des végétaux à résister à ces phénomènes météorologiques. L'écoulement du vent n'est pas influencé localement par d'autres variables météorologiques, son écoulement dépend essentiellement des aspérités de la surface (ex : relief, haies brise-vent, obstacles artificiels, ...).

## 1.2 Variabilité spatiale du vent (mistral)

L'origine du vent *météorologique* n'est pas lié, comme la brise thermique, aux caractéristiques de la surface terrestre mais il peut être considérablement modifié par l'influence locale du relief. D'après G. Viers (1990), « *l'effet de canalisation du vent agit sur la direction en privilégiant l'axe des vallées et en accroissant la vitesse. Ce qu'on peut appeler l'effet de mistral, qui donne au vent de gradient des accélérations considérables, est lié à la succession de rétrécissements et d'élargissements dans une vallée (ex : Rhône); les vitesses maximales s'établissent un peu à l'aval des goullets (effet Venturi), comme dans les tuyères des souffleries* ». Le mistral est le parfait exemple d'un vent météorologique dont l'écoulement est modifié par le relief.

### 1.2.1 Le mistral

Le mistral est un vent de secteur nord souvent violent soufflant par rafales qui s'établit sur le sud-est de la France lorsqu'une dorsale anticyclonique s'étend jusqu'au Massif Central et qu'une dépression est localisée sur le Golfe de Gênes (fig 1.10). « *La spécificité du mistral vient de son passage dans la Vallée du Rhône, longue de 300 km, étroite de quelques kilomètres, entre le Massif Central et les Alpes* » (Aupetit, 1991). La direction du mistral est de nord entre Valence et Avignon et s'oriente vers l'ouest au niveau des Alpes du Sud. Dans certains cas, au niveau de la Méditerranée, le vent s'enroule dans la dépression et pénètre sur la Corse et la Côte d'Azur. En règle générale, durant son passage dans la Vallée du Rhône, il est orienté par la disposition du relief. La canalisation du vent provoque un vent puissant atteignant fréquemment 100 km/h. Les graphiques représentant à la fois le pourcentage des directions et celui des vitesses du vent, relevées dans les normes climatiques de 1961 à 1990, montrent que les vents les plus forts dans la vallée du Rhône correspondent au mistral (Météo France, 1996). Les roses des vent des stations météorologiques de Salon de Provence, de Marignane et de Istres montrent que les vents supérieurs à 8 m/s sont de directions nord à nord-nord-ouest (fig 1.11).

D'après les documents du Centre des Glénans (1985), le déclenchement du mistral est lié à quatre conditions : *présence de la dorsale anticyclonique ; présence de la zone dépressionnaire ; présence d'air chaud dans la zone dépressionnaire ; alimentation d'air froid* (fig 1.10). Le mistral connaît des variantes suivant la représentativité et l'intensité des conditions de déclenchement. Si seulement les deux premières sont remplies, un mistral local s'établit. Il est relativement fréquent, modéré et se limite à la Vallée du Rhône. Le mistral blanc et le mistral noir répondent généralement à tous les facteurs. Le premier se caractérise

par un air sec d'origine continentale et un ciel bleu alors que le second se produit lorsque l'air froid d'origine polaire maritime est humide (ciel nuageux).

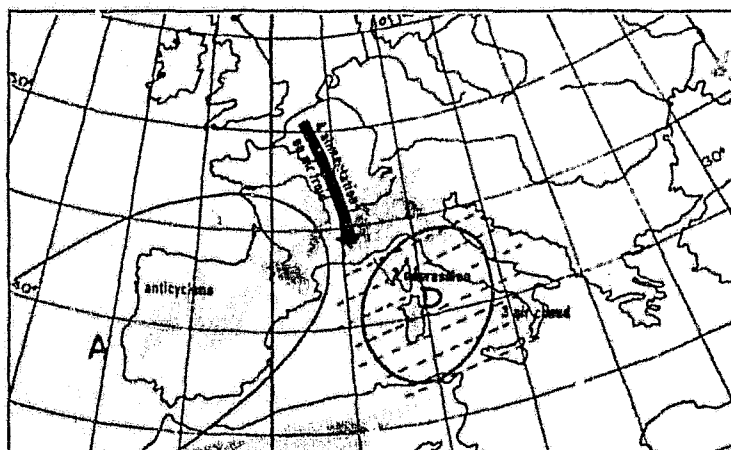


Fig 1.10 : Les quatre conditions pour que le mistral se lève (d'après Les Glénans, 1985).

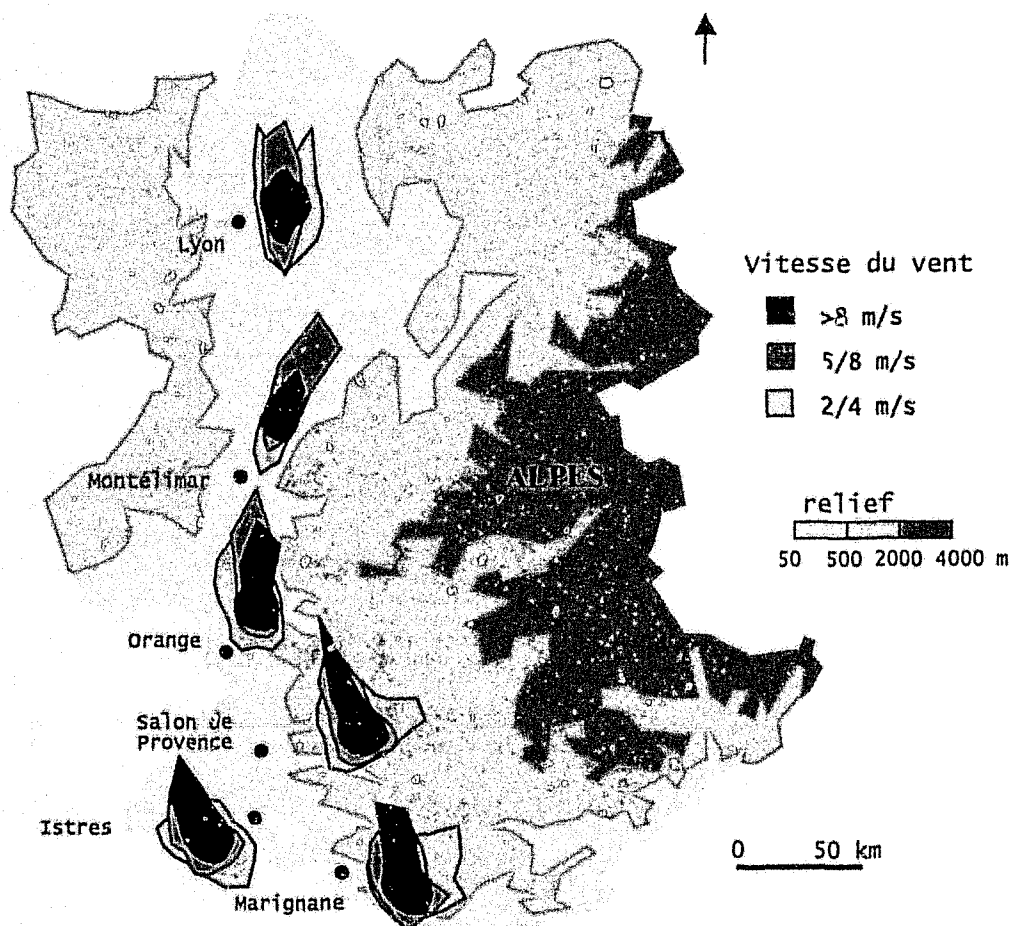


Fig 1.11 : Fréquence des directions et vitesses du vent dans la vallée du Rhône (calculées à partir des normales climatiques 1961-1990 de Météo France).

### 1.2.2 Les arbres fruitiers face aux effets mécaniques du vent

Le vent, s'il est faible ou modéré, n'est pas considéré comme dangereux pour les végétaux. En assurant le brassage des différents niveaux de la basse troposphère, le vent renouvelle l'air au-dessus des cultures, ce qui réduit l'amplitude des températures au voisinage du sol et diminue les risques liés au refroidissement nocturne (Soltner, 1994). Mais un vent violent peut être néfaste pour les cultures parce qu'il modifie les conditions de croissance des végétaux et influence qualitativement et quantitativement la production des arbres fruitiers. Ainsi, la force du vent peut faire tomber les fruits des branches, ceux-ci en entraînant d'autres dans leur chute. Si les fruits jeunes ne chutent pas forcément, ils peuvent être abîmés et ternir la qualité de la production. Les frottements du fruit contre les feuilles provoquent du boisage qui, à maturité, forme des griffures sur l'ensemble du fruit (photo 2) (Simon, 1988). Les coups contre les rameaux ou contre le palissage engendrent également des blessures qui aboutissent généralement au pourrissement du fruit.

Au niveau des feuilles, un vent supérieur à 8 m/s peut réduire la surface foliaire de certaines variétés sensibles (ex : le pommier Early Gold<sup>cov</sup>). Cela se traduit par des parties du limbe arrachés (Guyot, 1983). De plus, les frottements entre les feuilles provoquent des déchirures. Cette diminution de la surface foliaire peut entraîner une réduction de la photosynthèse. Un vent violent et sec perturbe également la pollinisation (activité des abeilles) et dessèche les organes floraux (pistil) : les grains de pollens sont emportés lorsque la vitesse du vent dépasse 10-12 m/s. En créant des conditions défavorables à la pollinisation, le vent s'avère néfaste à la fructification (Castaner, 1984 ; Durand, 1988). A un autre niveau, un vent supérieur à 15 m/s peut casser les branches alourdies par le poids des fruits et dans un cas extrême, il peut déraciner les arbres (si le sol est gorgé d'eau) et arracher les branches même dépourvues de fruits (Guyot, 1983).



Photo 2 : Evolution du boisage provoqué par le frottement des feuilles sur une pomme Granny Smith<sup>cov</sup> (d'après Ctifl, 1998).

Les expérimentations (météorologiques et agronomiques) et la modélisation étant appliquées à un site particulier, - *la basse vallée de la Durance* -, nous retiendrons que les obstacles aux écoulements d'air froid nocturnes et au mistral sont nombreux : reliefs, haies brise-vent, remblai ferroviaire,... Par exemple, en situation de gel radiatif (nuit clair, anticyclonique avec vent faible), l'air se déplace, théoriquement, en suivant le relief du Petit Luberon ou, à une échelle plus fine, des collines de la Cabre et du Pas des Lanciers. Dans les secteurs plats ou en amont d'obstacles (naturels ou artificiels), la vitesse d'écoulement diminue, l'air stagne et le refroidissement est plus fort. Cela est le cas pour les secteurs subhorizontaux de la vallée de la Durance et certaines portions de terrain situées en amont de haies brise-vent, en position de blocage d'air froid. Ces hypothèses sont faites en appliquant nos connaissances à l'échelle d'un versant. A l'échelle d'une vallée de plusieurs kilomètres de long, il n'est pas exclu que l'ensemble des écoulements de versant forme une brise de vallée descendante qui limite, par brassage de l'air, le refroidissement dans les secteurs plats de la vallée de la Durance (fig I.2a et b).

Ainsi, la variabilité locale du gel et du mistral est tributaire de facteurs d'échelles spatiales différentes et emboîtées. Par conséquent, pour évaluer l'impact climatique du remblai ferroviaire, un protocole d'étude spécifique a été élaboré en prenant en compte l'ensemble des éléments du milieu agissant sur les variables météorologiques en fonction de l'imbrication des échelles spatiales.



## 2 ECHELLES D'ESPACE IMBRIQUEES : HIERARCHISATION DES ELEMENTS PERTURBATEURS DU MICROCLIMAT

---

L'hétérogénéité de la surface engendre une forte variabilité météorologique et climatique locale au niveau de la couche limite de l'atmosphère. La hiérarchisation des éléments perturbateurs suivant l'emboîtement des échelles spatiales est essentiel pour définir le protocole de mesures météorologiques et déterminer les terrains expérimentaux. Comme le précise E. Choissnel (1986), « *il a été démontré que le raisonnement climatique doit prendre en compte la notion d'échelles d'espace imbriquées et respecter un ordre chronologique : d'abord décrire le climat régional (distance caractéristique de 100km en plaine et de 1km en montagne), puis le topoclimat (10 km à 1 km) et enfin le microclimat (100 m à moins d'un mètre)* ». Même, si nous n'utilisons pas les mêmes niveaux que ceux présentés par Choissnel, cette étape de délimitation des niveaux d'échelles est nécessaire pour déterminer les postes de mesures qui permettront d'étudier l'action de chaque élément perturbateur, notamment le remblai. Les raisons de cette approche sont liées au fonctionnement de l'atmosphère. Sachant qu'une même masse d'air, générant un même type de temps, peut concerner un territoire étendu, il est certain que sur une entité plus petite, des caractères communs sont présents. Plus le niveau d'observation s'affine, plus le nombre d'éléments influant sur les paramètres météorologiques est grand et « *schématiquement, la compréhension augmente au fur et à mesure que l'espace se réduit ... les notions d'échelles spatiale et temporelle sont donc essentielles pour sélectionner les informations et pour choisir l'implantation des instruments météorologiques* » (Beltrando et Chemery, 1995).

### 2.1 Application de méthodes de classification des échelles locales à la basse vallée de la Durance

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur la question de la hiérarchisation des phénomènes atmosphériques suivant un système d'espaces imbriqués (Yoshino, 1975 ; Choissnel, 1986 ; Beltrando *et al*, 1998). Les échelles spatiales fines sont définies en fonction des composants du milieu qui perturbent le climat. En général, les éléments exerçant une action sur une distance supérieure à quelques dizaines de kilomètres sont d'origine topographique et caractérisent le *climat régional*. E. Choissnel (1986) considère que « *la régression d'échelle s'explique, au niveau de la circulation globale de l'atmosphère par une interaction entre celle-ci et le relief* ». Quand on passe au niveau inférieur, c'est-à-dire sur une distance variant du kilomètre en montagne à la dizaine de kilomètres en plaine, les unités géographiques déterminant les modifications climatiques sont d'origines diverses : topographique (ex : versant d'une montagne), phytologique (ex : forêt), hydrographique (ex : lac) ou anthropique (ex : agglomération urbaine). Ce niveau, appelé *climat local ou topoclimatique*, est toujours lié au *climat régional* auquel il appartient mais avec des modifications caractérisées généralement par des échanges énergétiques locaux (ex : brises). A une échelle encore plus fine, le *microclimat* varie de quelques dizaines de mètres à

quelques centimètres. Le *microclimat* est le résultat des diverses modifications climatiques apparues aux échelles supérieures auxquelles s'ajoutent des perturbations supplémentaires liées à des éléments tels qu'une haie brise-vent, un talus ou un bâtiment.

L'application de cette méthode de régression des échelles à la basse vallée de la Durance pour le mistral donne trois systèmes imbriqués. A l'échelle du *climat régional*, on met en évidence les caractéristiques du mistral, qui est canalisé par la vallée du Rhône puis par la basse vallée de la Durance. L'effet Venturi provoqué par le resserrement de la vallée entre les Alpilles et le Petit Luberon est perçu à une échelle plus fine -*locale* ou *topoclimatique*- et les variations climatiques décelables sur une parcelle protégée par une haie brise-vent sont de l'ordre du *microclimat*. Le vent, canalisé par la vallée du Rhône, au nord d'Avignon, subit une nouvelle accélération provoquée par le « resserrement » entre les deux massifs des Alpilles et du Petit Luberon. Les parcelles immédiatement en aval de cet effet Venturi se situent dans des zones où les rafales sont plus fortes (Quénol, 1994).

L'inconvénient de ce type de hiérarchisation est qu'il établit des classes suivant des ordres de grandeur fixes. Du fait des innombrables éléments perturbateurs sévissant à diverses échelles, le milieu de la basse vallée de la Durance peut être considéré comme complexe et plusieurs facteurs sont compris dans une même classe. La classification des échelles en trois classes, - *régionale, locale et micro-climatique* - paraît incomplète et la définition d'autres niveaux, notamment entre le *climat local* et le *microclimat*, semble nécessaire.

Le procédé de classification des échelles suivant chaque élément perturbateur du milieu tire son origine d'une méthode qui définit les échelles locales à partir des facteurs topographiques et phytologiques (Chabin, 1996). Le raisonnement consiste à faire du phénomène, qui crée la modification météorologique, une classe spécifique. Les échelles du climat local déterminées de cette manière s'intègrent dans la hiérarchie suivante : le *macro-local*, essentiellement défini par un facteur topographique, correspond au climat local (ou topoclimat) vu précédemment; le *meso-local* correspond au microclimat; enfin, un niveau supplémentaire, le *méso-local*, permet de prendre en compte d'autres effets perturbateurs (micro-relief, ...) et apparaît comme un intermédiaire entre le *macro* et le *micro-local* (ou entre le *climat local* et le *micro-climatique*) (fig 1.12).

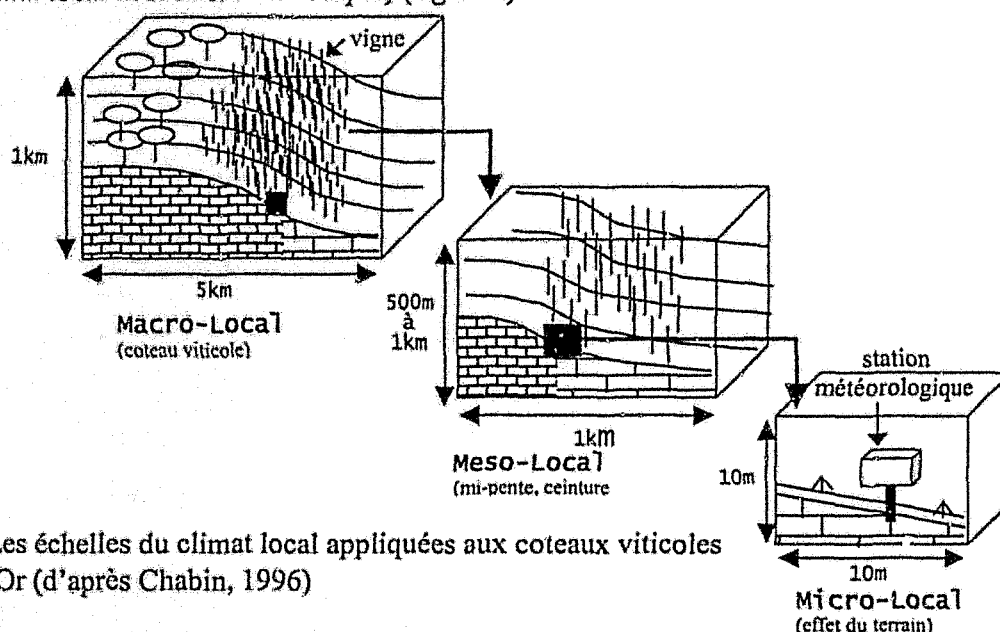


Fig 1.12: Les échelles du climat local appliquées aux coteaux viticoles en Côte d'Or (d'après Chabin, 1996)

Dans le cadre de cette étude, ce principe de « régression d'échelles » - *classification en fonction des éléments topographiques et phytologiques modifiant le climat* - est retenu mais quelques modifications sont apportées. En effet, l'élément perturbateur principal que nous voulons étudier est le remblai de la LGV, il est donc nécessaire d'étendre cette méthode en y incluant le facteur anthropique. Chaque classe est définie en fonction de chaque élément du milieu ayant une influence sur les variables météorologiques abordées. Or, les modifications provoquées par le milieu varient selon les variables météorologiques. C'est pourquoi, les sites de mesures déterminés en fonction de l'imbrication des échelles sont différents pour l'étude du gel printanier et du mistral.

## 2.2 La gelée de printemps : une forte variabilité spatiale

Au cours de situations gélives, les températures les plus basses sont généralement situées dans les dépressions (cuvettes) ou en amont d'obstacles aux écoulements gravitaires (ex : talus, haies ...). Mais après avoir observé plusieurs cas de gel printanier, on constate que la répartition des secteurs agricoles endommagés n'est pas toujours identique, même si certaines parcelles agricoles sont régulièrement concernées. Pour comprendre et localiser les secteurs gélifs, tous les éléments du milieu doivent être pris en compte suivant la méthode des échelles imbriquées et selon les divers types de gel (radiatif, advectif, advectif/radiatif). D'une manière générale, pour les situations advectives, la variabilité spatiale des températures minimales est faible, alors que pour les situations de type radiatif, l'état (teneur en eau du sol, présence d'une couverture herbacée, ...), la morphologie (cuvette, replat, ...) et les aspérités de la surface (haies brise-vent, talus, ...) sont à l'origine d'une grande variabilité spatiale des températures minimales.

### 2.2.1 Application de la classification : prise en compte du milieu et des conditions atmosphériques

Le fondement même de la technique de hiérarchisation de J.P. Chabin (1996) est employé ici. En effet, cette méthode consiste à répertorier, suivant un ordre décroissant d'influence, les éléments topographiques, phytologiques et anthropiques qui agissent sur la formation et la répartition des basses températures en période gélive. Prenons l'exemple du comportement de l'air froid en situation radiative, de l'échelle la plus vaste à la plus fine. Tout d'abord, l'élément perturbateur principal est le relief : *« les couches d'air refroidi au contact du déficit radiatif infrarouge du sol deviennent stable et s'écoulent lentement par gravité le long des pentes en direction des dépressions favorables à la stagnation de l'air »* (Paul, 1997). La concentration de l'air froid est renforcée par la présence d'obstacles d'échelles plus fines et de natures diverses comme la succession de haies brise-vent ou le remblai ferroviaire. Puis, sur la parcelle agricole, les caractéristiques du substrat (enherbé, nu, ...) et des cultures fruitières (exposition des bourgeons, ...) accentuent ou limitent la variabilité spatiale du gel (fig 1.13). Par conséquent, on peut admettre que le gel d'un bourgeon dépend de la combinaison d'une multitude de paramètres qui interagissent à des échelles différentes. La délimitation de ces échelles d'étude doit permettre de mettre en place un protocole de mesures

visant à comprendre l'action de ces divers facteurs sur le comportement de l'air froid suivant la nature du gel.

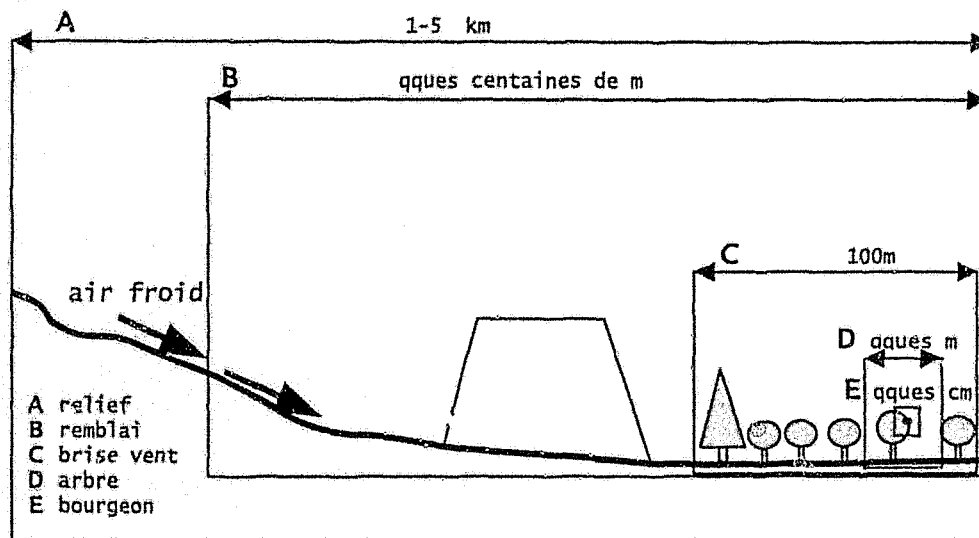


Fig 1.13 : Classification des échelles en situation de gel radiatif

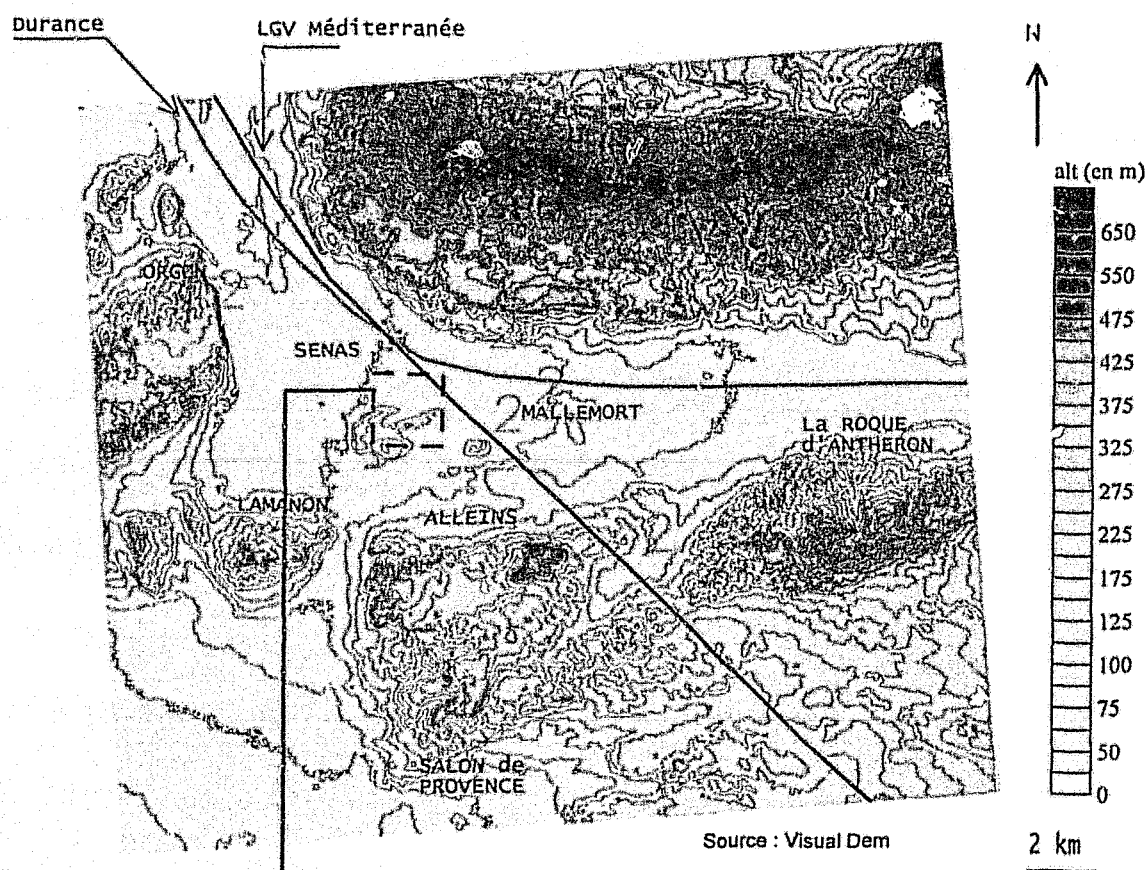
### 2.2.2 Délimitation des sites de mesures en fonction des niveaux d'échelle

D'après cette technique de délimitation d'échelles, nous avons déterminé trois niveaux principaux :

- *l'échelle locale ou topoclimatique (ordre de grandeur 10-20 km)* : l'objectif est de définir les écoulements nocturnes présents dans ce secteur de la basse vallée de la Durance. La caractérisation des brises thermiques selon leur origine permet de procéder à un premier découpage du site en fonction du relief (zone en pente ou en replat) et de la nature des écoulements d'air (caractéristiques thermiques et hygrométriques). Cette classe comprend l'ensemble de la vallée et des massifs « montagneux » adjacents (Petit Luberon, Alpilles) ;

- *l'échelle mésolocale ou du bassin versant (1-2 km)* : connaissant le comportement des masses d'air à une échelle plus vaste, nous avons choisi un secteur comprenant des parcelles à risque gélif (arbres fruitiers) de part et d'autre du remblai LGV. Le travail a ici pour but d'évaluer l'influence de l'obstacle SNCF sur la répartition des basses températures. Le terrain expérimental couvre environ 4 km<sup>2</sup> entre Mallemort et Senas. Au sud, on distingue les collines de la Cabre et du Pas des Lanciers ; plus au nord, dans une large bande s'étendant en diagonale du nord-ouest au sud-est, apparaît la nouvelle LGV qui traverse les exploitations agricoles. La hauteur des infrastructures est d'environ 15 m sur la quasi-totalité du secteur. Toutefois, celle-ci n'atteint que 5 m au nord-ouest et sud-est du terrain retenu (fig 1.14).

- *l'échelle micro-climatique (parcelle)* : les dégâts dus au gel sur une parcelle ne sont jamais répartis de façon homogène. Dans cette région, où l'agriculture dépend fortement du microclimat engendré par l'aménagement de brise-vent, nous avons mis en place, à cette échelle, une étude spécifique pour comprendre leur action sur les divers paramètres météorologiques intervenant au cours de nuits gélives (fig 1.14).



a) échelle topoclimatique (10-20 km)

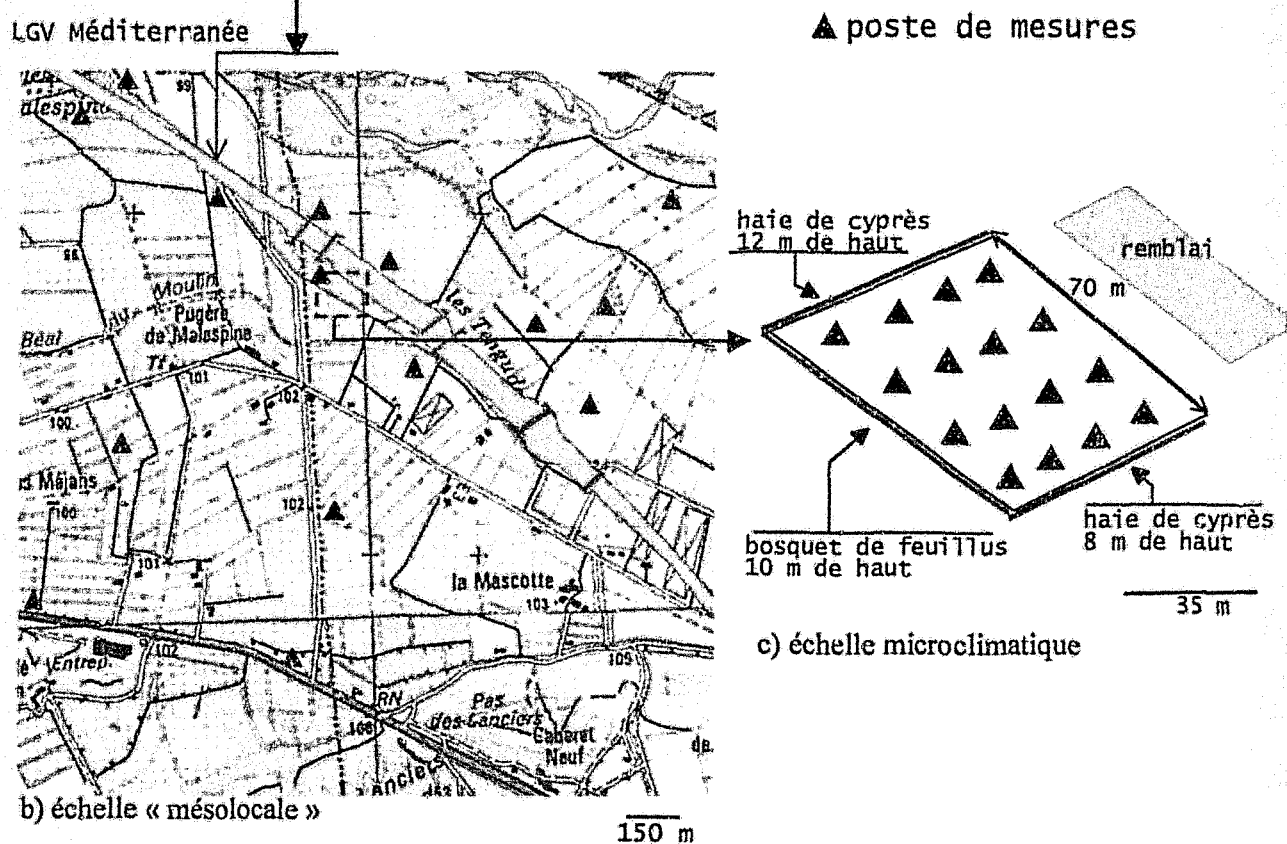


Fig 1.14 : Terrains expérimentaux et postes de mesures définis suivant l'emboîtement des échelles spatiales pour déterminer l'influence de la LGV sur le gel printanier.

## 2.3 Le mistral : un vent influencé en surface par les aspérités du substrat

La même méthode de régression des échelles spatiales est appliquée au mistral. L'écoulement du mistral dépend de la morphologie du relief et des caractéristiques de l'environnement (haies brise-vent, bâtiments, talus, ...), mais il n'est pas tributaire de plusieurs variables météorologiques, comme cela est le cas pour le refroidissement nocturne printanier.

### 2.3.1 Application de la classification : prise en compte du milieu

En appliquant la méthode de Choissel (1986), nous avons déterminé trois classes : le *climat régional*, correspondant à la canalisation du mistral dans la vallée du Rhône ; le *climat local* déterminant l'effet Venturi généré, dans la basse vallée de la Durance, par les massifs du Petit Luberon et des Alpilles ; puis le *microclimat* provoqué par les haies brise-vent (cf §2.1). En hiérarchisant la régression d'échelle en fonction des éléments du milieu perturbant l'écoulement du mistral, nous avons défini deux classes supplémentaires entre le *climat local* et le *microclimat* :

- la première, que nous nommerons « *climat mésolocal* » est déterminée par le réseau formé par la succession de haies brise-vent qui traduit une "rugosité régionale" influant à une échelle plus vaste que le microclimat. « Ainsi l'impact des brise-vent doit être considéré à deux échelles différentes, distinction qui permet de répartir les modifications climatiques observées entre : les effets locaux d'une part, qui sont directement reliés à la taille des parcelles, et l'effet régional, qui englobe l'étendue de l'aménagement » (Damagnez, 1976) (fig 1.15). La rugosité du sol formée par la succession des haies réduit la vitesse du vent. Un brise-vent situé à l'intérieur d'un réseau de protection combinerait donc un effet micro-climatique qui se manifeste sur une faible distance (à cause de la détente de l'air en aval) et l'effet de l'aménagement de haies qui se traduit par une réduction générale du vent ;

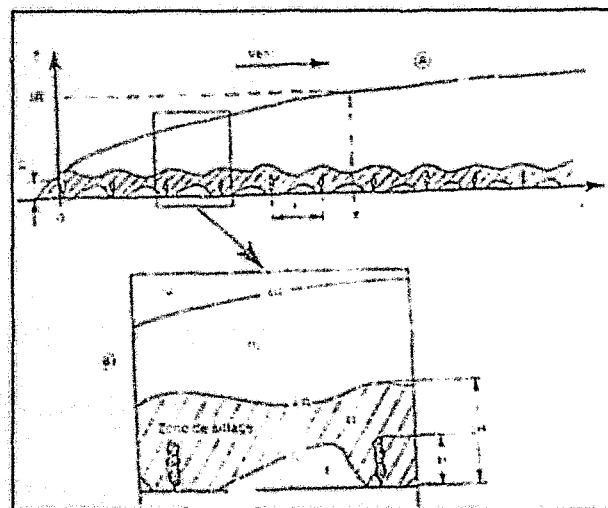


Fig 1.15 : Représentation schématique de l'influence d'un aménagement régional sur l'écoulement de l'air A : développement de la couche limite régionale ; B : écoulement à l'échelle parcellaire (d'après Damagnez, 1976).

- la seconde, concerne un effet *micro-climatique*, non pas celui des haies brise-vent à l'échelle parcellaire, mais celui engendré par le remblai ferroviaire. Ce niveau, est toujours lié au «*climat local* et *mésolocal*» auquel il appartient mais avec des modifications engendrées par les infrastructures de la LGV. Le vent canalisé par l'emprise ferroviaire subit une accélération supplémentaire (après celle engendrée par l'effet venturi Alpilles/Lubéron). La compression de l'air entre le remblai et les haies imperméables peut provoquer une déviation du vent vers les parcelles limitrophes. Nous appellerons ce niveau «*microclimat-remblai*».

A l'échelle *micro-climatique* (*haies brise-vent*), les perturbations générées par les obstacles d'échelles supérieures -*locale, mésolocale, microclimat-remblai*- sont accentuées par l'influence aérodynamique de la haie brise-vent (fig 1.16). Suivant la perméabilité, l'homogénéité et la hauteur de la haie, l'écoulement de l'air varie fortement. Par exemple, une haie perméable composée de feuillus permet de réduire la vitesse du vent sur une distance beaucoup plus importante qu'un brise-vent imperméable composé de résineux (Castaner, 1984).

Ce système d'échelles imbriquées permet de hiérarchiser les divers éléments perturbateurs du mistral suivant leur ampleur. C'est-à-dire que le *microclimat* s'insère dans le *microclimat-remblai*, lequel s'ajoute au *mésolocal* et ainsi de suite (D'Alessio, 1996 ; Quénol, 1996).

### 2.3.2 Délimitation des sites de mesures en fonction des niveaux d'échelle

Selon notre démarche, nous devrions définir un protocole de mesures météorologiques spécifique à chaque niveau des échelles emboîtées. Or, pour des raisons techniques, l'expérimentation météorologique s'est avérée compliquée aux échelles du *climat local* et du *mésolocal*. Tout d'abord, nous ne disposons pas du matériel nécessaire. L'étude de l'effet Venturi entre les massifs des Alpilles et du Petit Lubéron demande, en effet, l'implantation de capteurs reliés en réseau sur une large surface de plusieurs kilomètres carrés, et surtout des relevés en altitude, ce qui n'est pas réalisable avec nos instruments. Ensuite, s'est posé le problème du transfert d'échelle qui nécessite des développements méthodologiques adaptés, s'appuyant sur des techniques de mesures aux échelles supérieures. L'effet du brise-vent aux niveaux «*micro-climatique et local*» illustre bien les caractéristiques du passage à l'échelle supérieure. Si l'on considère plusieurs haies successives, l'effet aérodynamique ne peut se réduire à des effets individuels. L'étude d'un réseau de brise-vent au niveau "régional" nous aurait conduit à considérer l'ensemble de la couche de surface. "*Le changement d'échelle doit s'appuyer sur une bonne maîtrise de l'événement analysé à l'échelle locale, et il ne peut se réduire à l'addition d'effets locaux ; certains effets deviennent négligeables et d'autres apparaissent, car de nombreux processus sont non linéaires et peuvent présenter des interactions*" (Guyot et Seguin, 1976).

La prise en compte de ce type de processus requiert la mise au point d'outils et de techniques de mesures adaptés aux échelles supérieures. Le comportement du vent au niveau du réseau de brise-vent exige des mesures suivant un profil horizontal, mais aussi vertical sur une altitude représentant la "couche limite régionale". Cela n'a pas été réalisable pour les raisons invoquées plus haut. L'autre solution pour mettre en évidence le comportement du vent aux échelles supérieures est l'utilisation de modèles. Par exemple, à l'échelle locale, un



modèle diagnostique (ex : Nuatmos) peut être employé pour définir l'influence des reliefs sur le vent (Carrega et Glinsky-Olivier, 1997). Ce système permet d'interpoler l'action du relief sur le vent à partir de directions relevées sur divers points du site. Ceci ne constitue pas notre objectif principal et une étude spécifique à chaque niveau aurait nécessité trop de temps et de moyens.

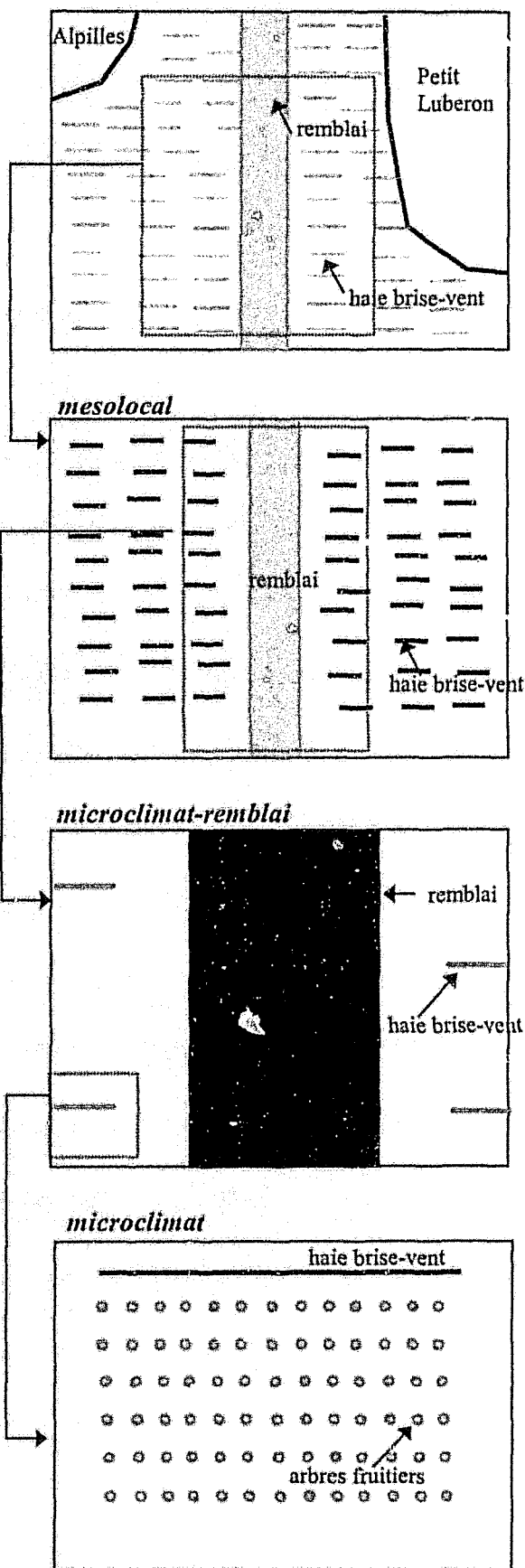
Toutefois cette régression des échelles spatiales imbriquées a permis de répertorier au mieux l'ensemble des obstacles du milieu en hiérarchisant leur niveau d'influence sur l'écoulement du mistral. D'après les recherches bibliographiques, l'influence du Venturi (*climat local*) et du réseau de haies brise-vent (*mésolocal*) s'opère sur une surface nettement supérieure à celle de notre site expérimental (Damagnez, 1976 ; Guyot et Seguin, 1976). *A priori*, les modifications de l'écoulement du mistral générées à ces deux niveaux d'échelles sont homogènes sur l'ensemble du terrain d'étude. Les sites de mesures retenus correspondent aux niveaux *microlimatiques* (*remblai et haies brise-vent*) où l'objectif est d'évaluer le comportement du vent aux abords des infrastructures ferroviaires et des parcelles limitrophes en prenant compte des nombreuses modifications aérodynamiques générées par les divers types de haies brise-vent.

La délimitation des échelles spatiales est nécessaire pour bien cerner l'action des éléments du milieu intervenant sur le vent et les températures. La hiérarchisation des différents éléments perturbant ces deux variables du système climatique, suivant la technique des échelles spatiales emboîtées, a permis d'estimer théoriquement l'intensité de leur impact sur les variables météorologiques et de définir les différents niveaux spatiaux auxquels ils agissent. L'étape suivante consiste à déterminer un protocole de mesures (météorologiques et agronomiques) spécifique à chaque niveau afin d'étudier l'influence de chaque élément du milieu et de déterminer l'impact du remblai de la LGV. L'importante variabilité spatiale des températures nocturnes et de l'écoulement du mistral nécessite l'utilisation de nombreux capteurs répartis et disposés en fonction de l'échelle prédéfinie afin de ne pas subir l'influence d'un élément perturbateur d'un niveau spatial inférieur et de limiter le mieux possible les risques d'erreur dus à un mauvais choix d'emplacement.



Partie 1 : Acquisition des données et technique de modélisation spatiale  
climat local

(Les facteurs justifiant les notions d'échelles apparaissent en noir sur chaque niveau. Le passage d'un niveau à l'autre se traduit par un cadre pointillé)



A cette échelle, c'est le facteur topographique qui provoque la variation météorologique. Le vent est accéléré au passage de l'entonnoir entre les massifs des Alpilles et du Petit Lubéron (effet Venturi), puis est ralenti au fur et à mesure que la vallée s'élargit.

A l'échelle mésolocale, ce sont les haies brise-vent qui génèrent la « rugosité régionale ».

A l'échelle micro-climatique (remblai), l'élément perturbateur est le remblai. Le vent, qui est dans le même axe que le mistral, est canalisé et accéléré.

A l'échelle micro-climatique (parcellaire), c'est la facteur phytologique qui prédomine. La haie brise-vent, en amont de la parcelle, modifie le comportement du vent et génère un microclimat spécifique.

Fig 1.16 : Hiérarchisation spatiale des éléments modifiant l'écoulement du mistral.

### 3 MESURES METEOROLOGIQUES ET AGRONOMIQUES AUX ECHELLES FINES : METHODES D'ANALYSE ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

---

Une fois, les terrains expérimentaux et la disposition des capteurs météorologiques choisis en fonction des niveaux d'échelles spatiales, nous pouvons réaliser les mesures météorologiques. Aux échelles qui nous intéressent dans ce travail, les données sont rares ou inexistantes et dans la plupart des cas, nous devons créer notre propre base d'information. En effet, les stations météorologiques françaises sont disposées suivant une maille moyenne d'environ 30 km (exemple des capteurs thermométriques) et « *sont plus représentatives du climat régional que du climat local et du microclimat* » (Guyot, 1997). Pour notre étude, la seule station (propriété du Cirame) présente sur le site - *la Pugère* - n'est pas équipée de tous les capteurs nécessaires ; de plus, sa mauvaise disposition influe sur les résultats et ne rend compte que des phénomènes microlocaux spécifiques. Par exemple, l'anémomètre est installé à une hauteur de 2 m en aval d'une haie brise-vent de 9 m.

L'observation de la variabilité des paramètres météorologiques aux échelles fines passe donc par la mise en place de nombreux postes de mesures répartis sur l'ensemble du terrain d'expérimentation. Les données sont obtenues soit de manière ponctuelle par l'intermédiaire de mesures itinérantes, soit simultanément sur plusieurs points grâce à des capteurs reliés en réseau (liaison par fils électriques ou programmés pour enregistrer les données simultanément). Dans le premier cas, l'avantage est de pouvoir sélectionner un maximum de postes de mesures, mais le décalage temporel entre chaque relevé constitue un inconvénient. La seconde technique de mesures présente l'intérêt de pallier le problème d'intervalle entre les relevés ; cependant, le coût des capteurs oblige à limiter le nombre de postes de mesures.

Les mesures des variables météorologiques étant souvent soumises à des influences diverses susceptibles de générer des erreurs dans la prise d'informations, l'emplacement des instruments n'est pas choisi au hasard. Un maximum de précautions est pris concernant notamment l'action du milieu (ex : nature du sol, ...) mais aussi les caractéristiques et la disposition des appareils de mesure (ex : temps de réponse du capteur, orientation de la cellule du thermomètre, ...).

Dans une étude d'impact climatique, la disposition du matériel est d'autant plus compliquée que l'on cherche à comprendre l'influence d'un élément perturbateur du climat (ex : brise-vent, remblai, ...) tout en évitant d'être trop influencé par un autre. Par exemple, pour étudier l'ensemble des écoulements nocturnes à l'échelle *topoclimatique*, nous éviterons de disposer les capteurs à proximité d'une haie brise-vent (échelle *micro-climatique*). Dans ce contexte, il est particulièrement important de définir les méthodes expérimentales et les postes de mesures en fonction des niveaux d'échelles spatiales présentés précédemment.

### 3.1 Les techniques de mesures : fixes et itinérantes

On peut distinguer deux techniques principales d'acquisition des données météorologiques : *les mesures en postes fixes et itinérantes*.

L'installation de stations automatiques fixes permet d'obtenir des informations en continu et simultanément sur plusieurs points de l'espace étudié. Afin de mettre en évidence les variations climatiques engendrées par la création d'un aménagement anthropique, il convient d'une part de comparer l'évolution de la climatologie des postes influencés par l'obstacle avec celle d'un poste éloigné et d'autre part, de disposer de séries de données suffisamment longues et, si possible, antérieures à la modification du milieu. Ce type d'expérimentation est fréquemment employé pour les études d'impact des lacs de barrage-réservoir (Mesland *et al*, 1995). Par exemple, pour évaluer l'influence climatique de la retenue du Vieux-Pré en Moselle, les services de Météo-France (1992) ont utilisé des séries de données antérieures (7 années) et postérieures (6 années) à la mise en eau à partir de deux stations situées à proximité du lac et d'une station de référence. Les résultats de cette expérimentation ont montré que les périodes d'observation étaient trop courtes pour conclure un impact significatif du lac. La difficulté d'interprétation des données météorologiques provient également des insuffisances de la méthode d'acquisition. En effet, l'emplacement des stations météorologiques et le nombre d'appareils utilisés dans ce type d'expérimentation influencent fortement les résultats. Souvent, les stations météorologiques ne sont pas installées pour une étude spécifique. Dans cet exemple, les trois stations sont espacées de plusieurs kilomètres et sont soumises à un environnement différent (les deux stations tests sont en milieu forestier alors que la station témoin est en milieu urbain). Même si des analyses statistiques (corrélation, régression multiples) permettent d'estimer l'influence de l'environnement des stations sur les variables météorologiques (Courault *et al*, 1996), la multitude de microclimat sur cet espace de plusieurs kilomètres carrés rend complexe l'interprétation des données des trois stations.

Les mesures itinérantes permettent de palier au manque d'information entre les stations météorologiques. Elles consistent à effectuer des relevés météorologiques ponctuels sur divers points de l'espace étudié. Cette technique est régulièrement utilisée en micro-climatologie car les stations fixes sont souvent trop espacées pour étudier la variabilité spatiale des facteurs météorologiques à cette échelle. « *Pour obtenir des données sur les conditions du climat local d'un espace rural comme par exemple le Kaiserstuhl, on peut d'abord faire une comparaison ponctuelle entre quelques stations climatiques installées en des points bien précis à l'intérieur du terrain de recherche. Cependant, si l'on veut faire des mesures en des endroits beaucoup plus nombreux (ex : plusieurs versants, collines ou vallées), il nous faut alors un nombre de stations bien plus élevé, ou alors on se base sur des mesures itinérantes* » (Endlicher, 1980). Ce type de mesure présente l'avantage de pouvoir quadriller l'espace d'étude avec un maximum de postes. Le principal inconvénient de cette technique est lié à la variation temporelle des facteurs météorologiques. En effet, il faut tenir compte que la plupart des variables météorologiques (dont les températures) varient fortement sur un laps de temps très court. Par conséquent, l'intervalle entre chaque prise de mesures génère une part d'erreur non négligeable.

La « formule idéale » consiste donc à allier les avantages des deux méthodes d'acquisition de données, c'est-à-dire de disposer d'un maximum de postes de mesures répartis sur l'ensemble de l'espace et acquérant simultanément les données météorologiques.

### 3.2 Les instruments de mesures : capteurs et stations d'acquisition de données

Au fil de cette étude, les techniques de mesures ainsi que le matériel nécessaire à l'acquisition des données ont évolué. Tout d'abord, en se basant sur l'expérience acquise au cours d'une étude sur le blocage des écoulements gravitaires par le remblai de la LGV Est européen en Champagne (Beltrando *et al.*, 1995 ; Bridier *et al.*, 1995) et sur d'autres expérimentations de climatologie locale (Beltrando *et al.*, 1992 ; Carrega, 1994 ; Funcken *et al.*, 1995), nous nous sommes procurés, par l'intermédiaire d'une convention d'étude, des instruments permettant de relever des données de façon ponctuelle (ex : station météorologique portable). Or, vu la nature des phénomènes à étudier (ex : rafales de mistral) et la complexité du milieu, les mesures instantanées sont peu adaptées, chaque prise d'information étant décalée dans le temps. L'observation de l'évolution d'une variable météorologique a nécessité l'emploi d'outils de mesures plus adaptés, pouvant notamment obtenir, de façon simultanée, des informations réparties dans l'espace. Nous avons donc opté également pour l'utilisation de capteurs électroniques reliés à des systèmes d'acquisition automatiques de données capables de stocker les informations.

L'ensemble des instruments de mesures utilisés appartient à la famille des appareils numériques (hormis le thermomètre à minima et la girouette manuelle qui sont des appareils analogiques). Ces instruments sont munis d'un enregistreur permettant d'obtenir des données, en continu, suivant un pas de temps défini. Les enregistreurs, appelés Data Logger, peuvent être intégrés au capteur (1 voie) ou séparés sous la forme d'une station d'acquisition de données (en moyenne de 7 à 10 voies). Avec ce type d'appareil, on peut effectuer des mesures simultanément sur divers points. Les capteurs reliés en réseau à une station d'acquisition de données sont généralement utilisés sur une petite surface (ex : parcelle agricole) à cause de la contrainte d'espacement liée aux fils électriques. Les Data Logger à voie unique sont employés, eux, sur des sites éloignés. Ils sont programmés pour enregistrer les informations au même moment en respectant le même intervalle de mesure.

Les capteurs électroniques présentent l'avantage d'obtenir des informations simultanément sur plusieurs postes de mesures selon un pas de temps défini. Dans une étude de climatologie locale où une multitude d'éléments perturbent les variables météorologiques, il est nécessaire de disposer d'un nombre important de capteurs afin de quadriller l'ensemble du site. Ce type d'instrumentation étant onéreux, nous avons, en plus des capteurs achetés dans le commerce, décidé de fabriquer nous-même certains capteurs météorologiques d'une qualité peut-être inférieure à celle des instruments du commerce mais à un prix de revient beaucoup plus bas. Par exemple, au lieu d'un anémomètre sonique avec une précision au dixième de mètre par seconde, nous disposons de dix anémomètres à coupelles ayant une précision beaucoup moins fine mais dont l'étalonnage permet de comparer les données entre chaque capteur.

La construction de capteurs a permis d'obtenir un réseau de mesures météorologiques adapté aux exigences d'une étude micro-climatique (forte densité d'appareils de mesures).

Nous avons conçu et fabriqué :

- 10 girouettes électroniques en carbone pour vent fort (fig 1.17a) ;
- 5 girouettes manuelles en balsa pour les écoulements nocturnes inférieurs à 2 m/s (fig 1.17 b) ;
- 5 anémomètres à coupelles pour vent fort (fig 1.17c);
- 2 anémomètres à hélice pour vent modéré inférieur à 2 m/s (fig 1.17d).

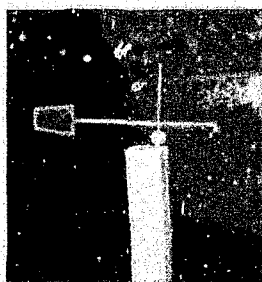
Nous disposons également de :

- 15 thermomètres en indice actinothermique (fig 1.17e) ;
- 13 thermomètres électroniques (tiny talk) enregistrant la température de l'air en indice actinothermique (fig 1.17f) ;
- 3 thermomètres avec sonde externe Pt 100 (tiny talk) pour les mesures de température dans le sol (fig 1.17g);
- 2 thermomètres avec sonde déportée (taille de 1,5 mm) pour mesurer la température dans l'organe végétal (fig 1.17h);
- 2 capteurs (tiny talk) mesurant le taux d'humidité relative (fig 1.17i);
- 2 stations météorologiques portables (Testo) équipées d'un anémomètre à hélice.

Les instruments de mesures et les stations d'acquisition de données sont présentés en détails sous la forme d'une fiche technique (plans de construction, caractéristiques) en annexe 3.



a : girouette électronique



b : girouette manuelle en balsa



c: anémomètre à coupelles



d : anémomètre à hélices



e : thermomètre à minima



f : thermomètre électronique  
(thermistance Tiny Talk)



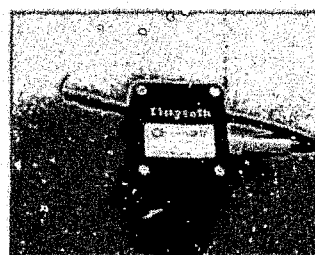
g : thermomètre électronique  
(sonde Pt100 Tiny Talk)



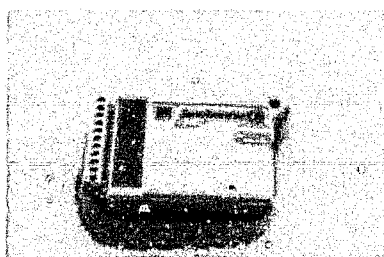
h : thermomètre électronique  
déporté (thermistance Tiny Talk)



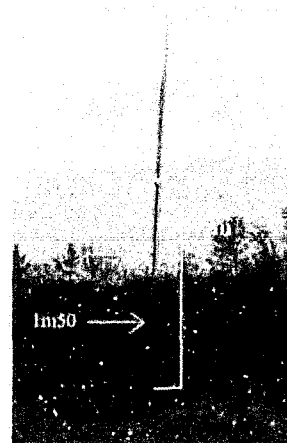
i : humidité relative  
(Tiny Talk)



j: enregistreur à une voie  
(Tiny Volt)



k: enregistreur à plusieurs voies  
(Smart Reader)



l: mât de 9 m de haut

Fig 1.17 (a à l) : Capteurs (a à i) et stations d'acquisition de données météorologiques (j à l) utilisés dans cette étude (clichés Quénol).

### 3.3 Installation des instruments de mesures : précautions pour limiter les erreurs

Les différents éléments du milieu influencent les paramètres météorologiques, le microclimat engendré par les haies brise-vent en étant un parfait exemple. Afin d'effectuer des comparaisons entre les données, les instruments de mesures doivent être disposés de façon à ce qu'il y ait le moins de différence possible entre les divers points de mesures. Des normes existent dans le but de limiter l'action d'obstacle sur le climat. Selon l'OMM (1990), " *les instruments de mesures doivent être installés dans un poste d'observation météorologique sur une surface horizontale de 6 x 9 m couverte par une végétation courte. La station météorologique doit également être située en terrain dégagé, éloignée des bâtiments et des rideaux d'arbres de plus de 10 fois leur hauteur*". Dans notre cas, ces règles ne sont pas applicables. L'objectif des mesures étant d'étudier l'impact d'éléments du milieu sur le climat, il est donc nécessaire de disposer les instruments à proximité de ces obstacles. Les instruments ne sont pas installés à la hauteur préconisée par l'OMM, mais de manière à retranscrire le mieux possible les conditions météorologiques subies par le végétal. Les relevés de température, de direction des écoulements nocturnes et d'humidité sont réalisés à 1m50 de haut, c'est-à-dire la hauteur moyenne où l'on retrouve les bourgeons des arbres fruitiers. Le vent est généralement mesuré par des stations météorologiques à 10m de haut afin d'éliminer les perturbations causées par l'environnement immédiat. Ici, les mesures de la vitesse et de la direction du vent sont effectuées à 3m50 au-dessus du sol, hauteur qui *permet d'avoir des informations sur les conditions de vent dans l'environnement immédiat du poste d'observation et des cultures.* » (Guyot, 1997).

Néanmoins, tous les postes expérimentaux doivent être disposés dans les mêmes conditions. Il reste que l'ensemble des éléments du milieu agissant à des échelles différentes compliquent fortement cette phase. La répétition des mesures, que l'on améliore au fur et à mesure, permet de découvrir des anomalies et de les corriger. Après avoir compris quels étaient les éléments qui influençaient les données, on peut mettre en place les points de mesures définitifs.

#### 3.3.1 Environnement du poste de mesure

L'environnement dans lequel est disposé le capteur météorologique est très important. Le relief, la nature et l'état du sol, la végétation, la présence d'obstacles comme un mur ainsi que les caractéristiques des parcelles avoisinantes sont autant de facteurs à repérer avant de disposer les capteurs. Ainsi, au cours de nos campagnes expérimentales, nous avons observé la variabilité spatiale des paramètres météorologiques liée à l'environnement du poste de mesure. Pour les mesures de température et d'humidité de l'air, les capteurs doivent être disposés au-dessus d'un sol nu et tassé. En effet, la température de l'air est fortement tributaire de la température du sol. Des relevés de températures sur sol enherbé et sur sol nu, effectués dans le but d'analyser l'action du couvert végétal sur la température nocturne, font apparaître des différences supérieures à 1.5°C à une hauteur de 10 cm et supérieures à 5°C à une profondeur de 5 cm (fig 1.18) : la surface herbeuse restreint, ici, l'approvisionnement solaire du sol et la conduction est nettement diminuée parce qu'une « *couche d'air isolée* ».

partiellement la surface de l'herbe du sol sous-jacent plus chaud (effet paillasse) » (AVC, 1991 ; Carrega, 1994).

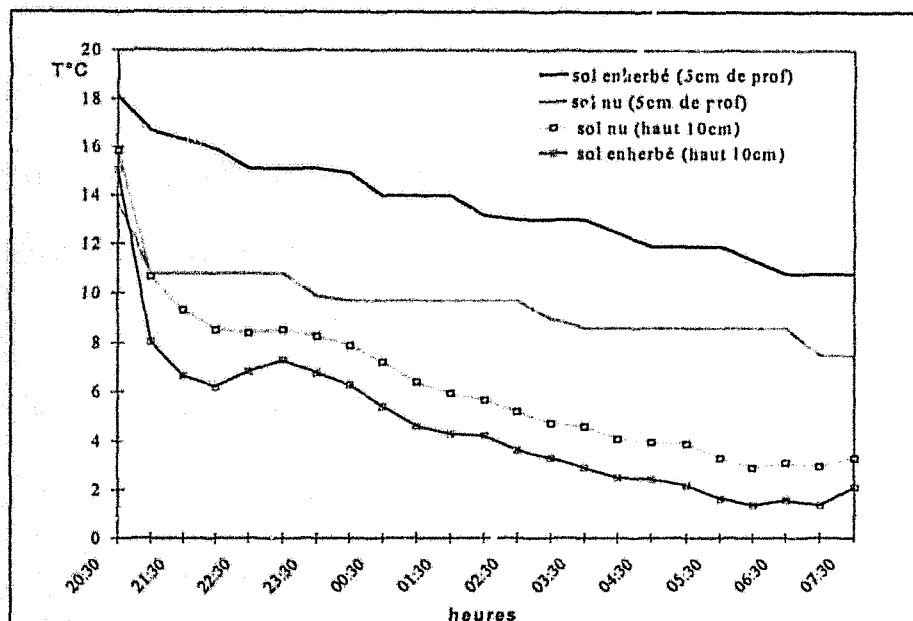


Fig 1.18 : Variabilité thermique nocturne entre un sol nu et un sol enherbé à Mallemort : mesure à 5 cm de profondeur et à 10 cm au dessus du sol (nuit radiative du 15-16 mars 1999).

Ces résultats corroborent les constatations faites par P. Carrega au cours d'une étude sur les écarts de températures sur différentes surfaces horizontales à Vence, dans le département des Alpes-Maritimes. Des mesures radiométriques réalisées à la surface de différents milieux (sol nu, pré ras, forêt, gazon, ...) montrent une forte variabilité thermique par type de temps anticyclonique. Par exemple, l'écart de température entre le sol nu et le pré atteint 4°C (14,5°C à la surface du pré et 18,5°C à la surface du sol nu le 6 septembre 1990 à minuit).

Un autre aspect, met en évidence une anomalie dans la stratification de l'air de part et d'autre du remblai de la LGV au cours d'une nuit radiative. Il s'agit de deux points de mesures situés sur une même parcelle (traversée par l'obstacle S.N.C.F). Les températures relevées la nuit du 19 au 20 novembre 1998 à plusieurs hauteurs (1.5m, 3m, 6m et 8m) font ressortir sur un premier poste (Sud de la ligne ferroviaire) une stratification de l'air classique : températures les plus froides sur les capteurs les plus bas car l'air froid est calé au niveau du sol (fig 1.19a). Par contre, sur le deuxième poste (au nord), les températures les plus froides sont indiquées par le capteur à 3m (fig 1.19b). Ces deux postes bénéficient des mêmes conditions (même distance par rapport aux haies, sol nu et tassé). Les deux mâts munis des instruments sont installés dans la même parcelle mais sur des rangées de variétés différentes (fig 1.171). Il s'avère qu'une des deux variétés de fruitiers a encore des feuilles. Le feuillage des arbres limite le refroidissement au niveau du capteur à 1m50 car il renvoie une partie de l'énergie par réflexion. "Le refroidissement nocturne est produit par la surface du sol qui perd de l'énergie par rayonnement vers l'espace. Si une partie de ce rayonnement est absorbée par un corps quelconque qui, à son tour, émet du rayonnement vers le sol, le bilan global est



*moins négatif et le refroidissement est moindre"* (Morlon, 1989 ; Verbrugge, 1989). En revanche, le capteur présent à 3m est juste au niveau de la cime des fruitiers et le végétal agit comme le sol en libérant de l'énergie par rayonnement. Cet air se refroidit de proche en proche au contact du végétal, ce qui explique une température plus froide à ce niveau. Prenant ce facteur en compte, nous avons déplacé ce poste de quelques mètres pour le placer dans un environnement sans feuille. Cela illustre bien la démarche de notre méthode qui consiste à affiner le protocole de mesures afin d'en réduire le mieux possible des effets de l'environnement proche des capteurs et de diminuer les risques d'erreur.

### 3.3.2 Positionnement du capteur

L'environnement du matériel déterminé, le positionnement du capteur doit aussi être étudié. Le mauvais placement d'un capteur peut engendrer des erreurs dans la prise d'information. Par exemple, pour les mesures de température nocturne en situation radiative, l'orientation de la cellule sensible du capteur (vers le sol, vers le ciel ou horizontalement) détermine le paramètre mesuré. Dans le premier cas, le capteur est soumis principalement aux déperditions énergétiques du sol (1), dans le second, au rayonnement atmosphérique (2), puis dans le dernier, à ces deux éléments réunis qui définissent un refroidissement par rayonnement (3). On observe un écart de plusieurs degrés Celsius suivant le positionnement du capteur (fig 1.20). Naturellement, la position horizontale reflète le mieux le comportement des températures. En outre, c'est elle, après l'étalonnage des capteurs, qui engendre le moins de différence entre chaque instrument. Les courbes des deux capteurs disposés horizontalement (*côté 1 et côté 2*) sont similaires.

En définitive, toutes les étapes nécessaires à la production de données climatiques à une échelle fine sont sujettes à une succession de risques d'erreur (**caractéristiques du capteur → étalonnage → positionnement du capteur → action du milieu → choix de l'unité de mesures**).

### 3.4 Un protocole de mesures adapté à chaque niveau d'échelle

Notre méthode d'étude contribuant à limiter les erreurs dues aux caractéristiques du matériel et au protocole de mesure est fondée sur le fait que des petites erreurs commises à la base peuvent, à la fin, altérer fortement les résultats. Suivant cette démarche, un protocole expérimental spécifique à chaque niveau d'échelle étudié a été mis en place. A terme, les mesures réalisées à diverses échelles permettront de comprendre l'impact des différents éléments du milieu (en particulier, le remblai ferroviaire) sur les variables météorologiques (température, vent) et serviront de base de données exploitable au moment de l'extrapolation des résultats sur l'ensemble du site d'étude.

Partie 1 : Acquisition des données et technique de modélisation spatiale

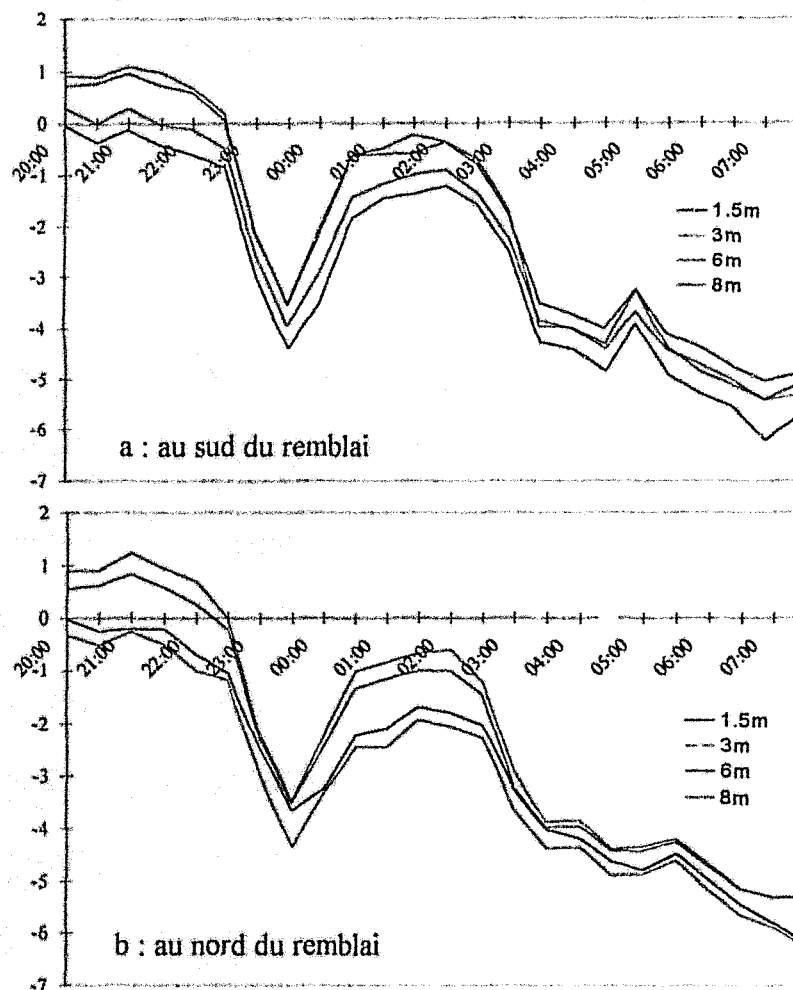


Fig 1.19 a et b: Stratification thermique de part et d'autre du remblai T.G.V.  
(nuit avec arrêt de mistral du 19-20 novembre 1998).

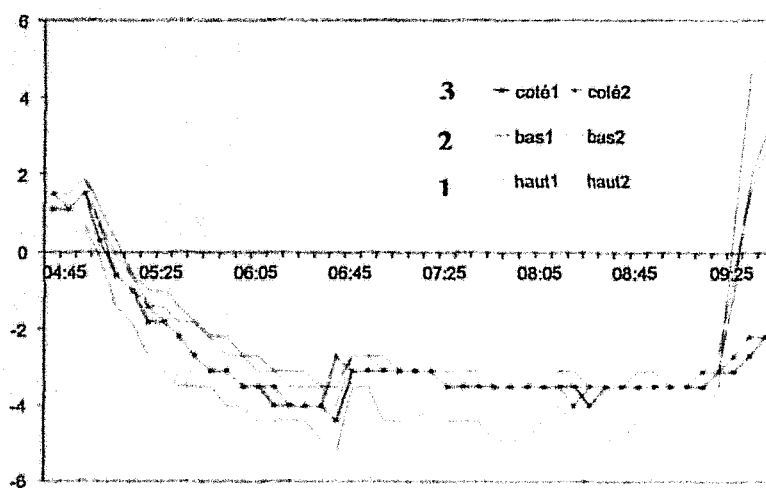
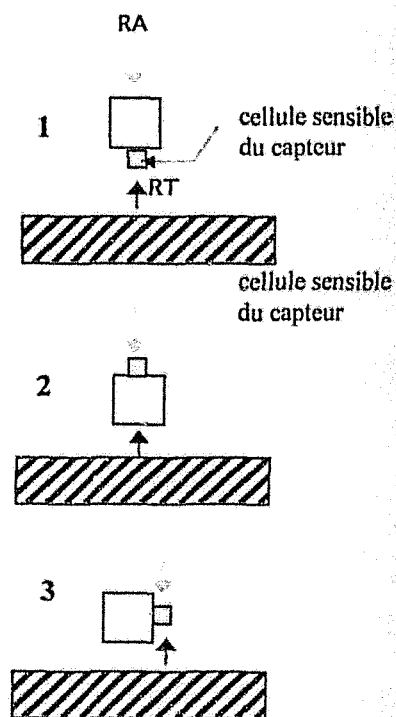


Fig 1.20 : Variation thermique nocturne en fonction de l'orientation du capteur. (nuit du 14-15 décembre 1997).



RA = rayonnement atmosphérique  
RT = rayonnement terrestre

Dans le cadre de l'expérimentation liée à la variabilité spatiale des basses températures en situation de gel printanier, les postes de mesures sont choisis suivant les niveaux d'échelles emboîtées :

- A l'échelle locale (ou *topoclimatique*), où l'objectif est d'observer les caractéristiques des écoulements nocturnes sur l'ensemble de la vallée, les postes de mesures sont situés en terrain dégagé, éloignés d'obstacles sur une distance de plus de 10 fois la hauteur de ceux-ci (OMM, 1990). Des mesures ponctuelles de vitesse et de direction des écoulements ainsi que des relevés de températures en simultané sont effectuées sur tous les points expérimentaux.

- A l'échelle *mésolocale* (ou *bassin versant*), les postes de mesures sont disposés de part et d'autre de la LGV en milieu de parcelle agricole, de manière à limiter l'action des haies brise-vent. Nous avons réalisé des mesures itinérantes de vitesse et de direction d'écoulements nocturnes, des mesures de températures simultanément sur l'ensemble des postes pour déterminer les secteurs les plus froids ainsi que des stratifications thermiques verticales pour observer une éventuelle accumulation d'air froid contre le remblai.

- A l'échelle *micro-climatique*, les points de mesures sont répartis sur la parcelle agricole. Deux types de terrains expérimentaux sont choisis : des parcelles éloignées de la LGV afin d'étudier le microclimat spécifique lié aux haies brise-vent, puis des parcelles à proximité du remblai ferroviaire pour définir l'action combinée de la ligne ferroviaire et des haies brise-vent.

Pour l'étude d'impact de la LGV sur l'écoulement du mistral, les terrains expérimentaux sont situés à proximité du tracé. A l'échelle *micro-climatique-remblai* (de part et d'autre de la LGV), les mesures se sont déroulées aux différentes phases de la construction des infrastructures ferroviaires - *destruction des haies brise-vent sur un large couloir puis construction du remblai et des merlons antibruit* - afin d'observer, au fur et à mesure, les modifications de l'écoulement du mistral. Les mesures de vitesse et de direction du vent sont réalisées soit ponctuellement par l'intermédiaire de stations météorologiques, soit par des capteurs (girouettes et anémomètres) reliés en réseau. A l'échelle *micro-climatique (haie)*, l'installation de capteurs sur des parcelles protégées par différents types de haies brise-vent a permis d'analyser les modifications aérodynamiques engendrées par ces obstacles « naturels ».

Pour acquérir les données météorologiques permettant d'étudier l'impact de la LGV, nous avons mis en place un protocole de mesures basé principalement sur l'utilisation de capteurs électroniques et de systèmes d'enregistrement de données. Les objectifs principaux étaient, d'une part d'obtenir de façon simultanée des informations relevées sur divers points de mesure et d'autre part, de limiter les risques d'erreurs lors de l'acquisition et de l'interprétation des données. L'évolution constante de la technique et du protocole de mesure a donné lieu à un affinement de nos résultats et surtout à un contrôle des données. Ainsi, les premiers relevés de températures nocturnes sont réalisés ponctuellement avec l'aide d'une station météorologique portable et de thermomètres à minima. Au fil de l'expérimentation,

l'évolution du matériel et des techniques de mesures permettent d'obtenir régulièrement, sur divers points, les données thermiques nocturnes de l'air, du sol et des végétaux.

Mais les paramètres météorologiques étudiés ont eu beau être recueillis régulièrement, suivant un pas de temps spécifique, la présence sur le terrain était nécessaire pour bien comprendre les phénomènes. En effet, vu les différentes interprétations que l'on peut faire de certaines informations, l'unique lecture des valeurs peut engendrer des erreurs. Par exemple, en situation de gel radiatif, une hausse subite de la température peut avoir plusieurs origines, tel qu'un passage nuageux, un coup de vent ou bien des pulsations d'air froid. L'expérience des travaux antérieurs en Champagne avait démontré que la présence sur le terrain était un facteur primordial pour observer les divers phénomènes qui se produisent dans ce type d'étude (Beltrando *et al.*, 1995). En définitive, les capteurs indiquent les résultats et les observations faites sur le terrain aident à comprendre le fonctionnement du système climatique local.

Les techniques et les postes de mesures définis en fonction de la hiérarchisation des différents obstacles du milieu (relief, remblai, haies brise-vent, ...) permettent d'étudier la variabilité locale des températures et de l'écoulement du mistral. Mais, les secteurs où les phénomènes météorologiques sont les plus intenses ne correspondent pas forcément à ceux où le risque pour les cultures fruitières est le plus grand. Dans le cas du gel printanier, ce n'est pas forcément sur les parcelles où les températures sont les plus froides que les dégâts sont les plus importants. Le risque dépend également de la capacité du végétal à résister aux phénomènes météorologiques extrêmes.

### 3.5 Expérimentation agronomique pour valider les mesures météorologiques

Pour connaître la variabilité spatiale des températures nocturnes et du mistral, les mesures météorologiques sont fondamentales, mais elles ne permettent pas d'évaluer les secteurs à risques climatiques pour les cultures fruitières. La probabilité de dégâts sur les organes fruitiers dépend bien sûr de l'intensité du phénomène météorologique (aléa), mais également des caractéristiques du végétal (vulnérabilité). Un contrôle du végétal est donc nécessaire à la validation des mesures météorologiques. D'ailleurs, comme l'indique Schreiber (1965) pour le gel, *« seule l'estimation des dommages dus au gel donne une image concrète de la résultante des gels enregistrés. Les mesures de températures peuvent être ainsi en quelque sorte étalonnées au moyen de ces dégâts et permettent alors une généralisation de l'estimation du risque de gel »*. C'est donc en associant ces deux paramètres - *météorologique et agronomique* - sur des sites plus ou moins proches du remblai que nous pourrions délimiter les secteurs où le risque climatique est accentué par l'ouvrage en remblai.

Le protocole d'analyse du végétal consiste à observer l'état des divers organes fruitiers (bourgeon, fleur et fruit) après une gelée intense ou après une période de fort mistral. Il n'existe pas de méthode de comptage ou d'observation prédéfinie. Toutefois, nous nous sommes inspirés d'études sur la gélivité des arbres fruitiers (Mattioli, 1998 ; Szabo *et al.*, 1996) et surtout des précieux conseils d'agronomes (Florent B. de la « station expérimentale fruitière de la Pugère » et Mathieu V. du Ctifl Balandran). Les parcelles d'expérimentation

sont choisies en fonction des postes de mesures météorologiques afin de vérifier si la répartition des dommages concorde avec les données météorologiques. C'est également par souci de similarité avec le protocole des mesures météorologiques, que l'expérimentation agronomique s'opère suivant l'imbrication des échelles spatiales et temporelles. L'échelle du temps est d'autant plus importante que le risque pour les cultures peut apparaître après un phénomène météorologique extrême (ex : un refroidissement intense de quelques heures peut détruire toute une récolte) ou après la succession d'épisodes d'intensité moins forte mais qui à terme engendre des dommages (ex : la succession d'épisodes de vent violent provoque le boilage sur les fruits).

Par conséquent, les observations agronomiques se déroulent :

- ♦ soit après un épisode météorologique extrême (1),
- ♦ soit après une succession de ces épisodes (2) .

Pour l'étude sur le gel, les analyses agronomiques s'effectuent aux échelles spatiales *micro-climatique* (parcelle agricole) et *mésoclimatique* dans le but d'étudier, selon la même méthode définie pour les mesures météorologiques, l'impact des haies brise-vent et du remblai ferroviaire sur la répartition des dégâts fruitiers. Nous procédons, soit à un comptage de bourgeons ou de fleurs après une forte nuit gélive (1), soit à l'observation des fruits à la fin du printemps (2).

Dans le premier cas (1), le «*contrôle du végétal*» permet d'évaluer les dommages en fonction des niveaux de croissance des différentes espèces et variétés fruitières au moment de l'épisode gélif. Ce type d'opération est réalisé après une forte gelée radiative (nuit du 22 au 23 mars 1998) où nous avons prélevé des bourgeons et des fleurs de différentes variétés de pommiers et de poiriers sur 31 parcelles de part et d'autre de la LGV. Sur chaque parcelle, nous avons choisi 9 points d'observation répartis sur l'ensemble de la plantation (3 arbres par rang test). Sur chaque arbre, 50 corymbes sont cueillis et examinés. Les pommiers et poiriers ont des corymbes constitués de 4 à 7 fleurs (cf fig 1.8). Pour qu'il y ait fructification, il faut qu'au moins un élément « survive ». Donc, dans le protocole de contrôle du végétal, nous effectuons deux types de comptage : *le nombre de corymbes avec au moins une fleur gelée* afin d'étudier si la parcelle est concernée par le gel ; et *le nombre de bourgeons ou de fleurs gelés par corymbes touchés* pour voir l'intensité des dégâts et surtout évaluer s'ils sont irréversibles. Les organes végétaux échantillonnés sont coupés latéralement de manière à observer si le pistil et les ovaires ont subi une déshydratation cellulaire.

Dans le second cas (2), l'analyse en fin de printemps permet d'estimer les secteurs les plus exposés au risque gélif. Les analyses consistent à observer les fruits quantitativement (nombre de fruits par arbre) et qualitativement (part de fruits abîmés par arbres). Les comptages ne s'effectuant pas immédiatement après un épisode de gel, nous disposons de suffisamment de temps pour observer l'ensemble des fruits des parcelles expérimentales. A la fin du printemps 1998, nous avons compté tous les fruits de deux parcelles de pommiers Breaburn, composées chacune de 14 rangs de 37 arbres et situées en amont d'une digue de 5 m de haut (stagnation d'air froid en amont de l'obstacle par situation radiative). Sur cette exploitation arboricole de la commune de Bellegarde (Gard), nous avons observé le nombre de fruits par arbre ainsi que la proportion de fruits avec un arneau de gel (Quénol, 2001 communication orale à l'AIC Séville). Après le printemps 1999, ce type d'analyse est

appliqué sur le terrain expérimental de la LGV, sur une parcelle de poiriers Harrow Sweet composée de 405 arbres (photo 1b).

Quant à l'expérimentation sur les effets mécaniques du mistral, les observations sont faites à l'échelle *micro-climatique*. Les analyses sont réalisées à maturité du fruit, l'objectif étant d'observer la proportion de fruits abîmés par rapport à la distance aux haies brise-vent ou au remblai ferroviaire (2). Une première expérimentation s'est déroulée sur une parcelle protégée par une haie de cyprès au *Centre Technique Interprofessionnel de Fruits et Légumes* (Ctifl) de Balandran dans le Gard. Pendant la récolte de 1998, près de 15 000 fruits répartis sur 9 rangs de pommiers (variétés Fuji et TNR42-60X6398) sont observés. Nous avons répété la même opération en juillet 1999 sur le terrain expérimental de la LGV sur deux parcelles éloignées de la ligne ferroviaire, l'une étant protégée par une haie imperméable (poiriers Harrow Sweet) et l'autre par une haie perméable (pommiers Golden). La totalité des fruits des arbres (28 pour Harrow Sweet et 24 arbres pour Golden), choisis de manière à quadriller l'ensemble de la parcelle, est observée. La proportion de fruits abîmés par arbres a permis d'estimer la répartition des dégâts provoqués par les effets mécaniques du mistral en aval des deux types de haies brise-vent. En août 1999, le même type d'expérimentation agronomique est réalisé sur une parcelle de pommiers Early Gold à proximité de la LGV. Nous avons observé tous les fruits de 113 arbres répartis sur 4 rangées.

L'apport du contrôle agronomique est fondamental pour déterminer les risques météorologiques et climatiques provoqués par le remblai ferroviaire. Alors que les mesures météorologiques permettent d'acquérir des données sur les modifications atmosphériques locales, l'analyse agronomique met en évidence les conséquences de ces modifications sur les cultures fruitières. Une fois les données météorologiques et agronomiques acquises ponctuellement, elles doivent être interprétées et représentées spatialement sur l'ensemble du terrain expérimental.

## 4 CONSTRUCTION D'UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (SIG) ET EXTRAPOLATION SPATIALE DES DONNEES « TERRAIN »

---

« Une fois les données acquises, contrôlées et analysées, le chercheur doit se pencher sur les questions de représentation des résultats (graphiques ou cartes) et éventuellement de spatialisation de données ponctuelles » (Beltrando, 2000). La modélisation des risques climatiques aux échelles fines requiert la construction d'un Système d'Information Géographique (SIG) qui peut gérer des données en modes vectoriel et raster. Une des nombreuses définitions attribuées au SIG le détermine comme « un système informatique multicouches qui permet, à partir de diverses sources de rassembler et organiser, de gérer, analyser et combiner, d'élaborer et présenter des informations localisées géographiquement contribuant à la gestion de l'espace » (Thériault, 1995). Dans cette définition figure des fonctions importantes dont celles de traiter des données géographiques dans le but d'analyser, de modéliser, de simuler et de cartographier des phénomènes et des processus dans l'espace. Dans notre approche, le système de modélisation doit permettre de mettre en relation les informations issues des mesures sur le terrain (météorologiques et agronomiques) avec l'occupation du sol (haies brise-vent, remblai, cultures fruitières, ...) afin d'élaborer, par l'intermédiaire de requêtes et d'analyses, une représentation spatiale des différents phénomènes météorologiques ou climatologiques étudiés. La complexité du milieu ayant induit un protocole de mesures à plusieurs niveaux, le SIG permet de mettre en relation ces informations et donc de prendre en compte l'imbrication des échelles puisqu'il permet de manipuler des informations géographiques de sources, de formes et d'échelles différentes.

Les fonctions du SIG sont nombreuses : *acquisition de données* (numérisation, *scanning*, ...), *traitements de données* (statistique, modélisation spatiale, ...) et *restitution des résultats sous différents supports* (cartes, graphiques, tableaux statistiques, ...) (fig 1.21). Suivant les logiciels, ces fonctionnalités sont plus ou moins performantes. Certains logiciels sont plus axés sur les traitements statistiques (raster) alors que d'autres sont plus spécialisés sur la représentation des unités spatiales (vecteur). Hormis quelques logiciels très performants (ex : Arc Info, Grass, ...) la majorité des SIG sont spécialisés et ont d'importantes lacunes sur certaines fonctions. Pour palier ces insuffisances, l'apport d'autres logiciels spécifiques peut alors être nécessaire.

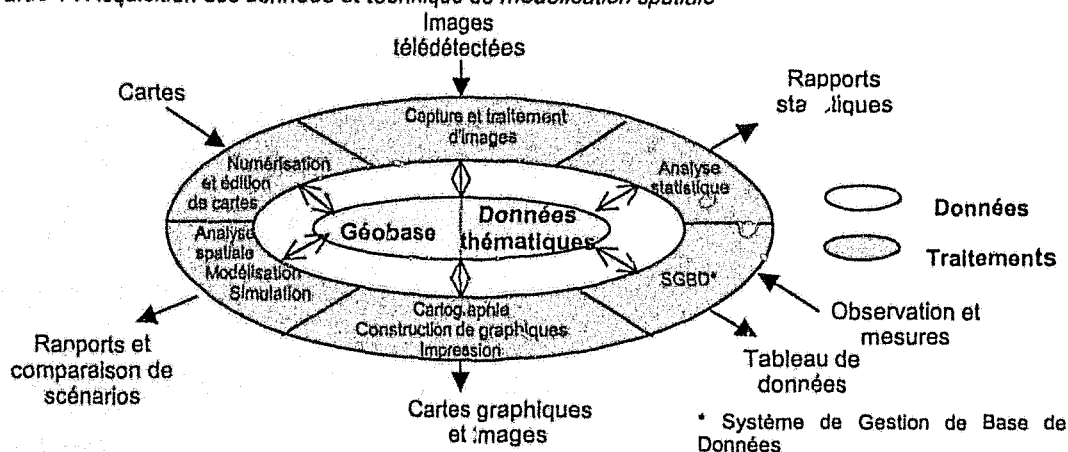


Fig 1.21 : Système d'Information Géographique, d'après Raveneau (1997).

Le SIG doit donc être considéré comme un ensemble de logiciels ayant des fonctionnalités spécifiques suivant les traitements réalisés. Nous verrons que dans certaines situations, une « passerelle informatique » est nécessaire pour créer un lien entre les différents logiciels.

#### 4.1 Constitution d'un SIG : formats raster ou/et vecteur

*"Les logiciels de SIG diffèrent suivant la manière dont ils structurent la réalité à travers le format de données. Chaque format correspond aux exigences de certains types de phénomènes et d'applications"* (Theriault, 1996). Les modes vectoriel et matriciel sont les deux formats employés :

- dans la structure vectorielle, on utilise des points, des lignes ou des polygones pour délimiter les objets. Chaque entité du territoire est définie géométriquement et enregistrée sous la forme de coordonnées (X,Y). Les objets vecteurs couvrent l'espace géographique d'une manière discontinue car seules les portions porteuses d'objets sont saisies numériquement. Par exemple, un remblai, une route, un lac ou une habitation sont représentés sous la forme d'objets géoréférencés, c'est-à-dire repérables dans l'espace par leurs coordonnées (X,Y) ;
- dans la structure matricielle, toute l'étendue du territoire étudié est découpée sous la forme d'une grille composée de cellules de tailles identiques appelées "pixels". La référence spatiale est définie par la position en lignes et en colonnes de chaque pixel. Une cellule reçoit une seule valeur numérique correspondant à un attribut. En matriciel, la forme d'un objet est décrite par un assemblage de cellules élémentaires, ce qui rend ce mode moins précis que le vectoriel. La matrice comprenant un remblai, un lac et une habitation est composée d'un ensemble de pixels auxquels sont attribués un code numérique correspondant à l'intersection entre l'objet et le pixel (fig 1.22).



La différence entre le vecteur et le raster ne tient pas seulement au format de fichier informatique. En mode vectoriel, les objets représentés sont déjà connus et le rôle du logiciel sera de les interroger et de les mettre en relation. Inversement, en matriciel, on ne connaît généralement pas l'information et une partie de l'opération consiste à reconnaître et à identifier les objets.

Cette diversité de format implique également des modes de traitement de requêtes différents. En raster, l'information se présente fondamentalement sous la forme d'un tableau de nombres décrivant des pixels. Potentiellement, toute analyse spatiale numérique portant sur des aires de taille supérieure à la cellule est envisageable : analyse statistique et géostatistique, interpolation et échantillonnage, ... La même sont envisageables la modélisation et la simulation spatiale numérique (ex : MNT). En mode raster, les requêtes adressées au système sont donc essentiellement numériques (Charre *et al.*, 1991). En mode vectoriel, elles sont de type logique et spatial parce qu'à chaque objet représenté, c'est un ensemble d'attributs alphanumériques (et non numériques) qui sont attribués. Ces deux formats ont donc des fonctions spécifiques. Avec le mode vecteur, on pratique davantage la requête et la réponse cartographique, le mode raster étant plus approprié à l'analyse et au traitement.

Chaque système a ses avantages et ses inconvénients, c'est pourquoi ils se complètent.

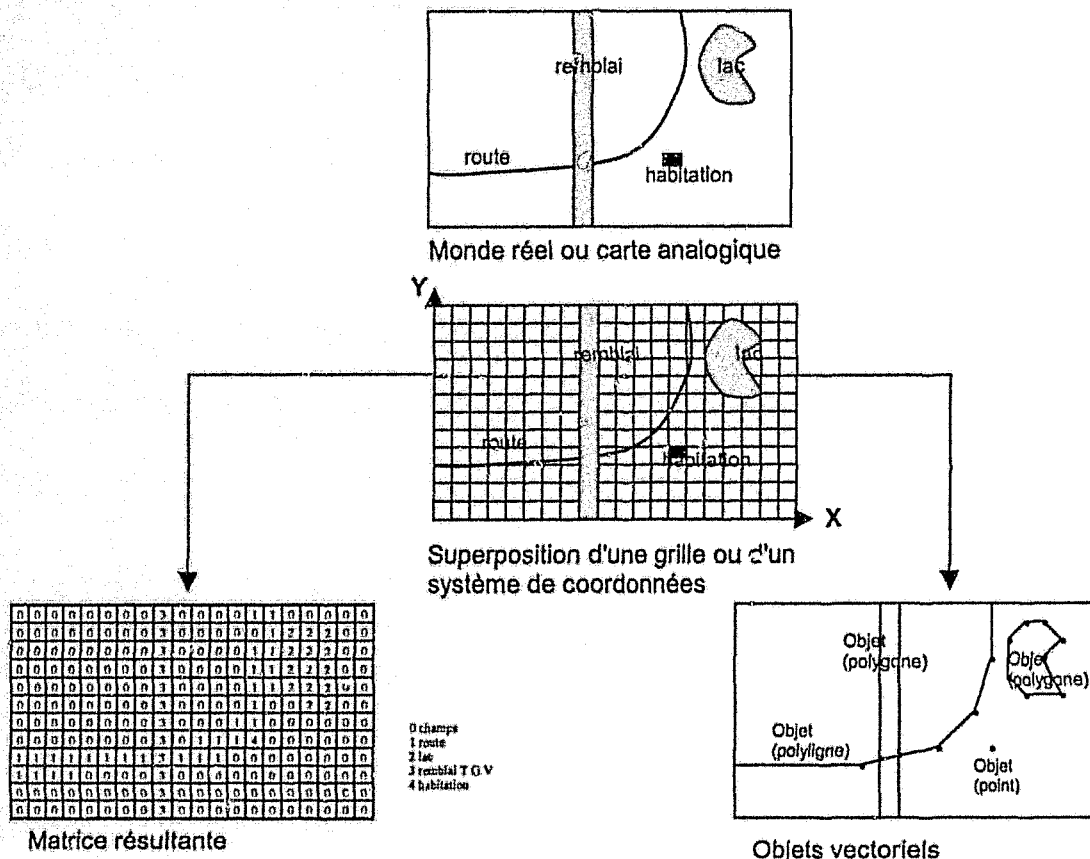


Fig 1.22 : Exemple de formats matriciel et vectoriel (adapté du schéma de Thériault, 1996).

## 4.2 Combinaison des deux formats

Dans la pratique, combiner les deux formats n'est pas aisé, car mis à part la saisie de documents de base - *scan des fonds raster pour certains logiciels vectoriels* - la plupart des logiciels gèrent l'un ou l'autre et non les deux (ex : Mapinfo, Winimage, ...). Or, dans certains domaines, il est nécessaire de traiter l'information sous les deux formats pour mettre en place un SIG. Pour une étude en climatologie locale, nous avons besoin du mode matriciel pour réaliser le traitement de certaines variables météorologiques (interpolation de données numériques) et les cartes finales doivent être en vecteur afin d'obtenir la précision nécessaire à ce niveau d'échelle.

La situation idéale est de disposer des deux types de SIG. Dans le cas contraire, un des atouts du SIG est de ne pas être constitué d'un module unique mais d'un ensemble de logiciels (Mapinfo, Excel, Surfer) traitant de l'acquisition de données, des statistiques, de l'interpolation spatiale ou de la cartographie. Ainsi, l'utilisation de programmes informatiques externes donne au système de nouvelles fonctions et améliore le système. *"Par exemple, les SIG ont besoin de modèles de répartition spatiale en particulier pour créer des informations manquantes. Pour être intéressants, ils demandent une exhaustivité spatiale de l'information. Ils suscitent donc l'interpolation qui ne peut se faire sans des modèles de répartition spatiale. Impossible d'intégrer des données climatiques dans un SIG sans essayer de résoudre le vieux problème de la cartographie des éléments climatiques. Il faut procéder à des interpolations spatiales pour définir les valeurs de ces éléments climatiques"*(Charre, 1994).

La mise en relation de fichiers d'origines diverses est réalisable si les formats sont "rendus" compatibles et surtout si les informations ont les mêmes références géographiques ; c'est l'élément de liaison.

## 4.3 Différentes étapes de la modélisation par SIG

Le SIG est le moyen d'extrapoler de façon spatiale des données obtenues soit par des observations, soit par des mesures sur le terrain. Il faut donc disposer à la base, d'un support représentant le territoire et d'une série de données caractérisant les informations à modéliser.

### 4.3.1 Les données géographiques : graphiques et attributaires

L'utilisation d'un SIG, qu'il soit vecteur ou raster, n'est concevable qu'avec un fond représentant le secteur étudié. Les supports, appelés "données graphiques" sont généralement des documents en plan (cartes, photographies aériennes, ...) ou des fichiers numériques (image satellite, radar, ...). Scannés ou numérisés et géoréférencés suivant une projection géographique, ils servent à repérer et à définir l'information liée à l'occupation du sol.

A chaque entité géographique déterminée suivant les "données graphiques", on associe des "données attributaires". Recueillies par des observations sur le terrain ou par l'intermédiaire de documents (ex : INSEE), ces éléments renseignent chaque objet géographique (ex: type de voies de communication, nature des cultures, ...). Par exemple, les supports graphiques sont les cartes IGN 1/25000 (Scan25 n° S083049 Salon-nord, S083048

Lambesc), une photographie aérienne du nord de la commune de Mallemort (AERIAL, juillet 1998) ainsi que le cadastre au 1/1000 des communes de Mallemort et de Senas. Les limites de l'emprise SNCF, et les points X,Y,Z de localisation du remblai de la LGV sont intégrés dans le SIG grâce aux documents fournis par la SNCF Il s'agit du tracé en plan et du profil en long à l'échelle du 1/1000.

Après avoir représenté l'occupation du sol à partir des supports graphiques, une observation sur le terrain permet d'apporter ou de préciser une information à chaque objet géographique. Par exemple, chaque parcelle agricole est assimilée à un fichier informatique comprenant le type de culture (espèce, variété, âge de l'arbre), la taille des parcelles, la présence ou non de système d'irrigation et le nom du propriétaire (cette dernière information n'est pas utilisée ici, mais elle nous a servi pour demander les diverses autorisations et pour une enquête annexe). Les haies brise-vent ont également été inscrites dans un répertoire informatique comprenant leur nature, leur hauteur, leur perméabilité et leur homogénéité.

Une fois la "géobase" établie, les valeurs thématiques peuvent être intégrées dans le modèle. Ces informations, faisant suite à des mesures expérimentales, doivent correspondre le plus possible à la réalité. La combinaison de ces données avec la géobase permettra de faire des traitements thématiques. Chaque requête est définie en fonction du résultat escompté, c'est-à-dire que les valeurs à mettre en relation avec l'occupation du sol sont choisies suivant le facteur à extrapoler. Par exemple, pour connaître les parcelles fruitières les plus exposées au risque gélif, on combinera un champ thermique issu de l'interpolation des données "terrain" avec la couche des variétés fruitières.

#### 4.3.2 Intégration des données météorologiques

Modéliser les résultats météorologiques expérimentaux est beaucoup plus compliqué que d'attribuer de simples informations à des parcelles agricoles (ex : type de cultures). Tout d'abord, ces données ne sont pas réparties régulièrement sur tout le site : une étape intermédiaire de traitements supplémentaires est souvent nécessaire. De plus, les mesures étant effectuées à des échelles spatiales différentes, on obtient, sur un même point, des informations diverses qu'il faut ensuite mettre en relation.

Tous les paramètres météorologiques étudiés ne peuvent pas être abordés de la même manière - *formats différents, modes de traitement différents* -, mais l'objectif reste le même, à savoir cartographier à une échelle fine les secteurs à risques météorologiques pour l'agriculture, en particulier ceux occasionnés ou accentués par l'implantation de l'ouvrage en remblai.

- Pour l'extrapolation des données liées au gel printanier, les informations obtenues à plusieurs niveaux d'échelle sont gérées différemment. La répartition des températures sur l'ensemble du site est modélisée avec un logiciel d'interpolation spatiale puis exportée dans le logiciel vectoriel sous un format raster par l'intermédiaire d'une « passerelle informatique ». L'interpolation spatiale des données (mesures météorologiques et altitudes) consiste à calculer, par le biais de méthodes statistiques, des valeurs estimées à partir de points réels.

Parmi les méthodes d'interpolation proposées par le logiciel Surfer, le Krigeage<sup>5</sup> semble être la mieux adaptée pour réaliser les champs de températures et d'altitudes (MNT). Mais, quelque soit la méthode employée, il ne faut pas oublier que le résultat obtenu, n'est qu'une estimation de la variable traitée et non pas une valeur réelle.

L'influence des éléments du milieu sur les masses d'air, à l'échelle parcellaire, est exprimée en vecteur (ex : accumulation d'air froid en amont d'une haie imperméable). La combinaison de ces deux types d'information engendre une cartographie des secteurs à incidences climatiques en fonction des conditions atmosphériques de la situation gélive et des paramètres du milieu. Par exemple, en situation gélive de type radiative, les températures obtenues à l'échelle *mésolocale* sont interpolées par Krigeage et intégrées sous forme matricielle dans le SIG alors que l'accumulation d'air froid en amont des haies brise-vent est représentée sous forme vectorielle.

• Pour l'extrapolation des valeurs se rapportant au mistral, seul le mode vectoriel est utilisé. Il s'agit dans un premier temps de délimiter les secteurs protégés par les haies brise-vent, puis d'inclure les zones où le vent est manifestement influencé par le remblai.

Les zones à risque cartographiées ne sont pas des entités géographiques bien définies mais le résultat d'une série d'extrapolation de données. Le SIG est considéré comme un moyen de « retranscrire spatialement la réalité » et est, à ce titre, un outil intéressant pour la modélisation spatiale. Cependant, il a l'inconvénient de recopier les erreurs accumulées lors des phases précédentes (mesures météorologiques) et lors des différentes étapes de l'extrapolation (interpolation des températures, manque de précision du raster, ...). Même si le SIG est un outil intéressant pour la modélisation spatiale, il contient un certain nombre d'insuffisances non négligeables.

#### 4.3.3 Les limites du SIG

Ses lacunes portent essentiellement sur la précision et l'exactitude des informations cartographiées. La majorité d'entre elles ne sont pas liées au système lui-même mais résultent de la saisie d'information. *« La précision indique la résolution avec laquelle on peut mesurer le phénomène avec un instrument ou un procédé quelconque ... L'exactitude d'une donnée correspond à la conformité de l'information par rapport à la réalité ... Ces erreurs sont donc systématiques et biaisent la perception de la réalité »* (Chrisman, 1990 et 1991).

Le problème de l'accumulation possible d'erreurs au cours de l'expérimentation sur le terrain a été largement développé (cf § 3.2). Il est néanmoins nécessaire de bien contrôler les bases de données pour limiter l'inexactitude des informations géographiques. Durant les étapes de la construction d'un SIG, on rencontre une succession d'éléments susceptibles de fausser les résultats. Les erreurs à la source sont très fréquentes. La qualité des documents "géobase", la résolution du scanner, la précision du calage sont autant de facteurs qui peuvent entraîner des imperfections dès l'origine du procédé. Par exemple, la fonction de superposition du SIG mettra en valeur les problèmes de raccordements.

<sup>5</sup> Le choix du Krigeage comme méthode d'interpolation spatiale des données est expliqué en détails dans la partie 4 consacrée à la modélisation.

Les erreurs liées à la fonction de traitement tiennent plus aux insuffisances des logiciels. En effet, étant donné qu'aucun n'assure de manière satisfaisante la transformation de raster en vecteur et qu'aucun n'aie de fonctionnalité cohérente pour les deux modes, les opérations visant à les combiner peuvent engendrer des erreurs, notamment lors de la mise en relation de données d'échelles diverses. Vu la différence de précision de certaines valeurs allant du mètre à la dizaine de mètres, il est tout à fait possible qu'après une opération de type analytique, des inexactitudes apparaissent.

Après avoir hiérarchisé les obstacles responsables de la variabilité climatique locale et mis en place les protocoles de mesures (météorologiques et agronomiques), la dernière phase consiste à élaborer une technique de modélisation permettant d'extrapoler spatialement les différentes données obtenues antérieurement. Le but est de réaliser une synthèse cartographique des phénomènes météorologiques étudiés et de définir les secteurs où le risque climatique, pour les cultures fruitières, est accentué par la LGV. Le SIG semble être l'outil adéquat pour ce genre de modélisation et surtout pour combiner des informations de natures et de niveaux différents, et donc pour prendre en compte l'imbrication des échelles. Comme l'élaboration de l'expérimentation terrain, la construction du SIG doit être minutieuse et réfléchie pour limiter certaines erreurs qui en dernier lieu fausseraient les résultats.

## PARTIE 2 : VARIABILITE METEOROLOGIQUE AUX ECHELLES FINES

---

Partie 2 : Variabilité météorologique aux échelles fines

uuuuuu<sup>1</sup>

iiiiii<sup>2</sup>

ppppp<sup>3</sup>

pppppp<sup>4</sup> pppppp<sup>5</sup>

- 
- 1
  - 2
  - 3
  - 4
  - 5

La variabilité spatiale des basses températures s'est avérée beaucoup plus complexe à étudier que celle du mistral (c'est pourquoi l'essentiel de cette partie est consacrée au gel). Cela s'explique pour plusieurs raisons :

- ♦ les températures nocturnes sont influencées par d'autres variables météorologiques telles que le vent, l'humidité relative ou les différents types de rayonnement. Ces différents paramètres météorologiques subissent également l'influence des obstacles du milieu. Par conséquent, pour étudier la variabilité spatiale des températures, nous devons prendre en compte l'influence des différents éléments du milieu sur les températures mais aussi sur les autres variables météorologiques. Pour le mistral, seul l'écoulement du vent subit des fluctuations au contact des obstacles du milieu ;
- ♦ la répartition spatiale des températures varie selon les conditions atmosphériques de la nuit de gel : radiatif (anticyclonique, vent faible, ciel clair), advectif (dépressionnaire, vent supérieur à 3 m/s) ou mixte (arrêt de mistral) ;
- ♦ toute étude d'impact sur l'environnement doit se dérouler en deux phases : analyser la situation initiale puis étudier les modifications engendrées par l'implantation de l'obstacle. Or, dans le cas du gel printanier, nous ne disposons pas de relevés météorologiques sur le site initial. Dans cette situation, évaluer le rôle de l'obstacle SNCF sur le comportement des températures négatives, ne peut se faire qu'en mettant au point une technique d'analyse structurée définissant chronologiquement le rôle de chaque élément du milieu (*échelle locale, mésolocale et microclimatique*). Pour l'étude d'impact du remblai de la LGV sur l'écoulement du mistral, l'expérimentation ayant commencé avant le début des travaux, nous avons fait des mesures sur le site initial, puis à différentes phases de la construction de la LGV.

L'expérimentation météorologique sur l'impact climatique de la LGV est réalisée selon un emboîtement cohérent des échelles spatiales, c'est-à-dire de l'échelle la plus vaste à la plus fine. Toutefois, avant d'aborder cette partie, nous consacrons une partie spécifique à l'influence microclimatique des haies brise-vent. La forte variabilité microclimatique engendrée par les haies pouvant être apparentée à des phénomènes d'échelles plus vastes, nous avons analysé l'action des divers types de haies brise-vent sur le refroidissement nocturne et sur l'écoulement du mistral. La majorité des parcelles tests choisies est éloignée de la LGV de manière à limiter son influence.





## 1 MICROCLIMAT ENGENDRE PAR LES HAIES BRISE-VENT

---

### 1.1 Les effets des brise-vent en situation gélive

Initialement implantés pour protéger les cultures de l'action néfaste du vent (Gade, 1978), les brise-vent modifient les conditions climatiques aux échelles fines et influent soit positivement, soit négativement sur les températures en situation de gel.

Le brise-vent est un élément déterminant pour la compréhension du gel à l'échelle parcellaire. Cependant, les effets qu'il peut avoir sur la température de l'air au cours d'une nuit gélive sont difficiles à évaluer car ils dépendent de plusieurs facteurs : *les caractéristiques de la haie (perméabilité, hauteur, nature), le rayonnement atmosphérique (RA) et terrestre (RT) nocturne, l'humidité de l'air, la vitesse et la direction du vent*. Les conditions météorologiques diurnes antérieures à la nuit gélive ainsi que la topographie - *notamment l'orientation de la haie par rapport aux écoulements nocturnes* - sont également à prendre en compte.

Après un bref rappel des effets des haies sur les variables météorologiques, nous analyserons les résultats expérimentaux réalisés sur des parcelles encadrées de haies brise-vent suivant des situations de gels différentes. La variabilité spatiale des températures nocturnes est étudiée par l'intermédiaire de mesures au niveau de l'air, du sol et du végétal.

#### 1.1.1 Les connaissances actuelles sur l'action des haies en situation gélive

Les conditions météorologiques auxquelles la végétation est exposée varient dans l'espace. Ces variations, peu accentuées sur les parcelles en zone plane et ouverte, sont importantes sur des terrains accidentés (pente, cuvette) et dans des vergers encadrés de haies. Le brise-vent, en modifiant la vitesse du vent, les bilans radiatif (diurne et nocturne) et hydrique, agit sur le comportement des températures, notamment en période de gel printanier. Plusieurs chercheurs agronomes (INRA, DDA, CNRS, ...) ont étudié l'influence des haies sur les différents paramètres météorologiques pouvant provoquer le gel des cultures. D'après Guyot (1987), le risque gélif à proximité d'une haie dépend des caractéristiques de la haie (perméabilité, homogénéité, ...) et de sa position par rapport aux écoulements catabatiques (possibilité d'accumulation d'air froid). En fonction de cela, les pratiques agricoles doivent être modifiées afin d'optimiser la rentabilité agricole et de profiter des nombreux effets positifs des haies. Par exemple, l'arboriculteur doit éviter de planter une variété sensible au gel sur une parcelle dont la disposition de la haie limite l'écoulement de l'air froid nocturne (Ringuelet, 1969 ; Mazerand, 1969 ; Guineadeau, 1981 ; Castaner, 1984 ; Simon, 1988 ; Soltner, 1988). Des travaux spécifiques aux variations météorologiques en milieu clos (Guyot *et al.*, 1976 ; Verbrugghes, 1989 ; Guyot, 1991) et à la résistance au gel des organes végétaux des arbres fruitiers (Foulonneau, 1964 et 1967 ; Bonhomme et Rageau, 1989 ; Cellier, 1989 ; Leddet et Dereudre, 1993 ; Ballard, 1997) apportent des connaissances sur l'action des brise-vent en situation gélive.

#### 1.1.1.1 Les effets des brise-vent sur le bilan radiatif : des modifications inégales suivant la position sur la parcelle

Pour le bilan radiatif - *rayonnement reçu par la terre (solaire, atmosphérique) et rayonnement réémis par la terre en direction de l'espace (sol)* -, la haie brise-vent modifie l'apport énergétique solaire direct et diffus ("effet de masque") ainsi que le rayonnement atmosphérique et terrestre.

Le brise-vent affecte le rayonnement direct et diffus à l'intérieur d'une parcelle. Par ciel clair, il a deux effets :

- d'une part, l'écran qu'il forme limite l'énergie solaire reçue au sol du côté opposé au soleil. *"Il se forme une zone d'ombre dont l'extension dépend de la géométrie de la haie (hauteur, azimut, porosité optique, ...), cette zone d'ombre ne dépasse pas une fois la hauteur d'une haie Est - Ouest en été"* (Simon, 1988 ; Verbrugghes, 1989) ;

- d'autre part, il accentue la quantité d'énergie reçue par réflexion, au niveau du sol du côté exposé au soleil (fig 2.1). Cependant, par temps couvert, la haie, en masquant une partie du ciel, diminue le rayonnement global atteignant le sol. En effet, le rayonnement diffus qui représente entre 80 et 100% du rayonnement global, est fortement réduit ; environ 10% sur une distance égale à une fois la hauteur de la haie (Guyot et Verbrugghes, 1976).

Au niveau du rayonnement de grande longueur d'onde, des études théoriques ont démontré que les haies augmentent le rayonnement infrarouge thermique sur une distance comprise entre 3 et 4 fois leur hauteur <sup>6</sup>(Chiapale, 1975). En effet, le rayonnement thermique des haies, dont la température de surface est supérieure à la température radiative de l'atmosphère, s'ajoute au rayonnement atmosphérique reçu par le sol (fig 2.2). Cet écart est d'autant plus important que le ciel est dégagé et l'air sec (Guyot, 1991 et 1997).

Le rayonnement thermique émis par le substrat est fonction de sa température. La haie, en agissant sur les apports radiatifs et sur les échanges d'énergie mécanique, modifie la répartition spatiale du rayonnement émis par le sol. Par conséquent, la température de surface du substrat sera d'autant plus élevée que les apports radiatifs (soleil et haie) seront importants et la vitesse du vent réduite.

En conclusion, les haies brise-vent limitent l'ensoleillement direct dans la zone d'ombre portée et l'augmentent par réflexion dans la zone exposée au soleil. Dans le cas du rayonnement de grande longueur d'onde (infrarouge) émis par l'atmosphère, par le sol ou par les haies elles-mêmes, elles en réémettent une partie vers le sol, augmentant le gain énergétique à proximité des haies. D'après Guyot (1991), il se produit en quelque sorte, sur une distance d'environ 4 fois la hauteur des haies (4H), un "piégeage" de l'énergie radiative par les haies, un peu comparable à un "effet de serre" ou au « sky-view factor » de l'effet urbain (fig 2.3).

<sup>6</sup> La distance d'influence des haies variant dans la majorité des cas en fonction de leur hauteur, elle est exprimée en nombre de fois la hauteur de la haie ; par exemple 2H pour un brise-vent de 10m représente une longueur de 20m (annexe 4).

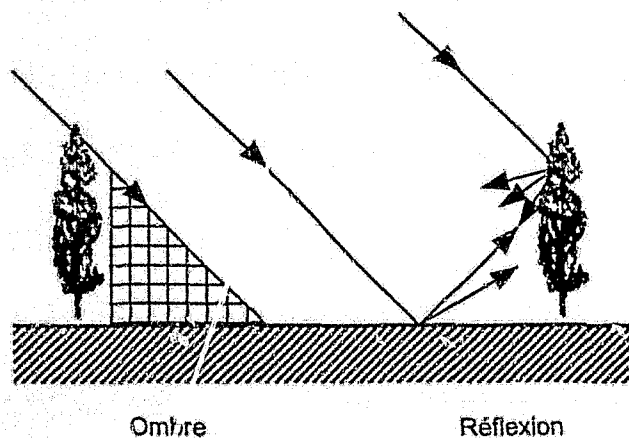


Fig 2.1 : Schéma illustrant les effets des brise-vent à l'échelle parcellaire sur les échanges radiatifs de courte longueur d'onde (d'après Guyot, 1991).

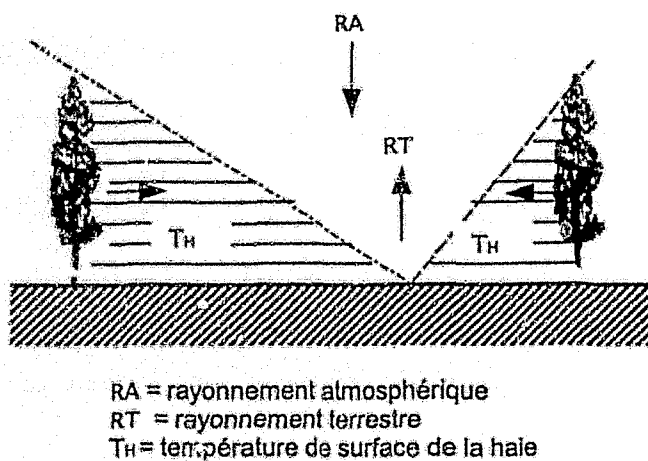
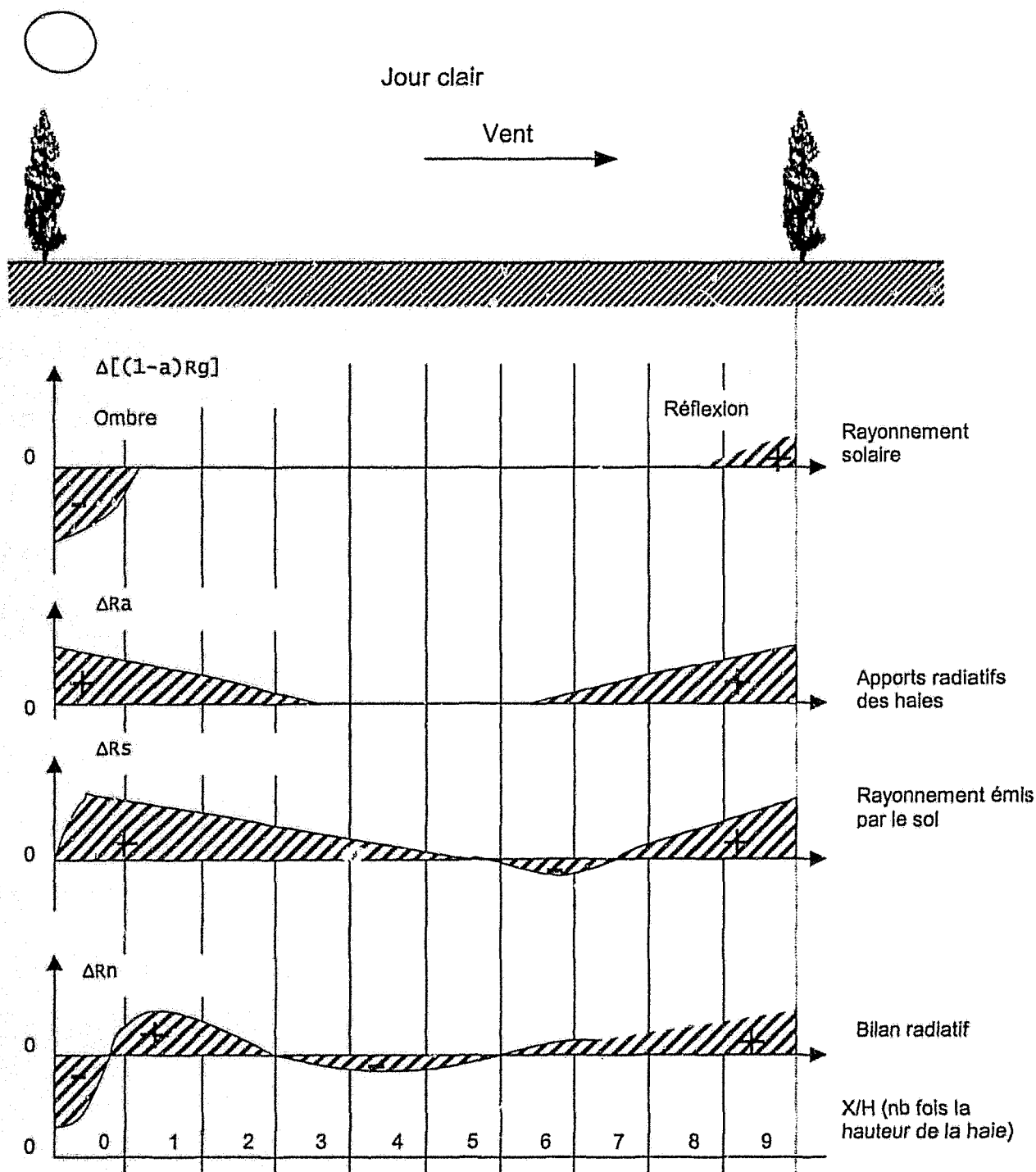


Fig 2.2 : Schéma illustrant les effets des brise-vent à l'échelle parcellaire sur les échanges radiatifs de grande longueur d'onde (d'après Guyot, 1991).



La différence de rayonnement net entre la parcelle bordée de haies et celle ouverte est donnée par  $\Delta R_n = \Delta(1-a)R_g + \Delta R_a - \Delta R_s$

Fig 2.3 : Représentation schématique des effets des brise-vent sur le bilan radiatif diurne au cours d'une belle journée (d'après Guyot *et al.*, 1987<sup>7</sup>).

<sup>7</sup> référence faite par Guyot G. dans « les effets microclimatiques des brise-vent et des aménagements régionaux » (1991).

Les gelées pour les cultures se produisant en fin de nuit, on pourrait *a priori* en déduire que seules les modifications du bilan radiatif nocturne sont intéressantes. Or, il faut prendre en compte le bilan diurne, parce que les différences d'apports énergétiques du jour ont une grande influence sur les déperditions nocturnes. En effet, les parties de la parcelle masquées par la haie subissent un déficit énergétique diurne par rapport au côté exposé au soleil.

Pour le bilan radiatif nocturne, on constate que lorsque le ciel est dégagé et que le vent est très faible, les brise-vent diminuent les déperditions énergétiques par réémission du rayonnement vers le sol. D'après plusieurs expérimentations, il semble que l'apport radiatif des haies apparaît sur une distance égale à 3 fois leur hauteur (Verbrugghe, 1989 ; Guyot, 1991 ; Soltner, 1994). Mais, ceci n'est valable que par temps clair et calme, car le vent agit sur le rayonnement émis par le sol (fig 2.4).

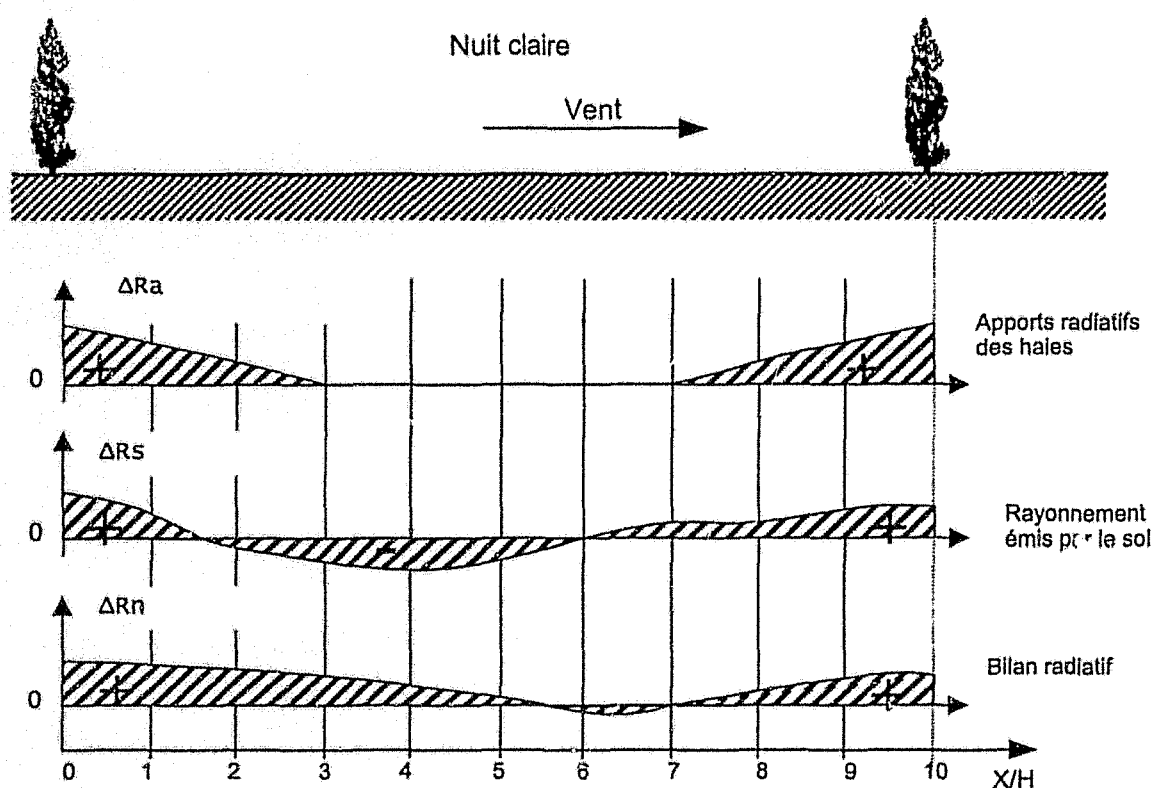


Fig 2.4 : Représentation schématique des effets des brise-vent sur le bilan radiatif au cours d'une nuit claire avec vent (d'après Guyot *et al.*, 1987).

Les brise-vent influent sur le bilan radiatif : ils augmentent l'apport énergétique sur la parcelle mais de façon très hétérogène. L'action d'une haie sur le bilan radiatif est constatée ici à l'échelle parcellaire, mais elle peut aussi se retrouver à une échelle plus vaste. Par exemple, une forte densité de haies peut influencer l'albédo d'une région et en augmenter l'apport énergétique (Damagnez, 1976 ; Guyot, 1991).

### 1.1.1.2 Les effets des brise-vent sur l'humidité

*"L'humidité de l'air dépend du flux de vapeur d'eau émis par le couvert végétal et de la vitesse avec laquelle celui-ci est évacué par les mouvements turbulents et convectifs de l'atmosphère"* (Guyot, et al., 1976). En ralentissant le vent et en évaporant l'eau puisée dans les couches profondes du sol, les arbres maintiennent les masses d'air superficielles plus humides que dans d'autres milieux. On le remarque tout particulièrement à la forte abondance de rosée. Par nuit claire et calme, les diverses expérimentations montrent que l'humidité augmente de façon homogène sur les parcelles bordées de haies. Par contre, en situation advective, la tension de vapeur d'eau est répartie de façon plus ou moins hétérogène. Elle est donc plus importante immédiatement en aval de la haie dans la partie de la parcelle protégée du vent.

### 1.1.1.3 Les effets des brise-vent sur les températures : combinaison de tous les paramètres météorologiques

L'influence des brise-vent sur la température - *de l'air et du sol* - en situation gélive dépend des interactions entre les divers éléments composant le bilan radiatif, mais aussi de l'humidité de l'air et de la présence de vent.

En période diurne, les températures les plus élevées se situent dans la zone protégée du vent (entre 2 et 3H). L'hétérogénéité des températures résulte aussi de la position par rapport au soleil, elles sont beaucoup plus faibles dans la partie du verger située à l'ombre de la haie.

La nuit, par temps clair et calme (gel radiatif), la répartition des températures est fonction du bilan radiatif, le taux d'humidité étant homogène sur la totalité de la parcelle. Les parties du verger à proximité des haies sont, du fait de l'apport radiatif, les moins gélives et celles situées du côté de la haie exposée au soleil le sont encore moins. L'effet de la haie sur le bilan radiatif et sur les températures est particulièrement visible en cas de gelée blanche. Il n'est pas rare de constater l'absence de glace sur un sol enherbé aux abords de la haies (sur quelques rangs en général) car une partie des déperditions énergétiques sont réémises par le brise-vent vers le sol et la chute des températures est limitée (photo 3).

La présence de vent ne modifie en rien l'effet de l'apport énergétique aux abords des haies même si celui-ci engendre également un gain thermique. Dans les secteurs non protégés par le brise-vent, le vent brasse l'air froid en formation au niveau du sol et limite la baisse des températures. En revanche, en aval de la haie, le ralentissement du vent favorise le refroidissement nocturne (entre 2 et 6 à 8H) (fig 2.5). D'après Verbrugghes (1989), la zone située entre 0 et 1h (immédiatement en aval de la haie) bénéficie de l'écoulement à travers la haie ; le risque de gel est atténué. Il est important de préciser que dans cet exemple, il s'agit d'une haie perméable.

Les conséquences sont les mêmes au sol que dans l'air. *"La température de la couche superficielle d'un sol nu (0-10cm), à l'aval d'un brise-vent, dépend non seulement de l'amplitude thermique à la surface mais également de la durée relative des périodes de réchauffement et de refroidissement. Ainsi, lorsque les jours sont plus longs que les nuits (printemps), le sol se réchauffe plus vite que dans une zone dégagée, ce qui permet un départ plus rapide de la végétation"* (Guyot, 1991).

Les brise-vent accroissent les amplitudes thermiques en augmentant les maxima et en diminuant les minima. Si l'on compare ces températures à celles d'une parcelle ouverte, on constate qu'elles ne varient pas de façon homogène, ce qui induit des risques gélifs très localisés. Mais les effets changent selon les caractéristiques des haies (nature, perméabilité, ...) et selon leur position par rapport au relief.

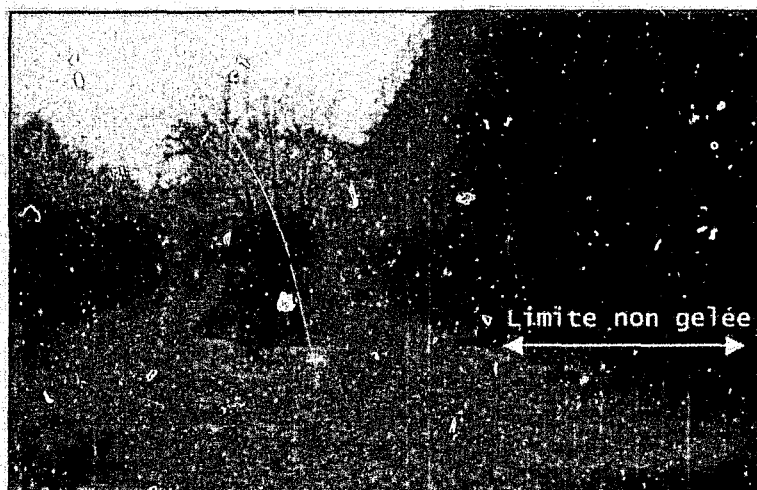


Photo 3 : Effet d'une haie imperméable sur la gelée blanche : 26/01/99 vers 8h00 (cliché Quénol H.).

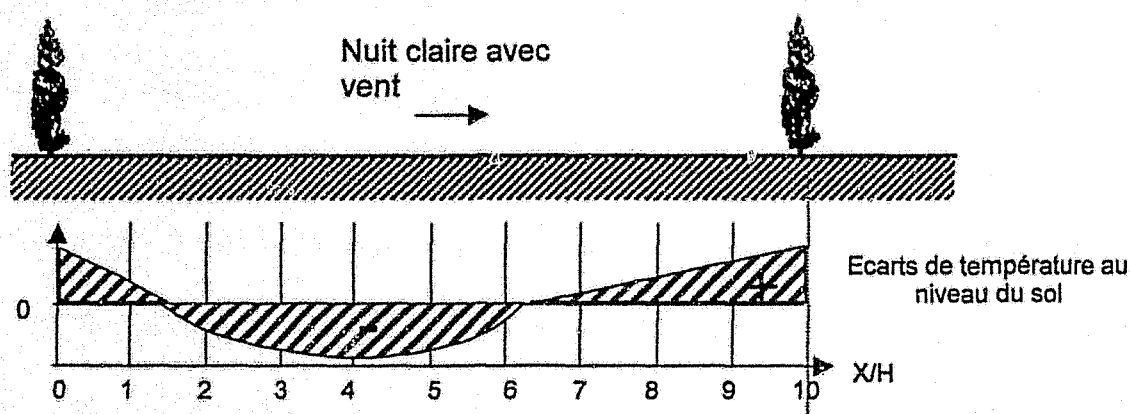


Fig 2.5 : Représentation des températures nocturnes par temps clair avec vent (d'après Guyot, 1991).

#### 1.1.1.4 Type de haie et position par rapport à la pente : limitation ou accentuation du risque gélif

Il existe deux grands types de haies : les brise-vent "naturels" composés d'une rangée d'arbres et les brise-vent artificiels correspondant à des obstacles plus ou moins perméables en matières plastiques, d'épaisseur négligeable. Dans les deux cas, le niveau de protection contre le vent dépend de la nature, de la hauteur et de la porosité de la haie. De même pour le gel, selon ses caractéristiques, la haie modifie de façon différente le bilan radiatif, l'humidité et les températures.



Nature et perméabilité du brise-vent sont des facteurs déterminants à l'action des brise-vent sur les températures : une haie de feuillus étant dépourvue de feuilles au printemps, on peut admettre qu'en situation de gel par temps clair et venté, sa perméabilité permette l'écoulement de l'air sur la parcelle, ce qui limitera le refroidissement nocturne par brassage. Dans le cas d'une haie de cyprès imperméable, c'est l'inverse, - *action positive au niveau du rayonnement infrarouge et négative au niveau du brassage de l'air* - du fait de la masse compacte du brise-vent. Par conséquent, le microclimat engendré par une haie brise-vent dépend fortement des caractéristiques des arbres qui la composent.

Nous avons évoqué l'action du brise-vent sur les basses températures sans prendre en compte sa position par rapport au relief. Par temps radiatif sans vent, l'air froid présent au niveau du sol est drainé suivant les lignes de pente et toute forme d'obstacle favorisant son ralentissement et sa stagnation a pour conséquence une aggravation locale du gel. La haie brise-vent disposée dans le sens des écoulements peut provoquer, en amont, un véritable lac d'air froid susceptible de recouvrir une partie de la végétation. Ici, le rayonnement infrarouge réémis par les haies a une action négligeable par rapport à l'accumulation de l'air froid. Inversement, si la haie est disposée parallèlement aux écoulements ou en amont de la parcelle, les conséquences sur les températures sont plutôt positives. D'ailleurs, l'implantation de brise-vent en amont d'une parcelle est préconisée comme technique de lutte passive contre le gel (Ctifl, 1998). En effet, dans les zones de reliefs même légers, il est important de prévenir ou au moins de limiter les risques d'arrivée d'air froid produit en amont de la parcelle (ex : champ herbeux). Il est, à cette fin, utile d'installer ou de préserver des haies capables de ralentir, stopper ou détourner ces écoulements qui glissent au niveau du sol. On privilégiera des essences à feuilles persistantes augmentant la rugosité et faisant barrage même quand la végétation n'a pas encore redémarré (Ctifl, 1998).

Mais lorsque la haie est disposée à l'aval de la parcelle, il est souhaitable de faciliter l'évacuation de l'air froid vers l'extérieur (dans ce cas le problème peut se répercuter sur la parcelle située en aval). On doit donc éviter toute haie dense dans le bas des parcelles qui serait une barrière à tout écoulement d'air de l'intérieur vers l'extérieur (Geslin, 1956 ; Tabbart, 1965 ; Beltrando *et al.*, 1995 et 2000).

#### 1.1.1.5 Influence de la haie sur la croissance de la végétation : un facteur important pour les risques de gel

Comparé à celle d'une parcelle ouverte, la végétation d'un verger encadré de brise-vent a, du fait du gain énergétique obtenu, une croissance plus rapide et est plus vulnérable au risque de gel. A l'intérieur même de la parcelle, le niveau de croissance de la végétation est hétérogène. La végétation située côté ombre a généralement un retard de plusieurs jours (environ 3-7 jours sur notre terrain d'étude). Sachant que le gel des organes végétatifs des arbres fruitiers est fonction de l'état de leur croissance, un retard peut être un facteur d'hétérogénéité très important dans la répartition du gel sur une parcelle.

La répartition des basses températures sur une parcelle protégée par des brise-vent résulte donc d'un grand nombre de facteurs (météorologiques, morphologique, topographique, phénologique, ...). Les différents travaux portant sur l'effet des haies sur le bilan radiatif, le bilan hydrique et la température font apparaître un apport énergétique supérieur à celui d'un

verger ouvert. Cependant, ce gain n'est pas homogène sur toute la parcelle et certaines parties subissent, au contraire, des pertes propices au refroidissement nocturne. L'influence des brise-vent sur le gel n'est pas aisée à définir car il existe une multitude de situations et de sectorisations possibles. N'oublions pas que tous les paramètres agissant sur la répartition des températures sont en relation et il suffit que l'un d'entre eux varie pour que les autres soient influencés. De plus, certains facteurs agissant positivement sur le gel - *en limitant son occurrence* - interviennent négativement sur d'autres éléments. Prenons l'exemple de l'apport énergétique du côté ensoleillé de la parcelle : à première vue, il semble jouer un rôle positif en limitant les déperditions nocturnes. Or, en favorisant la précocité de la végétation, il augmente, le risque gélif car la fréquence du gel diminue du début vers la fin du printemps.

Des mesures expérimentales réalisées à l'échelle parcellaire ont pour objectif de déterminer l'influence des haies brise-vent sur le gel en prenant en compte toutes les composantes météorologiques ainsi que leurs interrelations. Elles sont intentionnellement effectuées pendant des situations gélives différentes afin de créer une banque de données capable de définir l'ensemble des microclimats engendrés par les haies brise-vent et ce, quelque soit le type de gel.

### 1.1.2 Résultats expérimentaux

#### 1.1.2.1 Sites et dispositifs expérimentaux

Plusieurs parcelles protégées par des brise-vent sont définies comme sites expérimentaux. Les vergers sont choisis en fonction des caractéristiques de la haie (perméable ou imperméable) et de sa position par rapport à la pente. Les parcelles sont toutes situées au sud du remblai ferroviaire (annexe 5).

Sur ces parcelles tests, on a disposé, à des points plus ou moins proches des haies, les capteurs de température de l'air et du sol, d'humidité relative, ainsi que de la direction et de la vitesse des écoulements (régionaux et locaux). Pour la plupart de ces mesures, les instruments sont placés à 1m50 du sol (hauteur moyenne des bourgeons). Afin de réaliser une stratification de l'air froid, l'utilisation de deux mâts permet d'obtenir des données jusqu'à une hauteur de 9m (annexe 6).

#### 1.1.2.2 Températures nocturnes de l'air : des variations suivant le type de gel, la position et la nature de la haie

D'après les recherches bibliographiques, les variations de températures dans un système de brise-vent sont principalement fonction du bilan radiatif (diurne et nocturne) et de la présence ou non du vent. Par conséquent, le comportement thermique de la parcelle sera différent suivant les conditions atmosphériques antérieures - *apport d'énergie solaire* - et durant la nuit de gel.

a) Nuit anticyclonique avec ciel clair et vent très faible ( $\leq 2$  m/s)

En situation radiative, l'influence de la haie sur les températures nocturnes varie suivant ses caractéristiques (perméable ou imperméable) et suivant sa position par rapport aux écoulements d'air froid. Plusieurs parcelles tests sont choisies en fonction de ces différents paramètres (annexe 6).

♦ haies imperméables non soumises à des arrivées d'air froid : un gain thermique en bordure de haies

Les mesures sont réalisées sur des parcelles à l'amont et à l'aval de haies de cyprès de 8 à 12 m de haut relativement imperméables de la base au sommet. Les capteurs sont disposés soit de façon à quadriller toute la parcelle, soit selon un axe perpendiculaire aux haies. La position des haies par rapport à la pente ne provoquant pas un blocage des écoulements nocturnes, c'est donc principalement l'impact des haies sur les déperditions énergétiques d'origine radiatives que nous étudions.

Le refroidissement nocturne par rayonnement est dû aux déperditions énergétiques du sol. Sur une parcelle ouverte, aucun élément ne perturbant le rayonnement, les températures sont homogènes. Dans un système de brise-vent, la haie modifie le microclimat en limitant partiellement les déperditions énergétiques par réémission du rayonnement vers le sol. La répétition des mesures a permis de constater que l'amplitude thermique entre la partie centrale de la parcelle et les rangs en bordure de haies est supérieure à 1°C.

En schématisant le comportement thermique sur une parcelle bordée de haies imperméables, on peut définir deux secteurs :

- Les rangs situés à proximité des haies (0-2H et 4-6H) où le refroidissement est atténué.

- La partie centrale de la parcelle (2-4H) où l'influence des brise-vent sur le rayonnement IR est beaucoup moins importante (annexe 4). Les résultats de certaines expérimentations démontrent que l'apport énergétique des haies atteint une distance équivalente à 3-4 fois la hauteur de la haie (Verbrugghes, 1989 ; Guyot, 1991 ; Soltner, 1994). Sur notre site, la longueur des parcelles tests (70 m en moyenne) ne permet pas de vérifier ces distances. Cependant, il est certain que le gain de chaleur baisse fortement au-delà de 2H.

La nuit radiative du 26 au 27 janvier 2000 (ciel clair, vitesse du vent observée inférieure à 2 m/s), nous constatons que les températures obtenues au centre de la parcelle cloisonnée (2.5H) sont comparables avec celles d'une parcelle ouverte<sup>8</sup>. Sur les points de mesures proches des haies (rangs 1 et 11), les températures sont plus élevées (moyenne d'environ 1°C) par rapport au milieu de la parcelle (fig 2.6).

<sup>8</sup> Cette information est importante pour le choix l'emplacement des points de mesures à l'échelle « mésolocale » (cf partie 1) où l'influence des haies brise-vent doit être limitée.

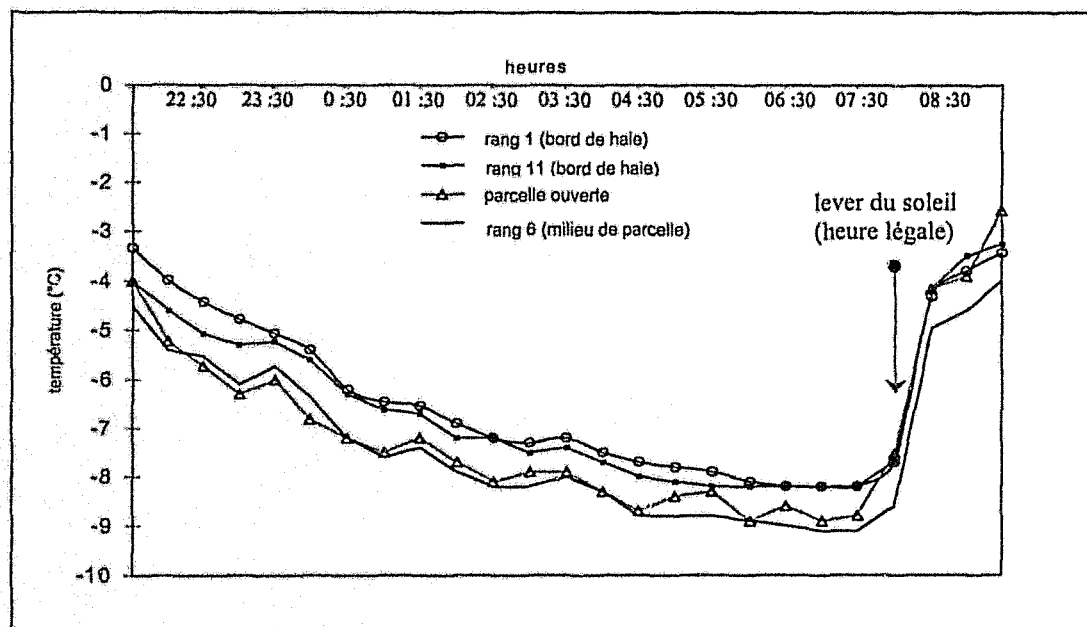


Fig 2.6 : Températures nocturnes en milieu clos (rang 1, 6 et 11) et ouvert en situation de gel radiatif : moyenne toutes les 30 mn suivant un pas de temps de 6 mn (26-27/01/00)

La haie semble avoir une influence négligeable sur le taux d'humidité relative. Durant la nuit du 02 au 03 février 1998, l'évolution du taux d'humidité agit sur les températures de façon similaire sur tous les points de la parcelle (fig 2.7). Avant que l'air soit saturé, la baisse de la température est forte, puis elle diminue après la saturation (les détails de cette nuit de mesures sont exposés dans l'annexe 7a).

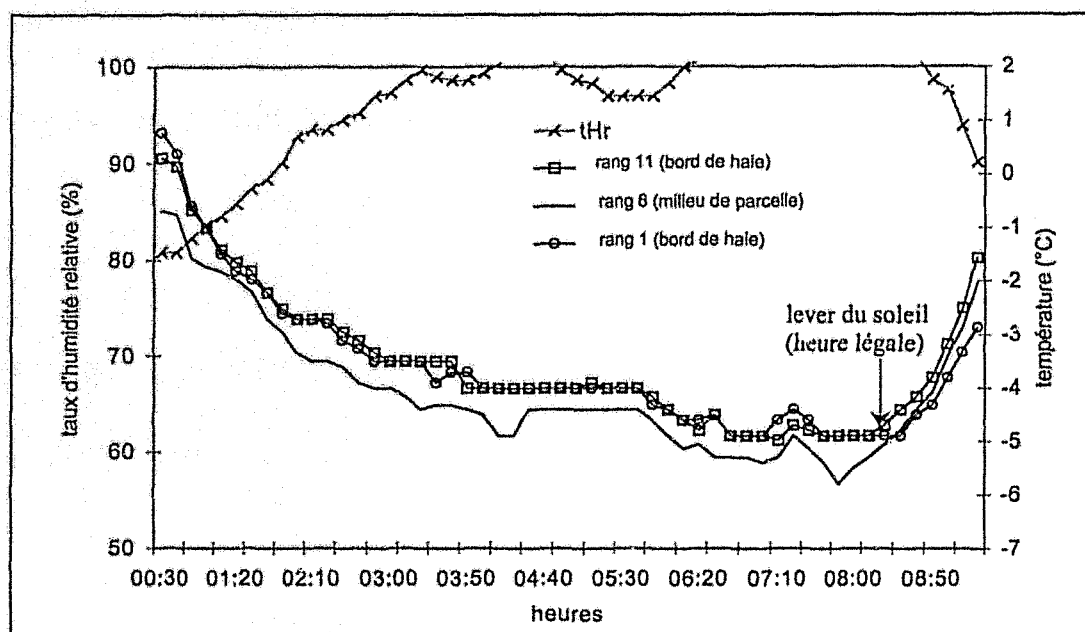


Fig 2.7 : Evolution des températures nocturnes et du taux d'humidité relative (tHr) en situation radiative sur une parcelle bordée de haies imperméables (parcelle n°1) : moyenne sur 10 mn avec un pas de temps de 2 mn (02-03/02/98).

L'apport énergétique diurne, qui n'est pas le même sur toute la parcelle (ombre), ne semble pas agir fortement sur les températures nocturnes. En effet, même si on note une petite différence en début de nuit entre le côté "ensoleillé" et "ombragé" de la haie, celle-ci disparaît au bout d'une ou deux heures (fig 2.8 ; annexe 7b). Par contre, au lever du soleil, l'amplitude thermique, entre la partie recevant les premiers rayons solaires et celle restant à l'ombre, peut atteindre jusqu'à 10°C (fig 2.9 ; annexe 7c). Cet effet de la haie sur le rayonnement solaire peut s'avérer très important sachant que les températures les plus froides et les plus dangereuses pour le végétal sont relevées au lever du jour.

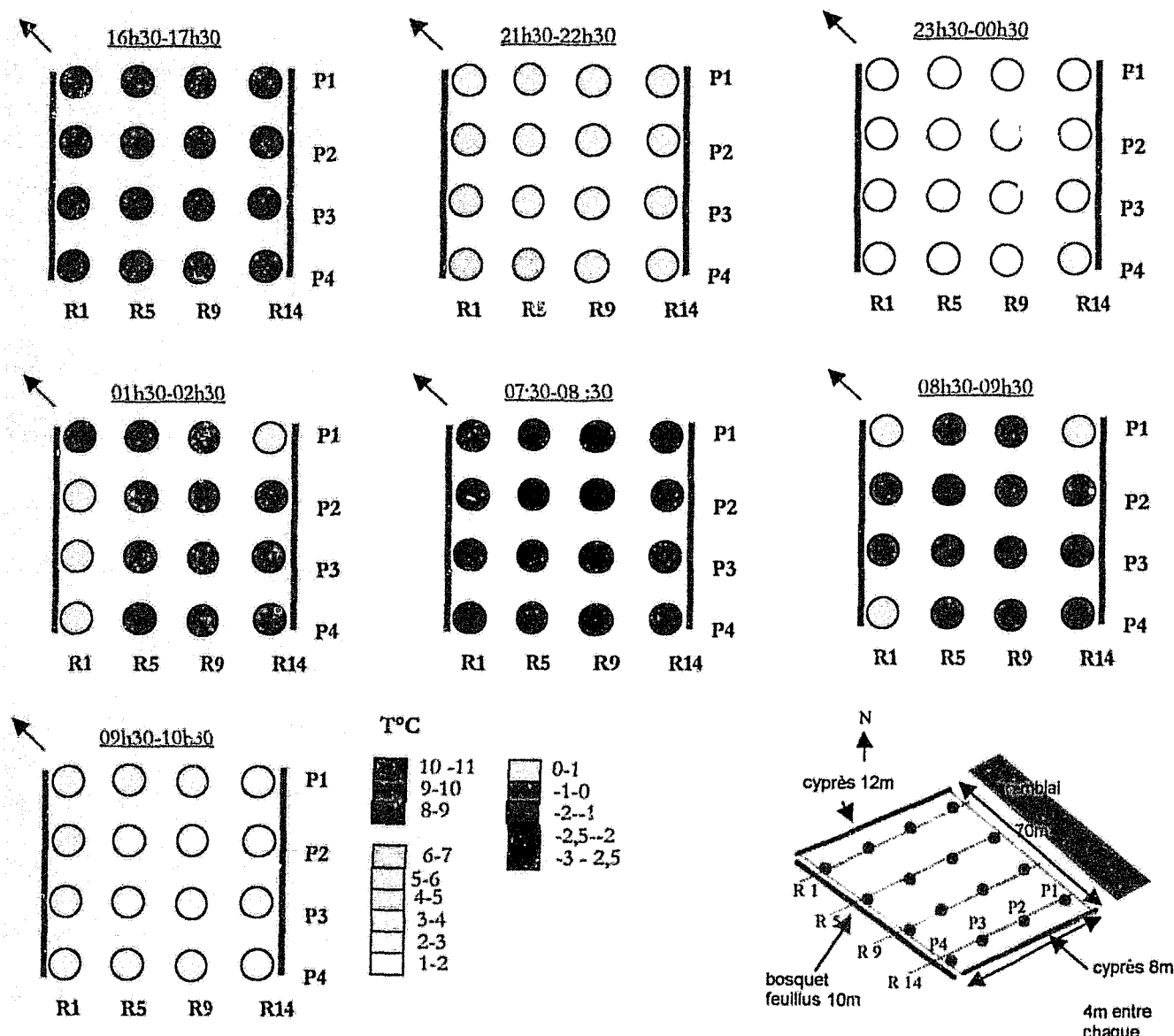


Fig 2.8 : Représentation surfacique des températures nocturnes (du coucher au lever du soleil) en milieu clos (parcelle n°3) en situation de gel radiatif : moyenne sur 2 mn calculée toutes les heures (25-26/01/99).

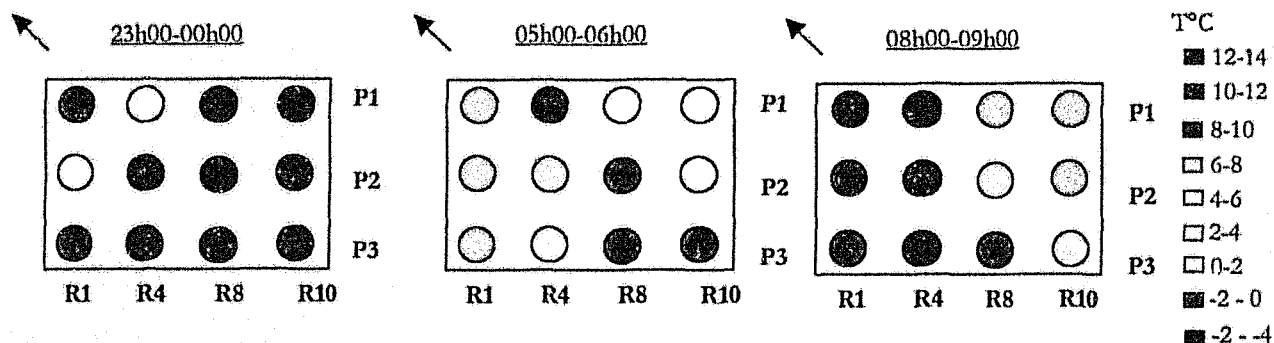


Fig 2.9 : Représentation par points de l'évolution des températures du lever du soleil (07h50 heure locale) au milieu de matinée sur une parcelle bordée de haies imperméables (parcelle n°3) : moyenne horaire avec un pas de temps de 2 mn (11-12/02/98).

Dans le cas où la haie brise-vent n'entrave pas les écoulements nocturnes, il semble qu'en situation anticyclonique, **seul l'effet de réémission du rayonnement infrarouge par la haie agit significativement sur le comportement des températures**. L'influence des haies sur le taux d'humidité relative et sur les différents rayonnements diurnes n'a pas de conséquence importante sur les températures nocturnes.

♦ haies perméables non soumises à des arrivées d'air froid

Que la haie soit perméable ou imperméable, nous observons le même effet bénéfique sur le rayonnement nocturne. La perméabilité n'est donc pas un facteur limitant la réémission du rayonnement infra rouge par la haie. Cependant, la distance d'influence est peut-être plus difficile à évaluer car le brise-vent est très compact à la base et clairsemé au sommet. La nuit du 21 au 22 décembre 1999, les températures moyennes enregistrées à proximité d'une haie perméable et d'une haie imperméable sont supérieures de 1°C par rapport au centre de la parcelle (fig 2.10 ; annexe 7d).

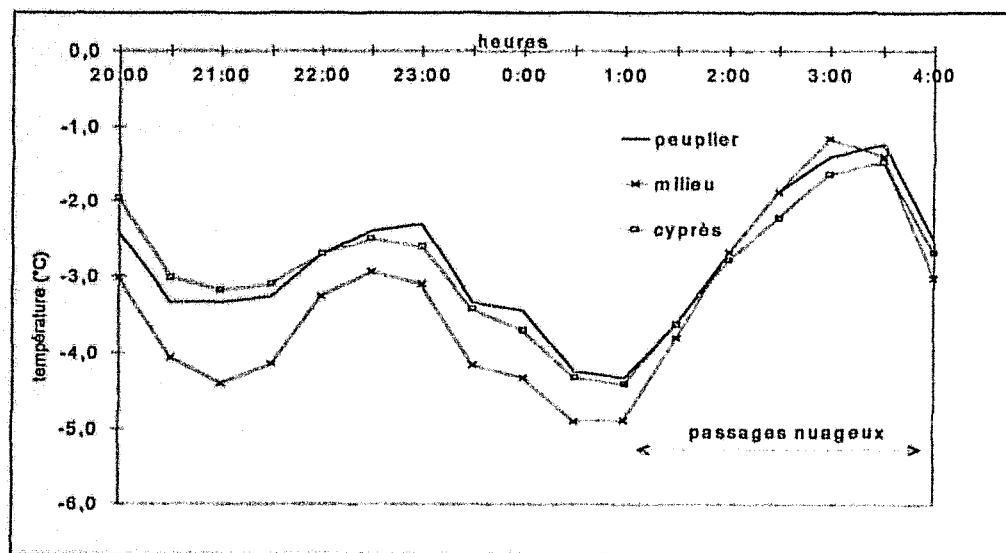


Fig 2.10 : Effet de limitation du rayonnement nocturne par des haies de natures différentes (parcelle n°4) en situation radiative : moyenne toutes les 30mn avec un pas de temps de 6mn (21-22/12/99).

En situation nocturne calme (anticyclonique), le bilan radiatif est l'élément principal faisant varier la température sur une parcelle bordée de brise-vent (perméable ou imperméable). Mais si le verger est exposé à des entrées d'air froid, le facteur radiatif n'est plus aussi déterminant.

♦ haies imperméables soumises à des entrées d'air froid : un ralentissement des coulées d'air froid et une accentuation du refroidissement

Les mesures sont effectuées selon un transect ouest-est partant d'un secteur dégagé en pente (30%) pour aboutir en contrebas dans des vergers protégés de haies faisant obstacle aux écoulements nocturnes (fig 2.11). La présence de capteurs, disposés régulièrement sur cet axe, a pour objectif de déterminer l'influence des haies *-perméables et imperméables-* sur les brises thermiques, et donc sur les températures.

On distingue deux zones où la haie imperméable a des effets opposés :

- l'amont, directement concerné par les arrivées d'air froid. L'air, s'écoulant par gravité, est ralenti par la haie. Cela accentue le refroidissement en amont de la haie et provoque la formation d'une masse d'air froid qui s'écoule lentement. L'action du brise-vent, atténuant les pertes radiatives par réémission vers le sol, paraît secondaire ;

- l'aval, où les actions thermiques et protectrices de la haie sont plus importantes. Le brise-vent, en protégeant le verger de cette masse d'air, limite la baisse des températures. La zone située immédiatement en aval de la haie n'est donc soumise qu'aux déperditions énergétiques du sol et l'apport thermique par réémission du brise-vent est à nouveau significatif.

On constate un écart thermique de plusieurs degrés de part et d'autre de la haie bien que le secteur protégé en aval soit assez restreint. En effet, l'air froid ne s'accumule pas indéfiniment. Même si ces haies sont très compactes, elles ne sont pas comparables à un mur. L'air est fortement ralenti mais il n'est pas bloqué. En raison de la poussée constante en amont (brises) et de la « semi-imperméabilité » des haies, il est évacué lentement, puis s'écoule à nouveau pour être ralenti par la prochaine haie. Durant la première partie de la nuit radiative (léger vent de 3 m/s) du 21 au 22 décembre 1999, on note une différence de 1.5°C entre les deux côtés de la haie imperméable. Cette valeur n'est valable que pour les points de mesure à proximité de l'obstacle (8m,15m en amont et 8m en aval ), car plus loin, en aval (25m), l'écart est moins important. Cela correspond au début de la nouvelle accumulation située devant la haie suivante (fig 2.11 ; 2.12 et annexe 7e).

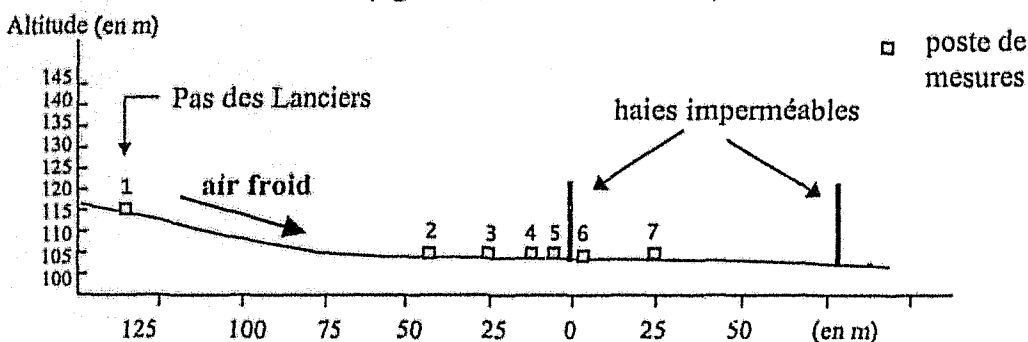


Fig 2.11 : Répartition des points de mesures en amont et en aval d'une haie imperméable

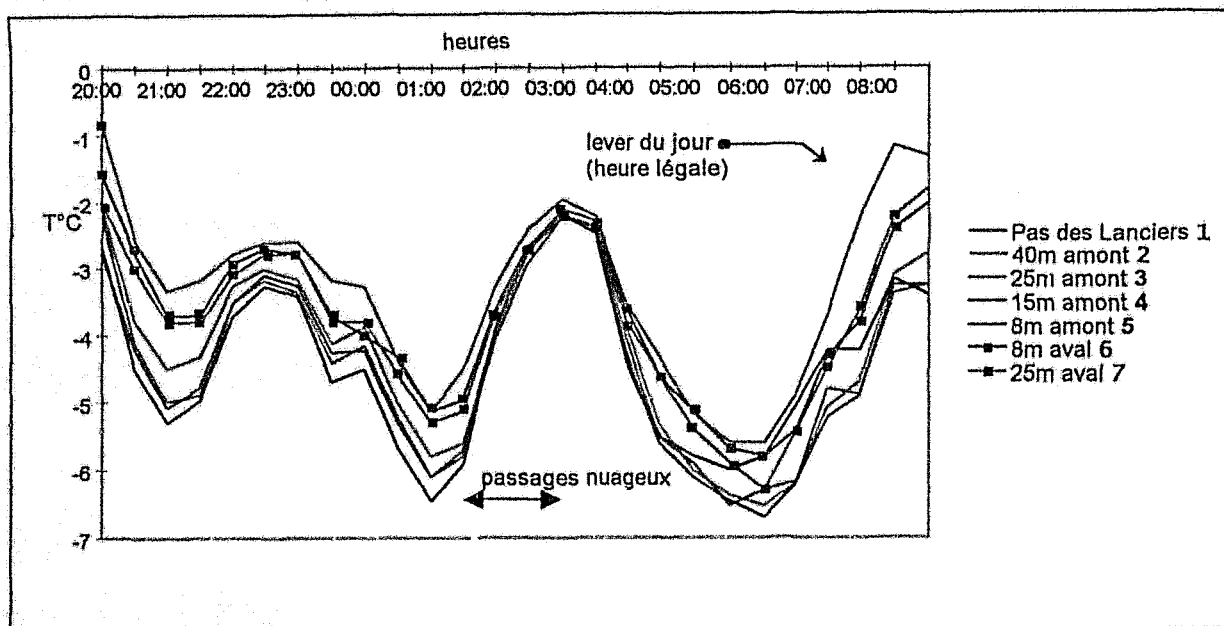


Fig 2.12 : Températures en situation de blocage d'air froid en amont d'un brise-vent imperméables : moyenne toutes les 30mn avec un pas de temps de 6mn (21-22/12/99).

En aval d'une haie brise-vent imperméable, l'action combinée de la réémission du rayonnement infrarouge et de la protection des entrées d'air froid engendre un gain de température de plusieurs degrés. C'est pourquoi, dans les vergers situés en bas de coteau, les variétés sensibles au gel sont généralement implantées en aval d'une haie imperméable qui fait barrage aux arrivées d'air froid.

L'écart de températures entre les deux côtés de la haie est comparable à celui relevé entre une zone de blocage (en amont d'une haie imperméable) et une zone dégagée en pente. La nuit du 18 au 19 décembre 1998, l'amplitude thermique entre le poste en pente (Pas des Lanciers) et celui 25 m en amont de la haie imperméable (fig 2.11) est en moyenne de 1,7°C et dépasse parfois 3°C (fig 2.13). Un écart de températures supérieur à 2°C est également observé au cours de la nuit du 16 au 17 avril 1999 (fig 2.14 et annexe 7f). Le ralentissement et la stagnation de l'air froid devant la haie imperméable accentue donc le refroidissement.

Dans ce type de situation, la partie exposée aux écoulements catabatiques est fortement sujette au risque gélif. La répétition des mesures a permis de définir **une zone empirique d'environ 25 m en amont de la haie où la température minimale de la nuit est plus froide de 1,5°C**. Au delà, l'influence est moins importante et les températures sont plus élevées. Cette norme semble être applicable à l'ensemble du site d'étude pour les parcelles protégées par des haies imperméables.

Le relief du terrain expérimental montre une forte pente au Sud-Ouest, puis un Jénivelé très faible vers le Nord Est. Dans les zones pratiquement planes, malgré le ralentissement provoqué par la succession des haies, les écoulements persistent du fait de la vitesse prise en amont et de la "recharge" systématique en air froid due aux déperditions radiatives. Ainsi, même avec des pentes proche de 1%, on observe des blocages d'air - **sur une longueur de 20-25m** - sur les parcelles dont les haies sont perpendiculaires aux écoulements catabatiques.



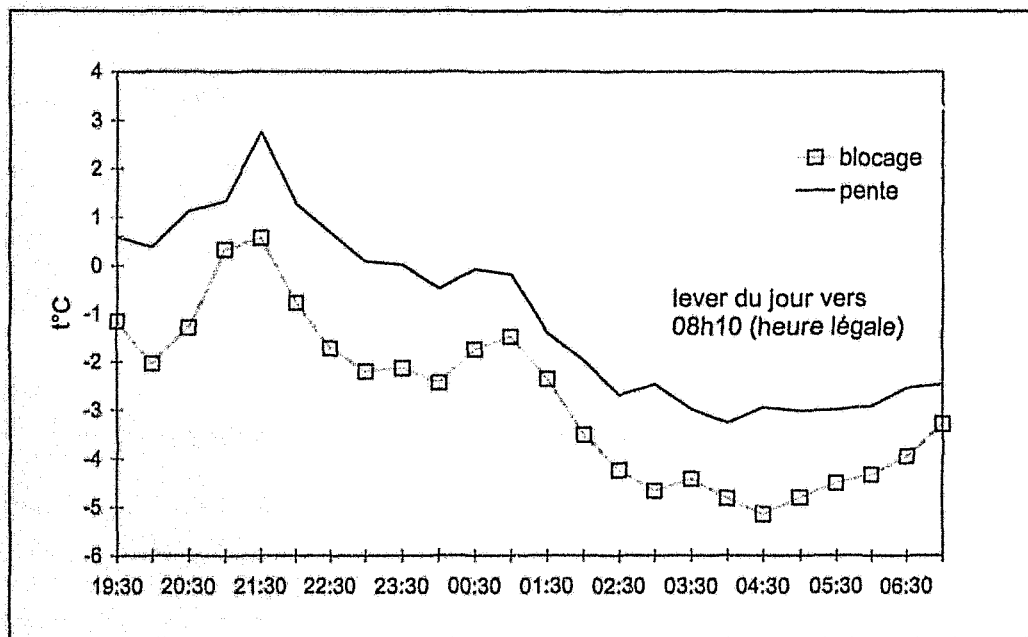


Fig 2.13: Températures sur un poste en pente dégagé et un poste en situation de blocage d'air froid : moyenne toutes les 30 mn calculée à partir de mesures toutes les 2 mn (18-19/12/99).

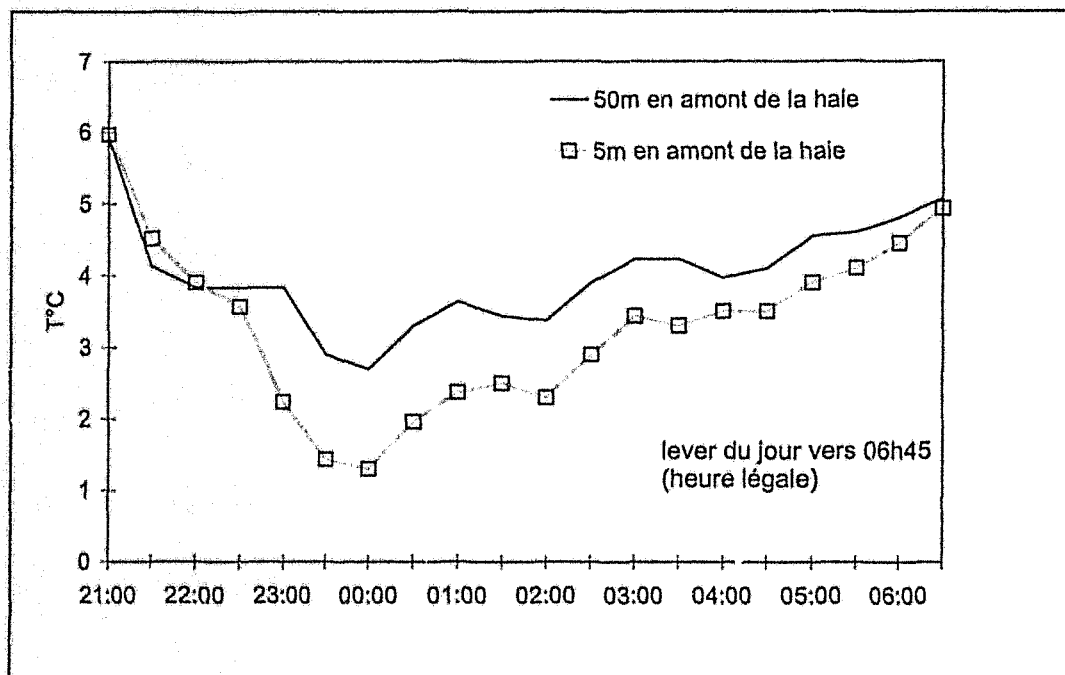


Fig 2.14: Températures sur un poste en pente dégagé et un poste en situation de blocage d'air froid : moyenne toutes les 30 mn calculée à partir de mesures toutes les 2 mn (16-17/04/99).

♦ haies perméables soumises à des entrées d'air froid : un ralentissement des coulées d'air froid négligeable

Le ralentissement des brises et donc le refroidissement de l'air en amont d'un obstacle ne se vérifie qu'en présence de haies imperméables. Si les brise-vent sont perméables, l'air s'écoule en permanence et limite ainsi le refroidissement et les différences entre l'amont et l'aval. La nuit du 21 au 22 décembre 1999 (parcelles n°7 et 8), on remarque que les températures à proximité de la haie perméable sont plus élevées de 1 à 1,5°C. L'air n'étant pas bloqué dans sa course, on n'observe pas de refroidissement et le brise-vent, par son action sur le rayonnement infrarouge, limite la baisse des températures (fig 2.15 ; 2.16).

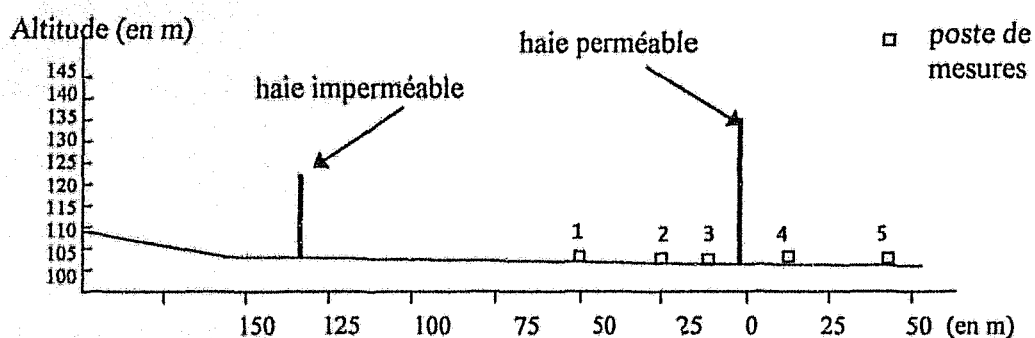


Fig 2.15 : Répartition des points de mesures en amont et en aval d'une haie perméable.

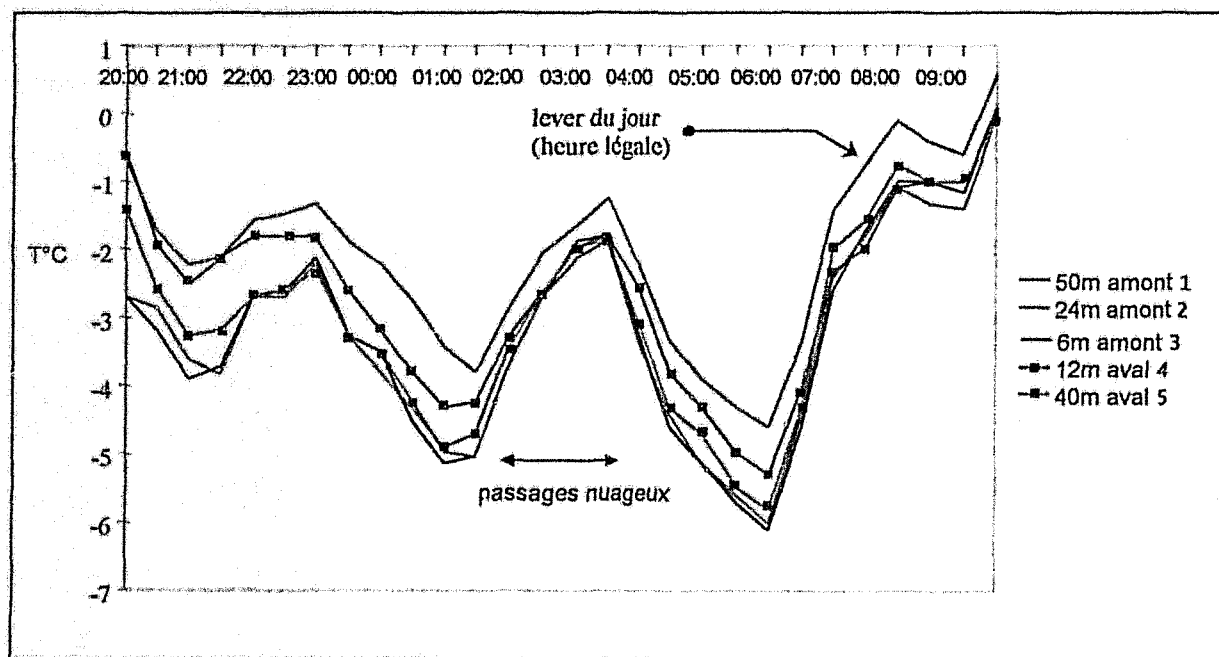


Fig 2.16 : Températures en amont et en aval d'un brise-vent perméable : moyenne toutes les 30mn avec un pas de temps de 6mn (21-22/12/99).

En situation radiative, les haies brise-vent, suivant leur nature et leur position par rapport au relief, influent de manière très diverses les températures. Selon leurs caractéristiques, elles produisent un effet thermique positif ou négatif, d'où la multitude de microclimats :

- ◆ quand la parcelle n'est pas exposée à des arrivées d'air froid, c'est principalement l'influence de la haie sur le rayonnement direct (solaire) et diffus (réémission de l'infrarouge) qui rend la répartition des températures hétérogène et apporte un gain énergétique ;
- ◆ quand la haie est imperméable et en position de blocage des écoulements catabatiques, l'apport thermique est présent à l'aval (protection et réflexion). A l'amont, il est négligeable comparé au fort refroidissement dû à l'accumulation d'air froid ;
- ◆ quand la haie est perméable et perpendiculaire aux écoulements, l'air n'est pas bloqué. C'est encore une fois, en limitant les déperditions énergétiques, que la haie agit positivement sur les températures.

La diversité des microclimats engendrés par les haies en situation anticyclonique, démontre qu'on peut obtenir des écarts de températures importants sur des zones assez restreintes. Prenons l'exemple des profils de température horizontaux de deux versants : l'un est dégagé et sur l'autre se succèdent des haies brise-vent. Sur le premier, P. Cellier et A. Bootsma (1975) mettent en évidence l'influence de la topographie sur les températures minimales de la nuit, les plus élevées étant situées sur les points les plus hauts et en pente (brassage) et les plus froides sur les points les plus bas (accumulation) (fig 2.17). Sur le second, l'influence de la topographie sur les températures est importante jusqu'aux premières haies. Ensuite, ce sont les caractéristiques des brise-vent qui modifient les températures (fig 2.18).

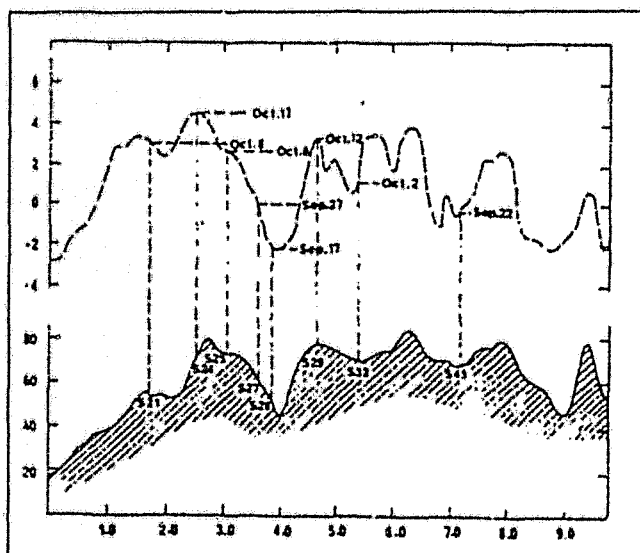


Fig 2.17 : Relation entre topographie et températures minimales (d'après Cellier et Bootsma, 1975).

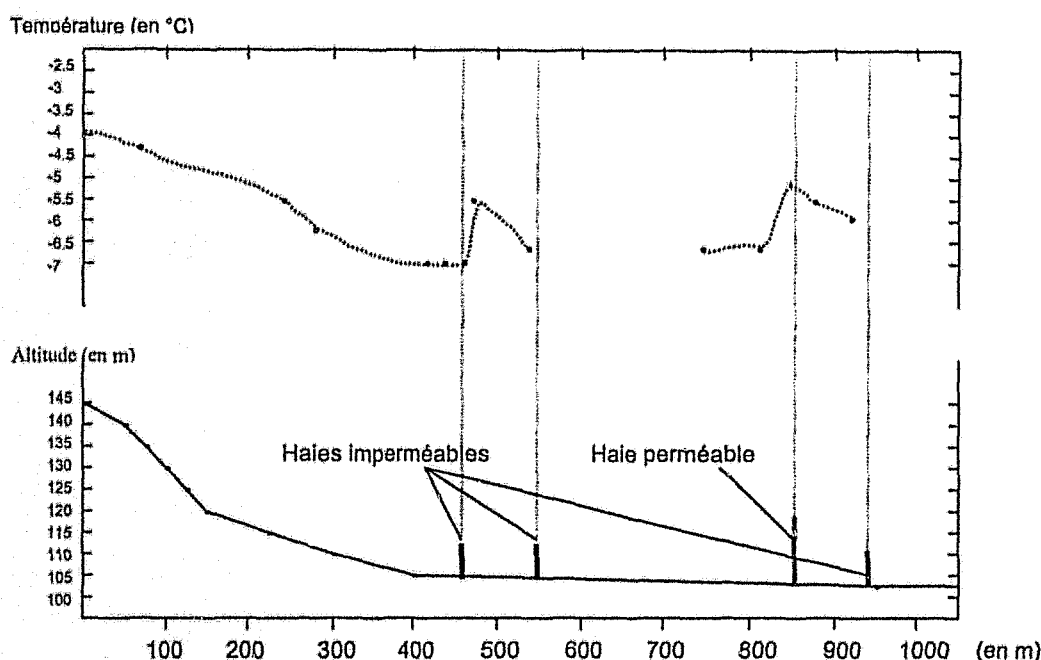


Fig 2.18: Relation entre la topographie, la nature des haies brise-vent et la température minimale lors d'une nuit de type radiatif sans vent : (21/22 décembre 1999).

En milieu clos, l'aléa lié aux basses températures est le plus fort dans le secteur de blocage d'air froid en amont d'une haie imperméable. Les cultures sensibles présentes dans cette zone sont donc confrontées au risque gélif le plus important. Pour les parcelles peu soumises aux écoulements nocturnes, le phénomène est beaucoup plus complexe puisque la répartition des basses températures est fonction de la conjonction de plusieurs paramètres (pertes radiatives, apport solaire de la veille, ...). D'ailleurs, qu'est-ce qui est le plus néfaste pour le végétal ?

- être situé dans la zone à l'ombre de la haie où la température peut être négative plusieurs heures après le lever du soleil,
- subir brusquement les premiers rayons du soleil accompagnés d'une évaporation intense alors que la température est toujours basse ?

Les mesures météorologiques à l'échelle parcellaire, seules, ne permettent pas d'apporter de réponse. Il est, dans ce cas, indispensable de procéder à des mesures d'un niveau encore plus précis (bourgeon) et à une analyse du végétal.

b) Nuit clair avec présence de vent

♦ **refroidissement advectif :**

L'action du vent sur le refroidissement nocturne est assez ambiguë. Elle apparaît comme positive en situation radiative (brassage de l'air) et négative en situation advective (apport de l'air froid par vent de N à E sur le site). Dans un milieu de brise-vent, même par temps advectif, la présence du vent est bénéfique car il limite la baisse des températures. Etant donné que dans la plupart du temps, les épisodes gélifs de type advectif se produisent par mistral, le ciel est dépourvu de nuages (hormis les cas de mistral noir). Sur la partie de la parcelle protégée du vent, l'air étant moins turbulent, le refroidissement est accentué par des pertes radiatives.

L'expérimentation est réalisée sur des parcelles dont les haies font face au mistral. Les capteurs sont disposés régulièrement sur la longueur du verger entre les deux brise-vent. L'objectif est de définir l'effet de l'apport radiatif des haies et du brassage de l'air sur la répartition des températures en situation advective.

L'écart thermique entre la zone protégée<sup>9</sup> et la zone brassée du verger est en moyenne proche de 1°C. Cela semble négligeable, mais le refroidissement occasionné par l'advection d'air froid étant considérable, la baisse d'un degré supplémentaire peut s'avérer catastrophique pour le végétal.

Sur une zone comprise entre 0 et 2H environ (annexe 4), le ralentissement du vent génère une source de refroidissement supplémentaire par pertes radiatives. On a donc ici, à une échelle très fine, la combinaison de refroidissements d'origine advective et radiative. Au delà de 2H, le vent présent sur la parcelle modère les déperditions énergétiques par rayonnement. On décèle la limite de la zone d'influence du facteur convectif sur les températures par les relevés thermiques des divers points de la parcelle qui croissent régulièrement au fur et à mesure qu'on se rapproche du secteur brassé. En simplifiant, on remarque un gain de 0.5°C tous les 20m. Cela a été observé sur plusieurs parcelles et à diverses dates (fig 2.19 ; 2.20 ; annexe 7g). La représentation par points des températures de la nuit du 30 au 31 janvier 1999 (parcelle n°9) confirme ces constatations, c'est-à-dire la présence d'un gradient thermique longitudinal s'étendant de la partie « sous le vent » à celle face « au vent » de la parcelle. Or, dans le sens de la largeur, la température n'est pas homogène. Immédiatement en aval de la haie, le secteur le plus froid se situe au milieu des rangs. Aux extrémités, le refroidissement est amoindri par le vent, qui par compression en bordure de haie, est dévié vers la parcelle. En définitive, à l'échelle de la parcelle, les zones protégées des effets mécaniques du vent, sont les plus gélives en situation advectives (fig 2.21).

<sup>9</sup> la zone immédiatement en aval de la haie est appelée "zone protégée", cela ne signifie pas qu'elle est moins gélive que les autres mais qu'elle est préservée du flux ambiant. Ce terme fait référence à la fonction initiale du brise-vent qui est de protéger les cultures des effets mécaniques du vent.

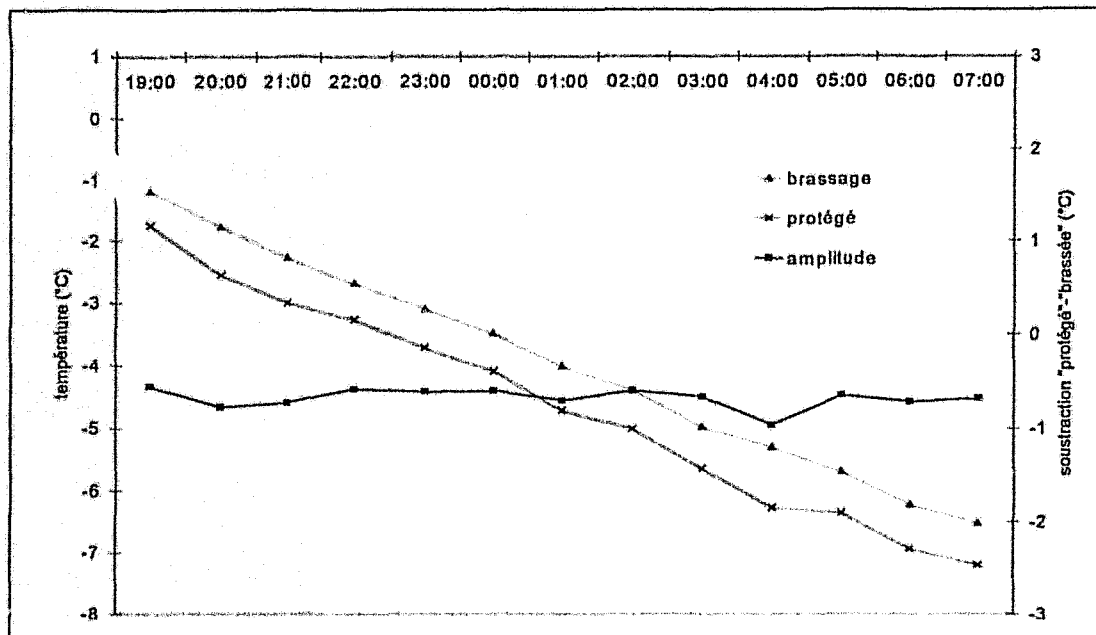


Fig 2.19: Ecart thermique entre un secteur au vent et un secteur protégé en aval d'une haie imperméable par temps advection : moyenne horaire calculée avec un pas de temps 2mn (12/13 février 1999).

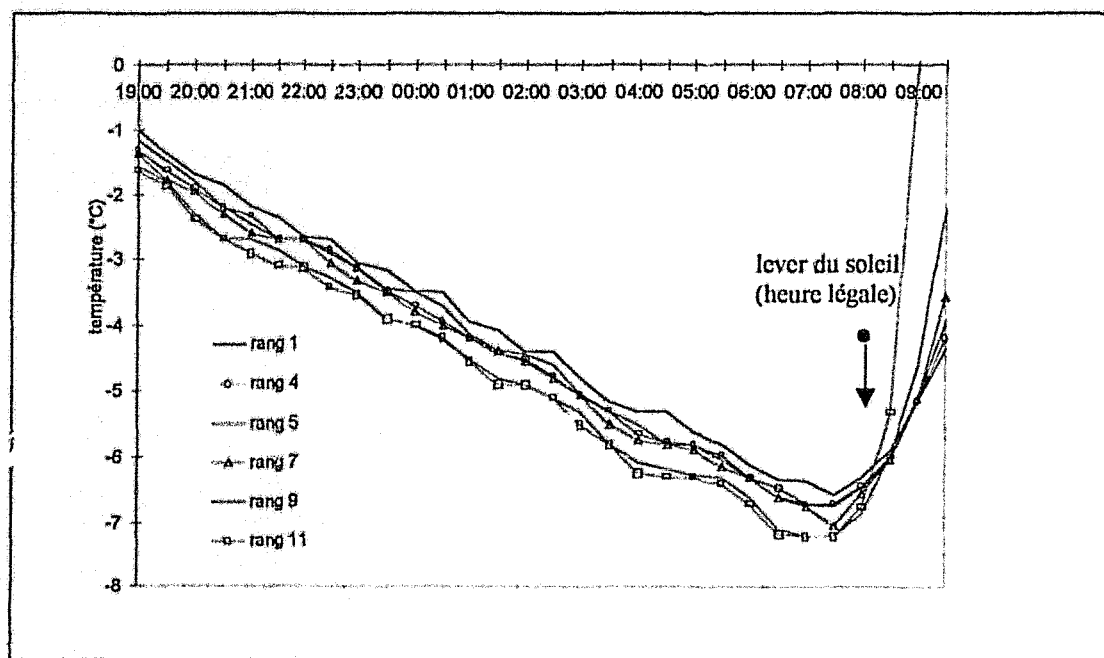


Fig 2.20: Variabilité spatiale de la température sur une parcelle bordée de deux haies imperméables par temps advection : moyenne horaire calculé avec un pas de temps de 2mn (12-13/02/99)

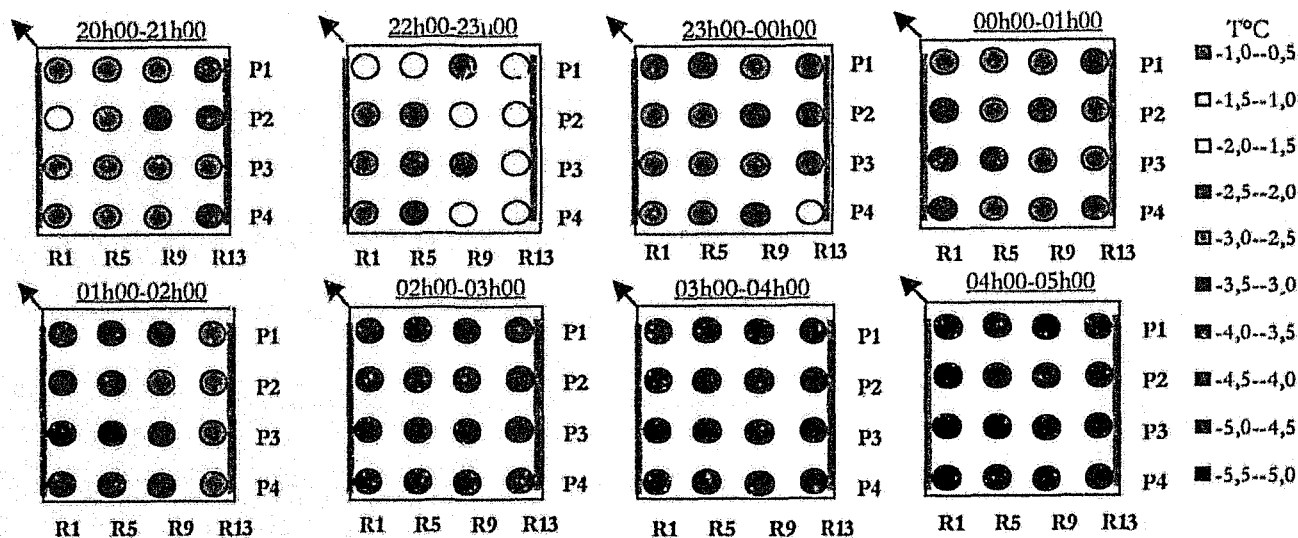


Fig 2.21 : Représentation par points des températures nocturnes (du coucher au lever du soleil) en milieu clos (parcelle n°9) en situation de gel advectionnel : moyenne horaire avec un pas de temps de 2 mn (30-31/01/99).

En conditions advectives, il est difficile d'évaluer l'importance des apports radiatifs de la haie. Dans la zone protégée, les déperditions radiatives plus intenses sont sûrement limitées par la réémission du rayonnement par les haies, mais cet effet reste néanmoins bien faible comparé au paramètre convectif.

♦ **Combinaison de l'advectionnel et du radiatif (arrêt de mistral) : une forte variabilité spatiale des températures nocturnes**

L'arrêt de mistral est souvent néfaste pour les cultures car la chute des températures est très brutale. L'air étant très sec, le point de rosée est très bas. La particularité de ce type de temps est l'arrêt du vent qui entraîne une chute des températures de plusieurs degrés en quelques minutes. Cette forte baisse thermique résulte de la combinaison de trois types de refroidissement :

- advectionnel : masse d'air froid d'origine nord à nord-ouest,
- radiatif : le ciel dégagé par le vent favorise les déperditions par rayonnement,
- par évaporation : l'air très sec implique une grosse consommation d'énergie pour la transformation de l'eau en vapeur.

Le caractère excessif du gel après un « arrêt de mistral » tient essentiellement son origine d'un air ambiant très froid. Le mistral soufflant généralement quelques jours de suite, les températures diurnes sont basses, ce qui explique la faiblesse du capital énergétique avant que le vent s'arrête. La nuit du 14 au 15 décembre 1998 (parcelle n°2), un anémomètre et un thermomètre disposés sur une parcelle ouverte montrent qu'après que le vent ait perdu de son intensité, la température baisse de 7°C en moins d'une heure. Ainsi, dans cet exemple, la température diminue dès que la vitesse du vent est inférieure à 5-6m/s (fig 2.22). La figure 2.23 représentant la température et la vitesse du vent au cours d'une période de mistral de

plusieurs jours met bien en évidence l'arrêt soudain du vent en début ou milieu de nuit et son "redémarrage" tout aussi brutal au lever du jour<sup>10</sup> (fig 2.23).

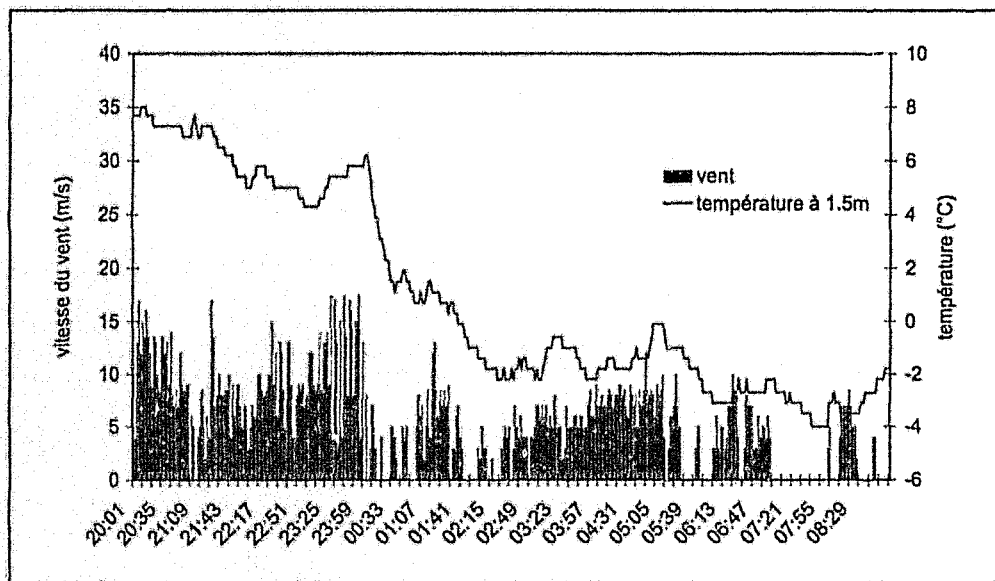


Fig 2.22 : Evolution de la température en fonction de la vitesse du vent en situation d'arrêt de mistral : données brutes<sup>11</sup>, pas de temps 2 mn (14-15/12/98).

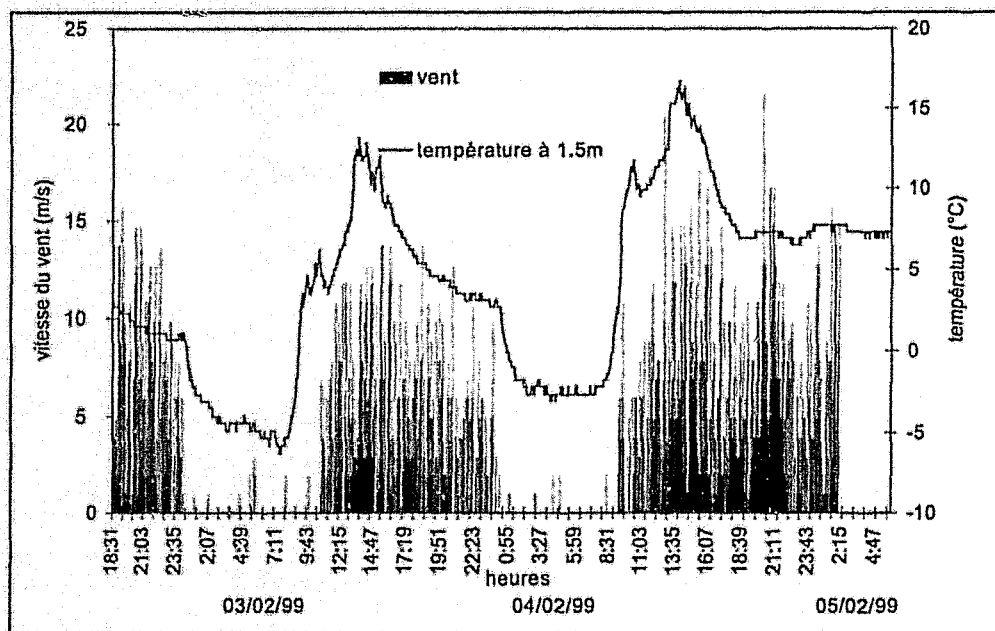


Fig 2.23 : Evolution de la température en fonction des arrêts de mistral nocturnes : données brutes, pas de temps 2 mn (période du 02 au 05/02/1999).

<sup>10</sup> La très forte remontée des températures est due au rayonnement solaire direct sur le capteur. Les données relevées étant l'indice actinothermique nocturne, les valeurs diurnes sont faussées par les rayons du soleil. La température maximale de ces deux journées n'excède pas 12°C sur la station automatique de la station arboricole de Mallemort.

<sup>11</sup> Les données sont brutes afin de bien visualiser la concordance entre le ralentissement soudain du vent et la chute de température.



Les changements rapides de types de temps ajoutés à l'action de la haie rend le microclimat complexe et variable. Par conséquent, les secteurs influencés thermiquement par le brise-vent varient suivant le moment de la nuit.

Durant la première partie de la nuit, lorsque le vent souffle, la situation thermique est similaire à celle du gel advectif. La parcelle est divisée en un secteur où le facteur convectif limite le refroidissement et un autre où l'effet de protection du brise-vent l'accroît. Après l'arrêt de mistral, c'est le facteur radiatif qui devient prépondérant. L'action des haies sur le rayonnement infrarouge ainsi que les conditions microclimatiques créées (antérieurement) pendant la période advective occasionnent des baisses de température plus ou moins intenses suivant l'endroit de la parcelle.

Par exemple, la nuit du 14 au 15 février 1999, l'écart thermique entre le secteur « protégé » et le secteur « brassé » est de 1°C pendant la phase advective. Après l'arrêt du vent, le refroidissement est plus important sur le secteur préalablement « brassé ». L'air étant plus sec dans la zone ventée, le refroidissement par évaporation est accentué. En définitive, les écarts de températures entre les deux zones s'amenuisent. Cependant, les points de mesures éloignés des haies enregistrent la température la plus froide de la parcelle. Il s'agit, en général, du milieu de la parcelle où la forte chute de la température, après la phase advective, n'est pas limitée par la réémission de l'infrarouge par les haies (fig 2.24 ; 2.25 et annexe 7h).

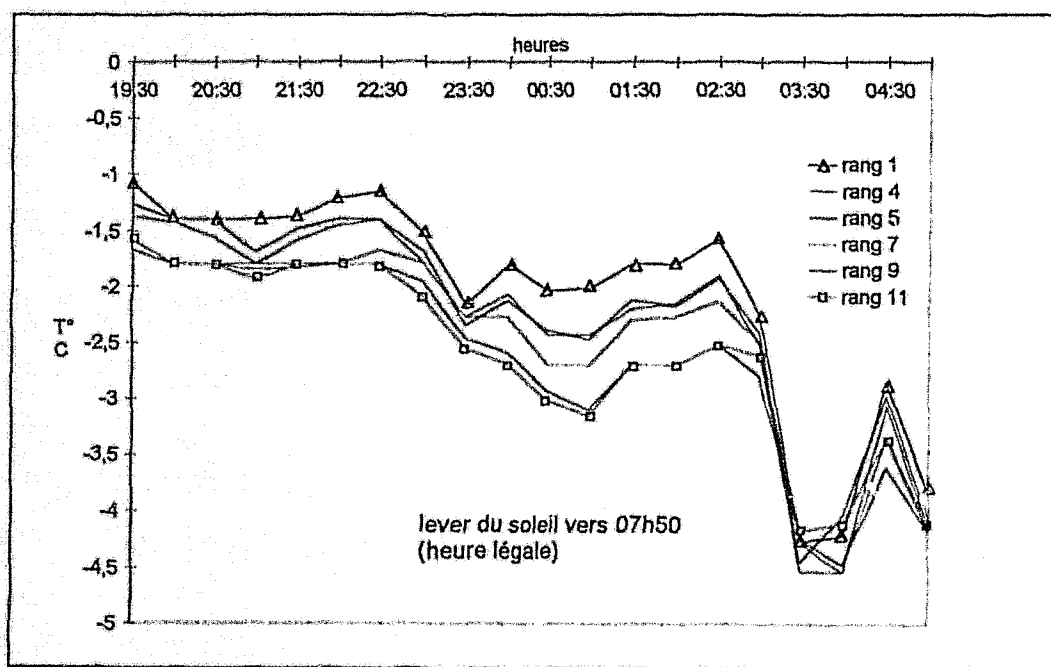


Fig 2.24 : Variabilité spatiale de la température sur une parcelle bordée de deux haies imperméables par arrêt de mistral : moyenne réalisée toutes les 30 mn à partir d'un pas de temps de 2mn (14-15/02/99).

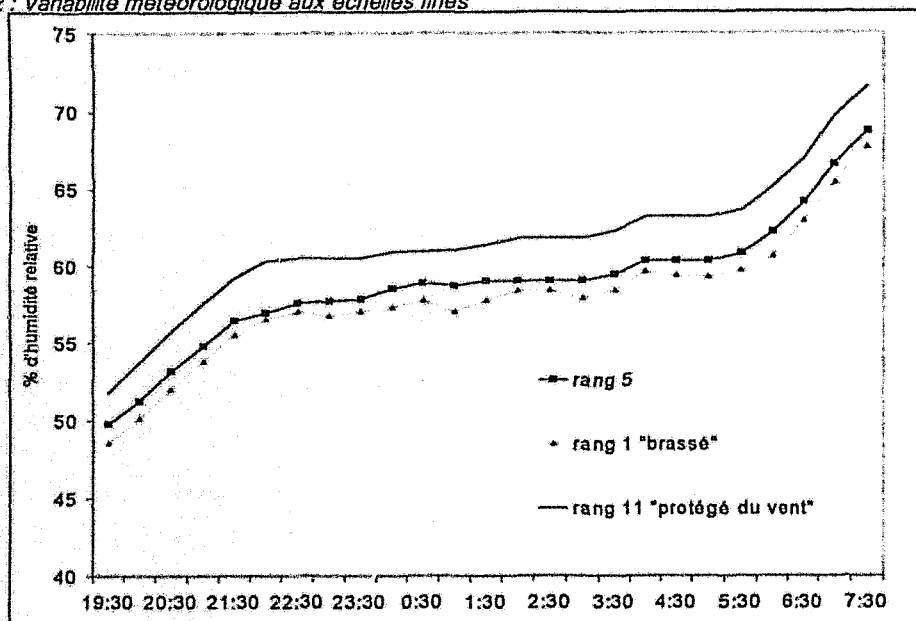


Fig 2.25 : Taux d'humidité relative entre secteur au vent et secteur protégé sur une parcelle bordée de deux haies imperméables par situation d'arrêt de mistral : moyenne réalisée toutes les 30 mn à partir des données relevées à un pas de temps de 2 mn (14-15/02/1999).

Au début de la nuit du 2 au 3 février 99 (parcelle n°1), le poste situé au milieu de la parcelle (rang 5 à environ 3H) relève des températures supérieures à celles du secteur protégé mais dès le ralentissement et l'arrêt du vent, il devient très vite le plus froid. Ce poste, situé à environ 30m des haies est à la limite du brassage et de la fin de l'effet « radiatif » des haies. On le remarque très bien au moment où le mistral s'arrête car la baisse de température est la plus importante. Après l'arrêt de mistral et jusqu'au lever du soleil, c'est la partie centrale de la parcelle qui se refroidit le plus : dans la première partie de la nuit, l'écart est de 1.5°C puis il diminue pour être inférieur à 0,5°C au lever du jour (fig 2.26).

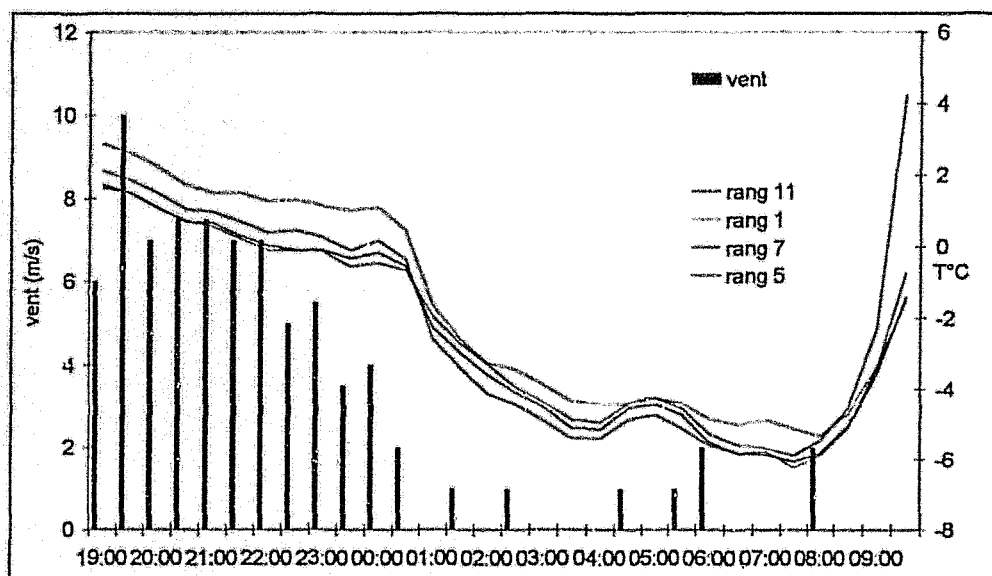


Fig 2.26 : Evolution des températures en fonction de la vitesse du vent sur une parcelle bordée de deux haies brise-vent imperméables par situation d'arrêt de mistral : moyenne réalisée toutes les 30 mn suivant des données relevées toutes les 2 mn (02-03/02/1999).

Pendant une nuit avec arrêt de mistral, on peut donc déterminer deux phases avec des zones où l'influence thermique de la haie est différente :

- ◆ phase advective : quand le vent est présent, c'est le facteur convectif qui limite le refroidissement. Le secteur le plus froid est donc celui protégé par la haie entre 0 et 2H ;
- ◆ phase radiative : quand le vent s'arrête, c'est le paramètre radiatif, notamment l'influence des haies sur les pertes énergétiques du sol, qui devient le plus important. On remarque donc une diminution de l'amplitude thermique entre les deux zones précédentes. En contrepartie, le secteur en milieu de parcelle (entre 2 et 3H) se refroidit plus.

L'ensemble des mesures a permis d'estimer un écart moyen de température de l'ordre du degré entre le point de mesure situé immédiatement en aval de la haie imperméable et celui sur le secteur brassé par le vent. La surface parcellaire abritée du vent variant suivant la hauteur de la haie, nous estimons que la longueur du secteur abrité en aval de la haie représente environ 2,5 fois la hauteur de la haie (fig 2.27).

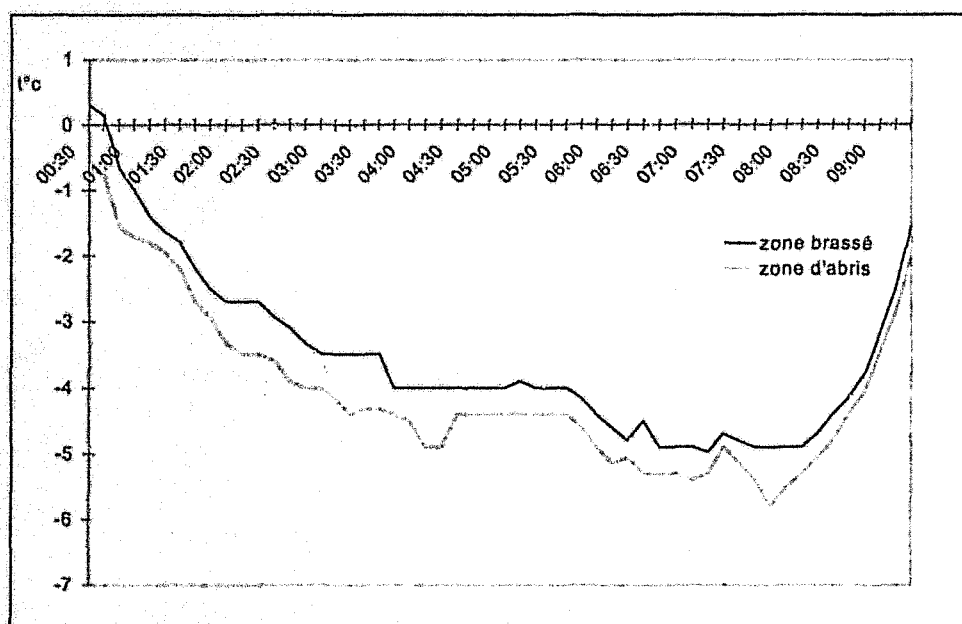


Fig 2.27 : Ecart de températures entre le secteur abrité par la haie et le secteur brassé lors de l'arrêt de mistral : moyenne réalisée toutes les 30 mn suivant des données relevées toutes les 2 mn (02-03/02/1999).

Cette expérimentation a permis de mettre en évidence l'importance des phénomènes radiatif et convectif sur le gain énergétique obtenu sur une parcelle bordée de haies imperméables. Durant la phase advective, la répartition des températures (refroidissement limité dans le secteur brassé) démontre que le facteur convectif est plus efficace que le facteur radiatif (*effet radiatif des haies sous le vent et brassage d'air face au vent*).

c) Nuit claire avec passages nuageux ou brouillard

Au cours des nuits radiatives, l'apparition d'un léger vent ( $\leq 2\text{m/s}$ ) limite la chute des températures. L'action des nuages ou du brouillard limite également le refroidissement nocturne en augmentant le rayonnement atmosphérique. Il s'agit de ce qu'on appelle plus communément "l'effet de serre". *"Les gouttelettes d'eau et les cristaux de glace qui constituent les nuages absorbent, en effet, la majeure partie du rayonnement thermique émis par la surface du sol, et ré-émettent vers cette surface un rayonnement qui sera d'autant plus fort que les nuages sont bas"* (otifl, 1998). Plusieurs questions peuvent être posées sur l'influence du couvert nuageux. De brefs passages nuageux sont-ils suffisants pour générer une remontée des températures et limiter le risque gélif pour les cultures ? Quel est l'action du brouillard ? La haie brise-vent influe-t-elle sur les températures dans ce type de situation ?

Les mesures démontrent que l'arrivée de nuages ou la formation d'un brouillard engendre une remontée immédiate et importante des températures. Même des nuages stratiformes de l'étage supérieur (faible épaisseur), provoquent un réchauffement. Il est intéressant de préciser, comme précédemment pour le vent, que la température fluctue rapidement selon l'état du ciel (clair ou couvert). Par exemple, la nuit du 15 au 16 décembre, la formation d'un brouillard épais en milieu de nuit engendre une remontée immédiate des températures (fig 2.28 ; annexe 7i).

La présence d'un couvert nuageux homogénéise les températures et gomme la plupart des effets locaux. A l'échelle de la parcelle, l'effet de réémission du rayonnement infrarouge des haies n'est plus perceptible. L'analyse par points des températures du 14-15 février 1998 fait apparaître une baisse lente et régulière sur la totalité de la parcelle jusqu'au lever du soleil (fig 2.29).

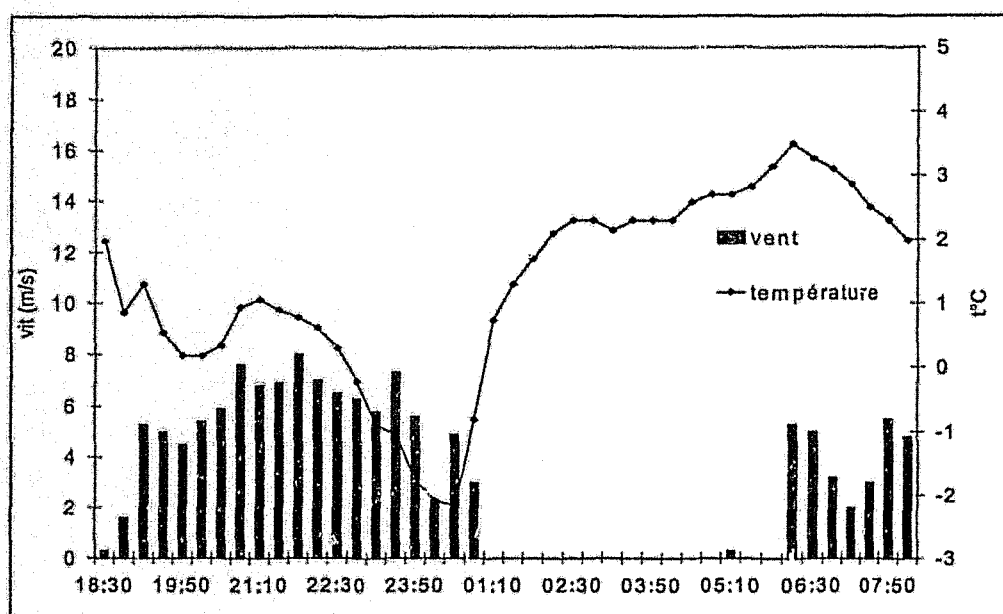


Fig 2.28 : Evolution de la température au cours d'une nuit marquée par une phase advective (jusqu'à 01:00) et une phase calme avec la présence d'un brouillard épais (de 01:00 à 06h00) : moyenne réalisée toutes les 30 mn suivant des données d'un pas de temps 2mn (15-16/12/1998)

Partie 2 : Variabilité météorologique aux échelles fines

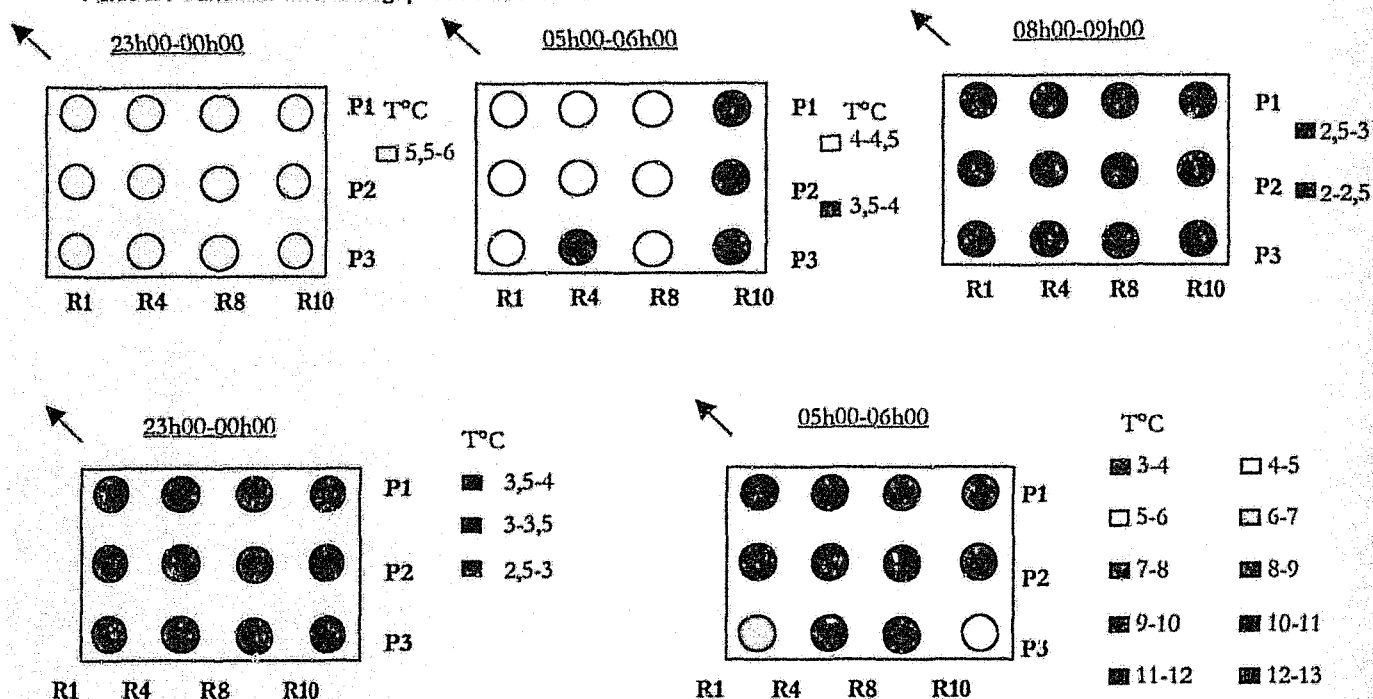


Fig 2.29 : Représentation par points des températures nocturnes (jusque en milieu de matinée) en milieu clos en situation radiative avec un brouillard épais : moyenne horaire avec un pas de temps de 2 mn ; disposition des 16 capteurs similaires à la figure 2.8 (14-15/02/1998).

En période de gel printanier, un temps nuageux est souvent synonyme de répit pour l'agriculteur. En effet, le caractère exceptionnel de ce phénomène est souvent expliqué par le fait qu'au cours de nuits radiatives où les températures baissent régulièrement jusqu'au lever du jour, la forte gelée est souvent évitée grâce à un léger coup de vent ou plus souvent, à l'arrivée de quelques nuages. A partir de ce moment, la forte hétérogénéité spatiale des températures induite par les divers effets locaux s'efface.

### 1.1.2.3 Stratification verticale des températures dans un verger bordé de brise-vent

Dans un verger bordé de brise-vent, la température varie en fonction de la distance à la haie. Celle-ci, en modifiant les transferts énergétiques crée de multiples microclimats perceptibles, non seulement sur un axe horizontal mais aussi selon un axe vertical. Suivant le type de temps, la haie a une influence différente sur la stratification des températures. Plusieurs mâts munis de capteurs de températures à 1,5m, 3m, 6m et 8m ont été disposés au milieu d'une parcelle ouverte (parcelle n°2) et d'une autre encadrée de brise-vent (annexe 6).

Par temps radiatif, dans une zone plane et dégagée, la température change essentiellement en fonction de l'altitude. L'air froid, plus dense, se cale au niveau du sol et génère ainsi une stratification des températures spécifique à ce type de temps. Il s'agit de l'inversion thermique (cf. introduction). Elle résulte du fait que l'air froid présent au niveau du sol ne se mélange pas avec les couches d'air plus chaud situées juste au-dessus. C'est donc dans les premiers mètres au-dessus du sol que le refroidissement reste le plus important. Dans un milieu clos, la situation est analogue. Cependant, la présence d'obstacles limitant totalement les échanges énergétiques, accentue l'amplitude thermique verticale. La nuit du 16 au 17 décembre 1998, l'inversion thermique est présente sur les deux postes de mesures, mais le gradient thermique est plus intense sur la parcelle bordée de haies (notamment entre 0 et 3 m de haut). Au niveau du sol, la haie amplifie la stagnation de l'air froid en empêchant la circulation de l'air et donc l'homogénéisation des températures (fig 2.30 ; 2.31 et annexe 7j).

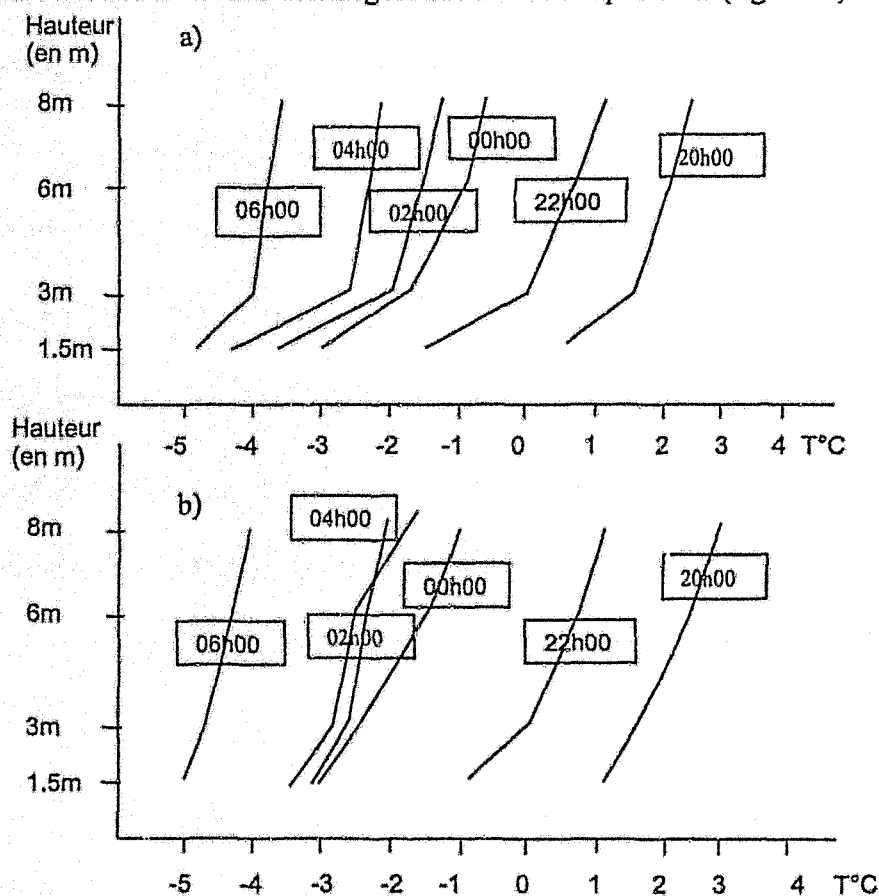


Fig 2.30 : Profils thermiques sur une parcelle bordée de haies (a) et sur une parcelle ouverte (b) : (16-17/12/1998).

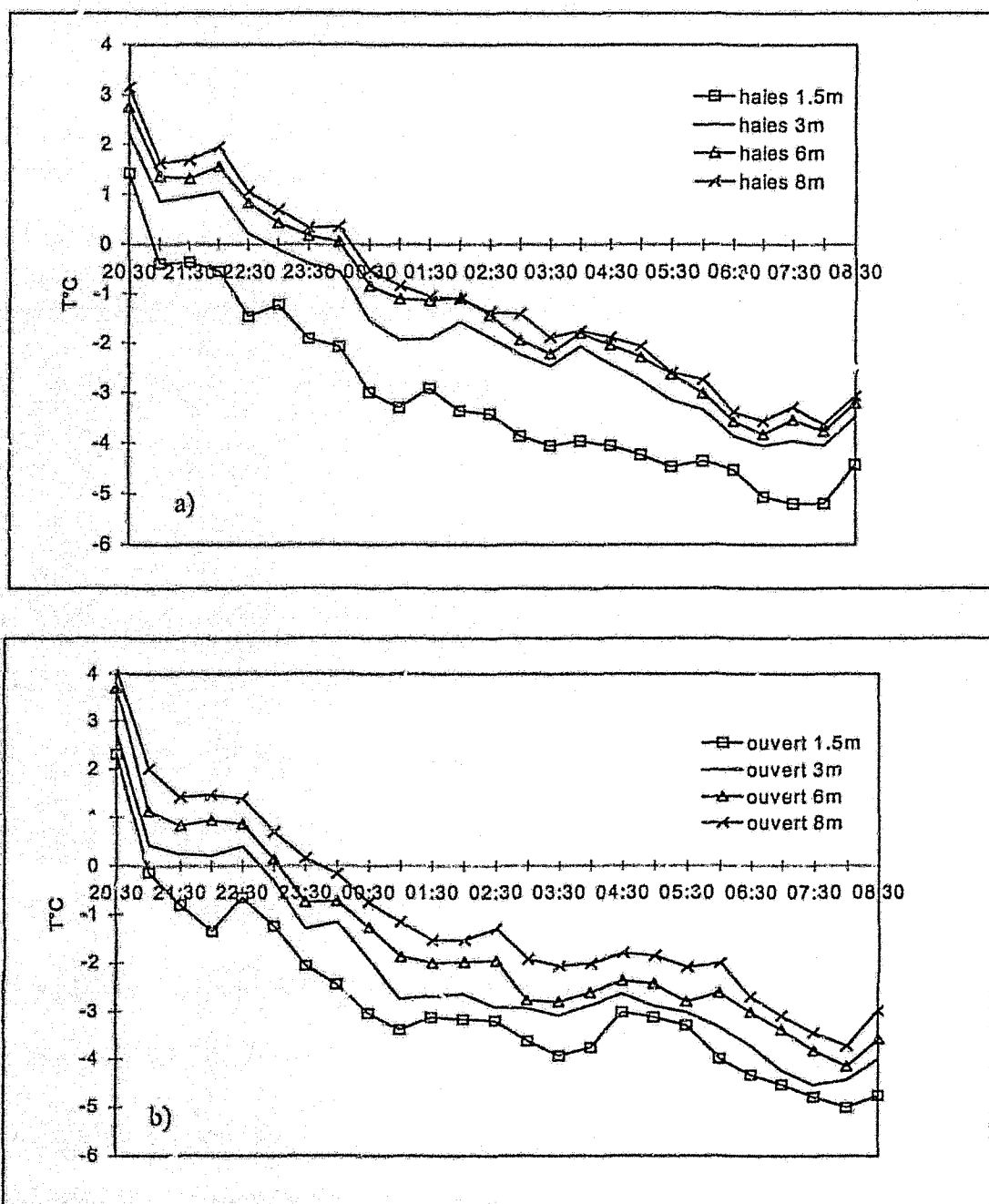


Fig 2.31 : Stratification verticale des températures sur une parcelle bordée de haies imperméables (a) et sur une parcelle ouverte (b) : moyenne sur 30 mn à partir de données d'un pas de temps de 2 mn (16-17/12/1998).

Ces phénomènes d'inversions de température ne se produisent que par nuits claires à fort rayonnement net, mais il semble que le facteur déterminant soit de nature purement topographique. Les diverses études de Brooks (1958), Schults (1962) et Seguin *et al.* (1975) démontrent que "l'accumulation d'air froid dans les plus basses couches résultant des courants de densité nocturnes" est l'élément principal qui détermine l'intensité de l'inversion. Dans notre cas, les deux parcelles tests se situent sur une zone plane et l'air froid présent au

niveau du sol n'a pas une épaisseur très importante. Nous ne sommes pas, ici, dans une topographie accidentée de type "cuvette", où la hauteur de la masse d'air froid peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Toutefois, à une échelle microclimatique, une haie imperméable disposée dans le sens des courants d'air froid peut engendrer un gradient thermique important. (fig 2.32 ; annexe 7k).

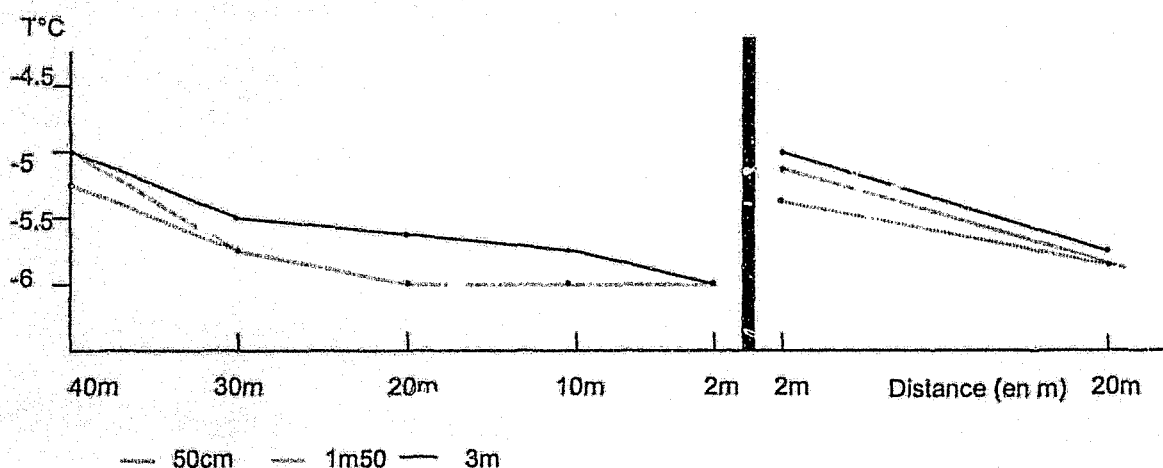


Fig 2.32 : Mesures de températures à 50cm, 1m50 et 3m en amont et en aval d'une haie imperméable faisant barrage aux écoulements d'air froid : relevés instantanés (26-27/01/2000).

Par gel advectif, le vent limite également le gradient thermique vertical. En brassant l'air au niveau du sol avec celui des couches plus élevées, il homogénéise les températures. Cependant, avec la présence de la haie, le vent est ralenti et il existe une stratification plus importante que sur une parcelle dégagée. La nuit du 14 au 15 décembre 1998 pendant laquelle le mistral n'a cessé de souffler en ralentissant toutefois entre 00h00 et 03h00, le gradient thermique maximal entre 1m50 et 6m est supérieur à 2°C sur la parcelle bordée de haies et proche de 1.5°C sur la parcelle ouverte. L'amplitude thermique verticale est en plus accentuée par le ralentissement du vent en milieu de nuit qui a permis l'augmentation du refroidissement par rayonnement et par conséquent la formation d'air froid au niveau du sol (fig 2.33).

En situation de gels radiatif et advectif, les écarts de températures entre le site ouvert et le site clos sont de l'ordre de 0.5 à 1°C. Les gradients verticaux sont plus accentués dans la zone bordée de brise-vent que dans la zone dégagée car les échanges turbulents sont réduits. Par contre, par ciel couvert, le gradient thermique disparaît et les températures entre les deux sites sont similaires, quel que soit la hauteur (fig 2.34).

Après avoir analysé la variabilité spatiale (horizontale et verticale) de la température de l'air dans un milieu de brise-vent, nous abordons la température du sol. En effet, la température de l'air est fortement tributaire de celle du sol puisque les pertes énergétiques par rayonnement terrestre varient suivant les caractéristiques de surface.



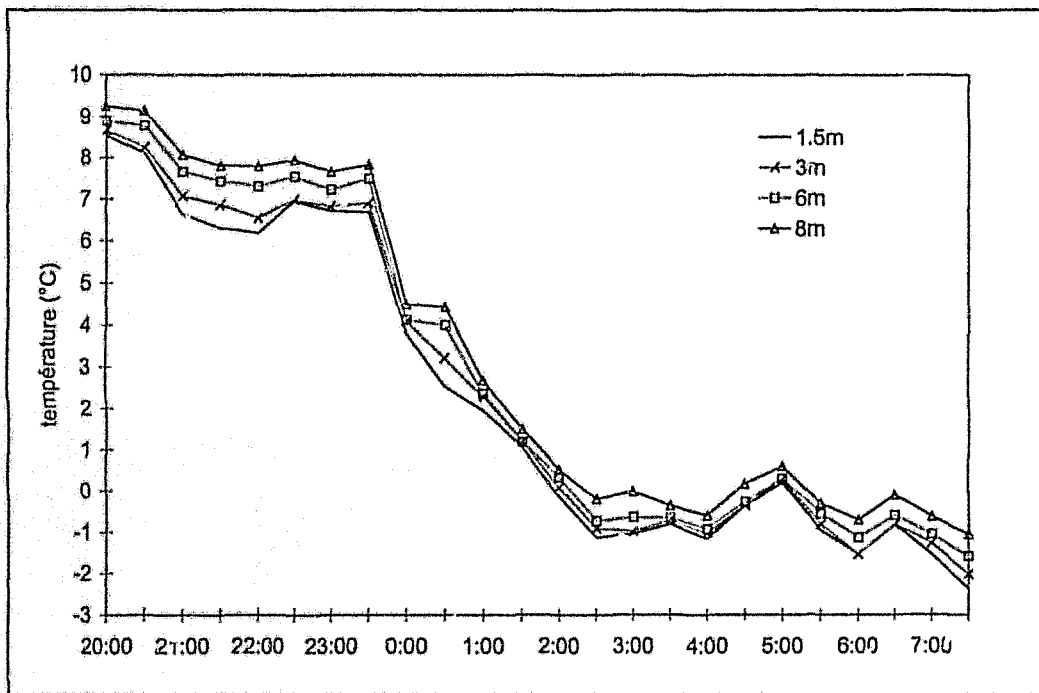


Fig 2.33: Stratification thermique par temps advectif sur une parcelle bordée de haies imperméables : moyenne sur 30mn à partir d'un pas de temps 2mn (14-15/12/1998).

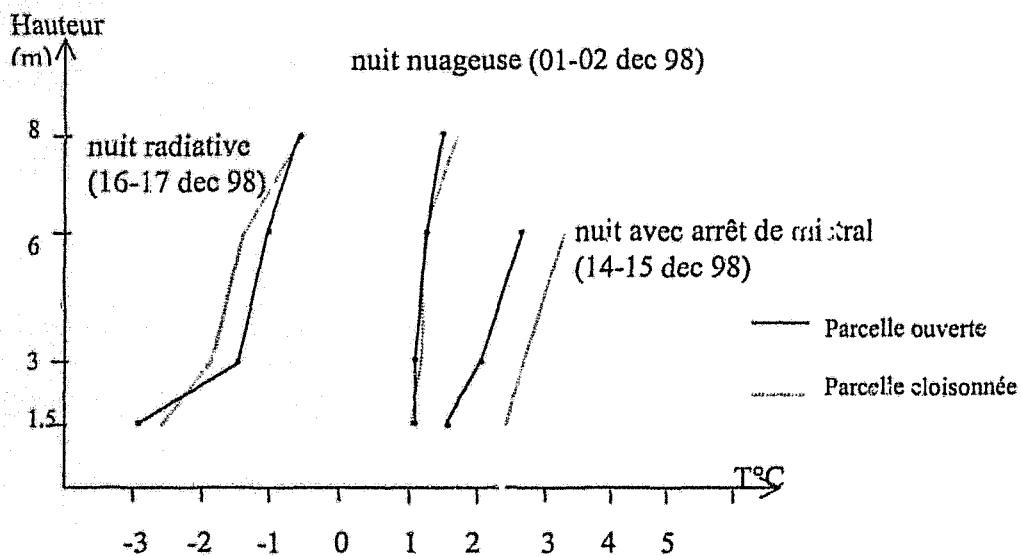


Fig 2.34: Profils thermiques suivant le type de temps sur une parcelle ouverte et sur une parcelle bordée de haies brise-vent.

#### 1.1.2.4 Température du sol

La répartition spatiale hétérogène des paramètres radiatif et convectif sur une parcelle close a également des répercussions sur la température du sol. Des thermomètres - type Pt100 - ont été installés à 10 cm de profondeur, l'objectif étant d'étudier les écarts thermiques dans le sol en fonction de la position par rapport à la haie. Contrairement à la température de l'air où une disparité spatiale d'un degré en quelques minutes peut entraîner le gel d'une partie des cultures, celle du sol agit à une échelle temporelle beaucoup plus longue. A long terme, l'accumulation d'énergie dans le sol plus importante sur la partie ensoleillée de la parcelle engendre un départ plus précoce de la végétation (CTIFL, 1998). On a pu constater que le niveau de croissance des cultures fruitières est lié à leur emplacement par rapport aux haies. Par exemple, dans le secteur à l'ombre, la végétation a un retard de plusieurs jours. Sachant que la résistance au gel du végétal dépend principalement de l'espèce et de son stade phénologique (niveau de croissance), la température du sol est un élément indispensable pour comprendre la répartition des dégâts dus au gel à l'échelle de la parcelle. La nuit du 25 au 26 janvier 1999, l'amplitude thermique moyenne du sol entre le secteur ensoleillé et le secteur ombragé atteint 5°C. Sur une longue période, ces disparités énergétiques peuvent produire des écarts de plusieurs jours au niveau de la croissance des végétaux (fig 2.35 ; annexe 71).

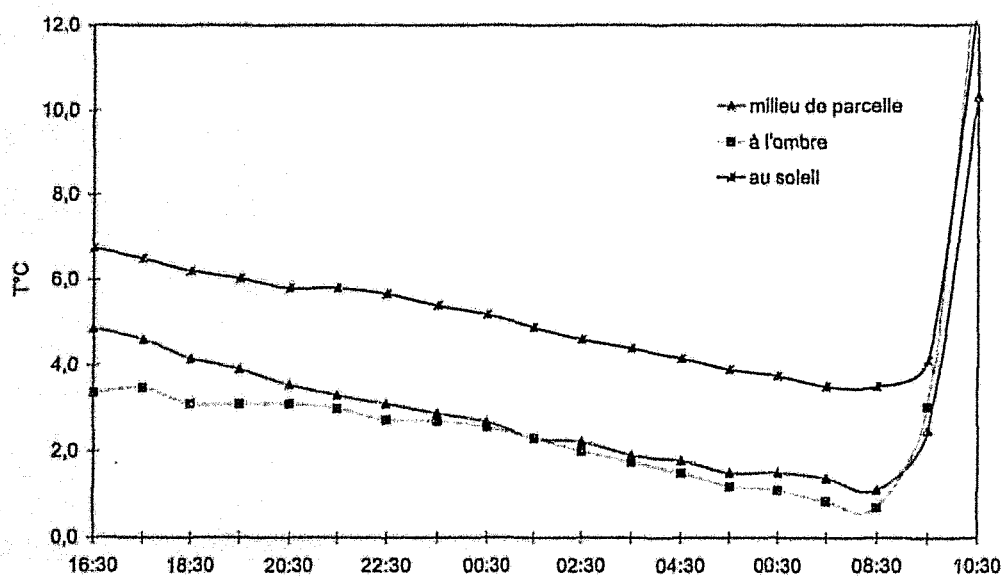


Fig 2.35 : Evolution des température à 10 cm dans le sol en fonction de la position à la haie sur une parcelle cloisonnée en situation radiative : moyenne horaire suivant des données d'un pas de temps de 1 mn (25-26/01/1999).

En période hivernale, après une succession de journées de gel, le sol à l'ombre de la haie reste gelé pendant plusieurs jours. Il se crée une sorte de "permafrost" à une échelle très fine. Contrairement à la température de surface, les fortes variations thermiques présentes sur une période très courte sont minorées dans le sol. "Dans le cas où la durée du gel de surface est limitée à quelques heures, la température dans le sol demeure voisine de 0°C : il est probable que le refroidissement est en grande partie "utilisé" à congeler l'eau interstitielle des couches tout à fait superficielles du sol. Tout se passe donc comme si la surface du sol

demeurait aux environs de  $0^{\circ}\text{C}$ " (Casanova, 1969 ; Smith, 1979 ; William's, 1982). Inversement, lorsque le sol est gelé, il se réchauffe beaucoup plus lentement que l'air.

Les mesures réalisées en situation advective et d'arrêt de mistral montrent que le facteur convectif a une influence négligeable sur la température du sol par rapport au rayonnement solaire (fig 2.36 ; 2.37 et annexe 7m).

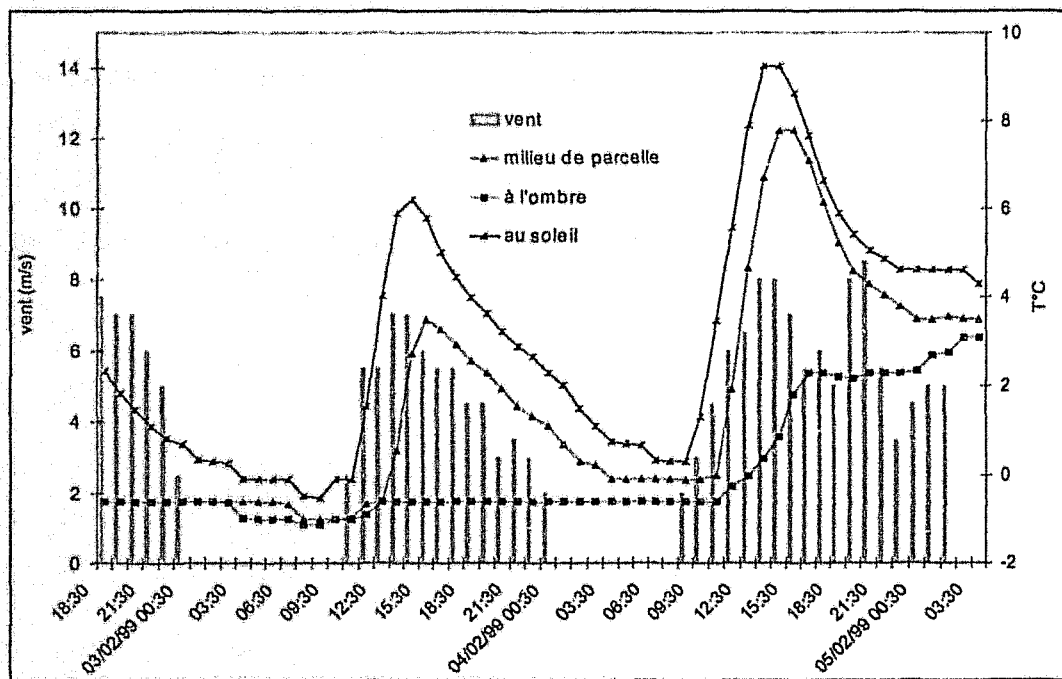


Fig 2.36 : Evolution des températures à 10 cm dans le sol en fonction de la position à la haie sur une parcelle cloisonnée durant une période avec succession d'arrêts nocturnes du mistral<sup>1</sup> : moyenne horaire suivant des données d'un pas de temps de 1 mn (02-03-04-05/02/1999).

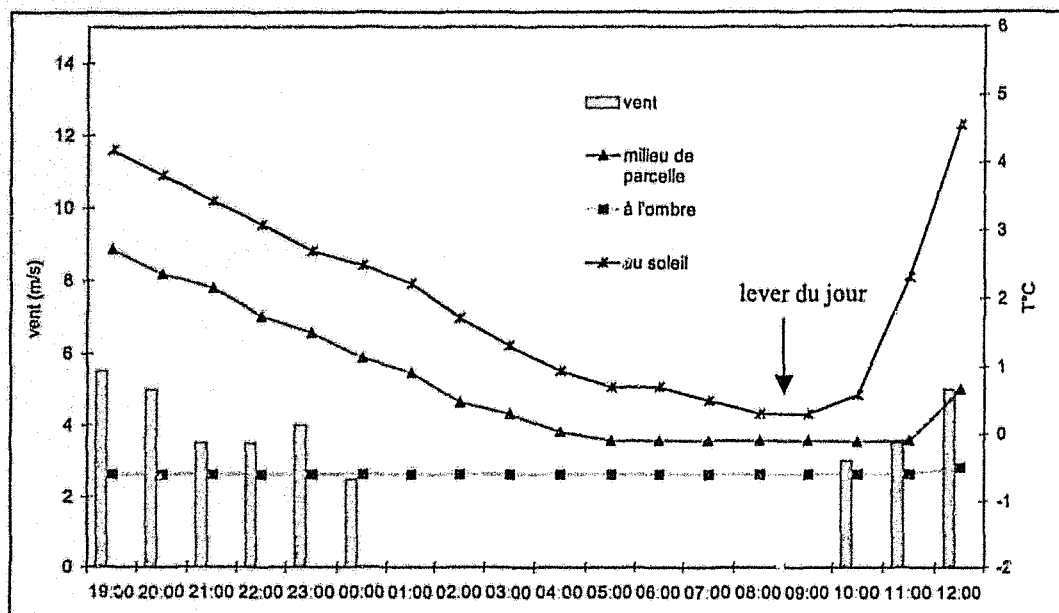


Fig 2.37 : Evolution des températures à 10 cm dans le sol en fonction de la position à la haie sur une parcelle cloisonnée après un arrêt de mistral : moyenne horaire (03-04/02/1999).

Les conséquences de l'impact de la haie sur la localisation du gel à l'échelle de la parcelle ne dépend pas que de phénomènes se déroulant sur une courte durée, comme un épisode gélif nocturne, mais également sur une période plus longue allant de quelques jours à plusieurs semaines (apport énergétique diurne du côté ensoleillé de la haie provoquant localement une accélération de la croissance des végétaux). Sachant, que le gel en arboriculture dépend des températures nocturnes et du stade de croissance du végétal, tous ces éléments d'échelles temporelles différentes doivent être pris en compte pour définir les secteurs de la parcelle les plus gélifs.

#### 1.1.2.5 Température dans le végétal : des variations suivant le type de temps et l'état d'avancement du végétal

L'indice actinothermique est la technique de mesure qui reflète le mieux les températures auxquelles les végétaux sont exposés. Ces données renseignent sur le comportement thermique à la surface du bourgeon ou de la fleur. Elles ne donnent cependant aucune information sur l'action du refroidissement à l'intérieur du végétal. On procède à des mesures dans les bourgeons lors de conditions atmosphériques différentes et à divers niveaux de croissance de l'arbre fruitier (du débourrer jusqu'à la maturation du fruit). L'objectif consiste à observer l'écart entre la température de l'air et celle à l'intérieur du bourgeon afin de savoir s'il est similaire selon le type de gel. Les capteurs utilisés pour ces mesures sont des sondes de 1,5 mm de long.

Au cours de la nuit radiative du 01 au 02 avril 1999, le capteur, disposé dans un bourgeon de poirier après la chute des pétales, indique une différence moyenne de 0.6°C par rapport aux données de l'instrument à l'air libre (fig 2.38). Ce refroidissement plus important au niveau du végétal est probablement dû à un phénomène d'évaporation plus important dans l'organe floral (Tabbard, 1965). En situation de très forte gelée, on retrouve cet écart thermique mais la variation de température est beaucoup plus saccadée dans le végétal que sur le capteur témoin (fig 2.39). La masse du végétal limite les fortes variations subites de la température, mais l'accentuation de l'évaporation accroît le refroidissement. Comme pour la température de l'air, la présence d'un couvert nuageux réduit les écarts de températures. La nuit du 21 au 22 mars, l'arrivée de nuages vers 23h00 entraîne une remontée de la température et une homogénéisation entre le végétal et l'air. Vers 01h00, le ciel se dégageant, l'amplitude thermique "bourgeon / air" réapparaît (fig 2.40).

Par temps advectif et notamment en situation d'arrêt de mistral, le comportement thermique dans le végétal est différent. Dans la phase advective, la différence est de 1°C alors qu'après le ralentissement du vent, elle est d'environ 0.3 à 0.5°C. Le vent, en asséchant l'air, accentue le refroidissement par évaporation. Donc, l'eau présente dans le végétal, en comblant une partie du déficit hydrique de l'air, provoque une baisse de la température (Leddert et Derreudre, 1993). C'est d'ailleurs ce type de gel qui est le plus dangereux pour les bourgeons floraux car il peut engendrer un dessèchement cellulaire généralement irréversible. L'exemple du 18 au 19 mars 1999 permet de visualiser la variation de l'écart de température "bourgeon"/"air" au cours des deux phases d'une nuit avec arrêt de mistral (fig 2.41).

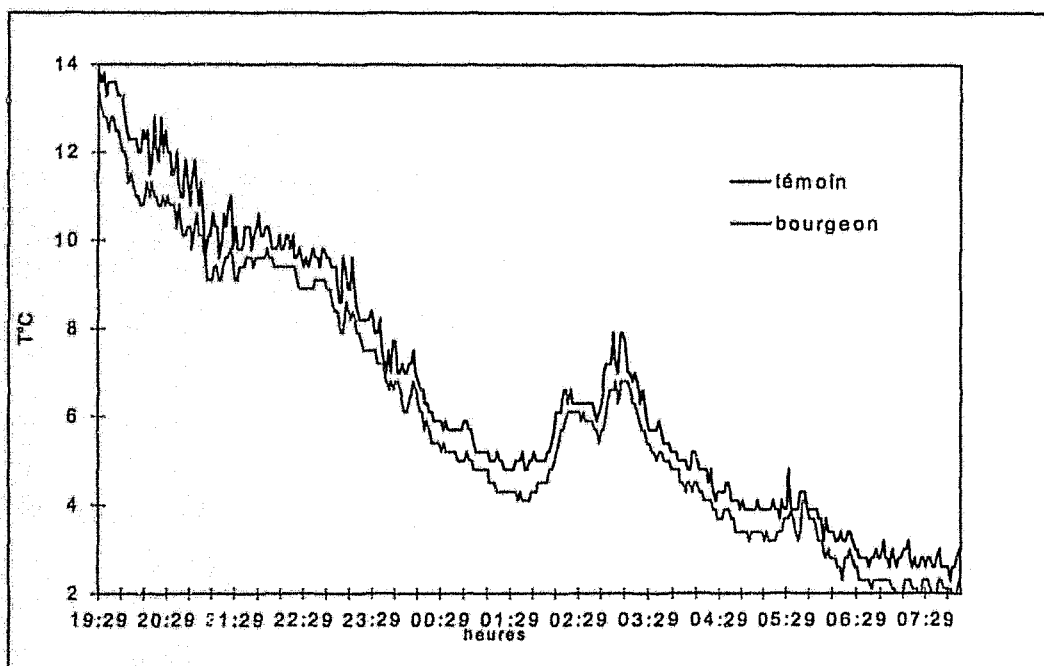


Fig 2.38 : Evolution de la température dans un bourgeon de poirier (stade phénologique chute des pétales H) en fonction de la température de l'air libre en situation radiative : données brutes avec un pas de temps de 2 mn (01-02/04/1999)

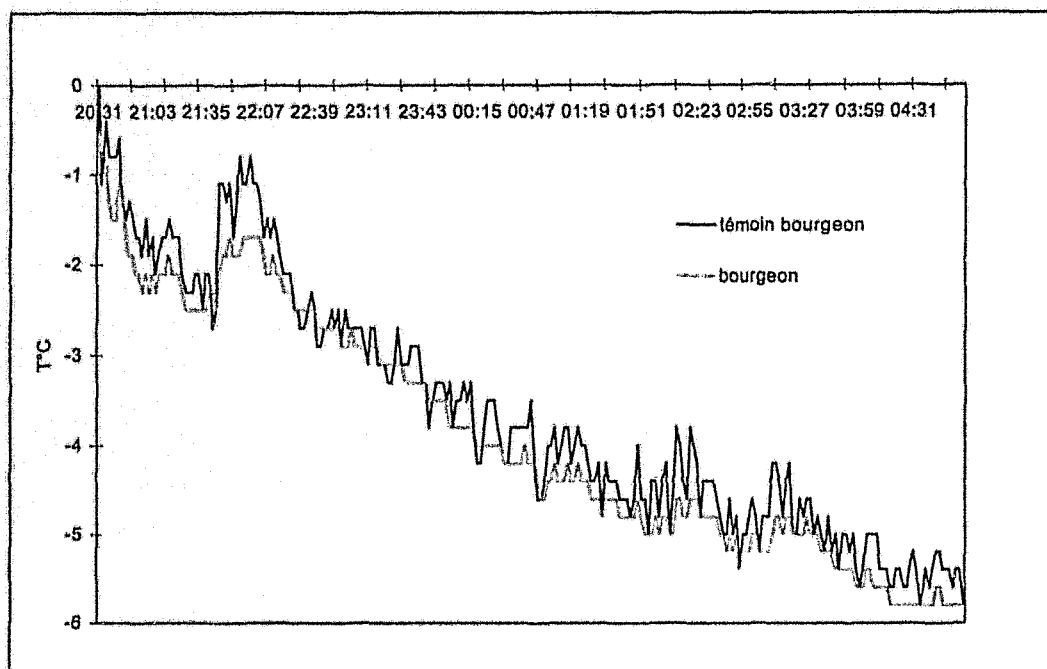


Fig 2.39 : Evolution de la température dans un bourgeon de poirier (stade phénologique gonflement apparent C3) en fonction de la température de l'air libre en situation radiative : données brutes avec un pas de temps de 2 mn (17-18/02/1999)

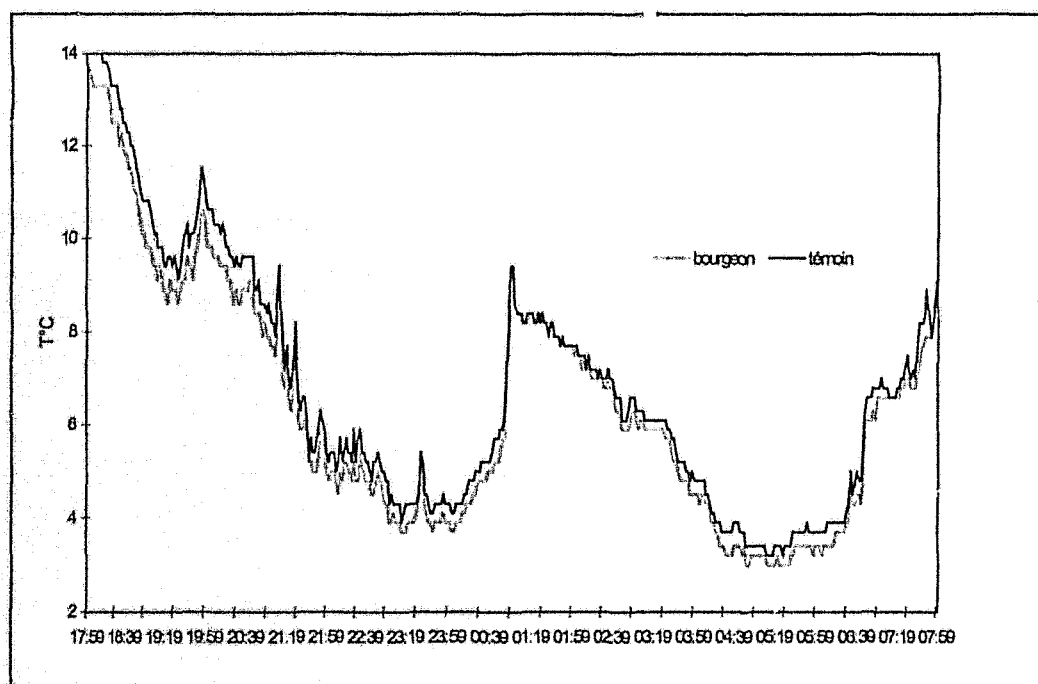


Fig 2.40 : Evolution de la température dans un bourgeon de poirier (stade phénologique pétales visibles E2) en fonction de la température de l'air libre en situation radiative avec un passage nuageux : données brutes avec un pas de temps de 2 mn (21/22/1999).

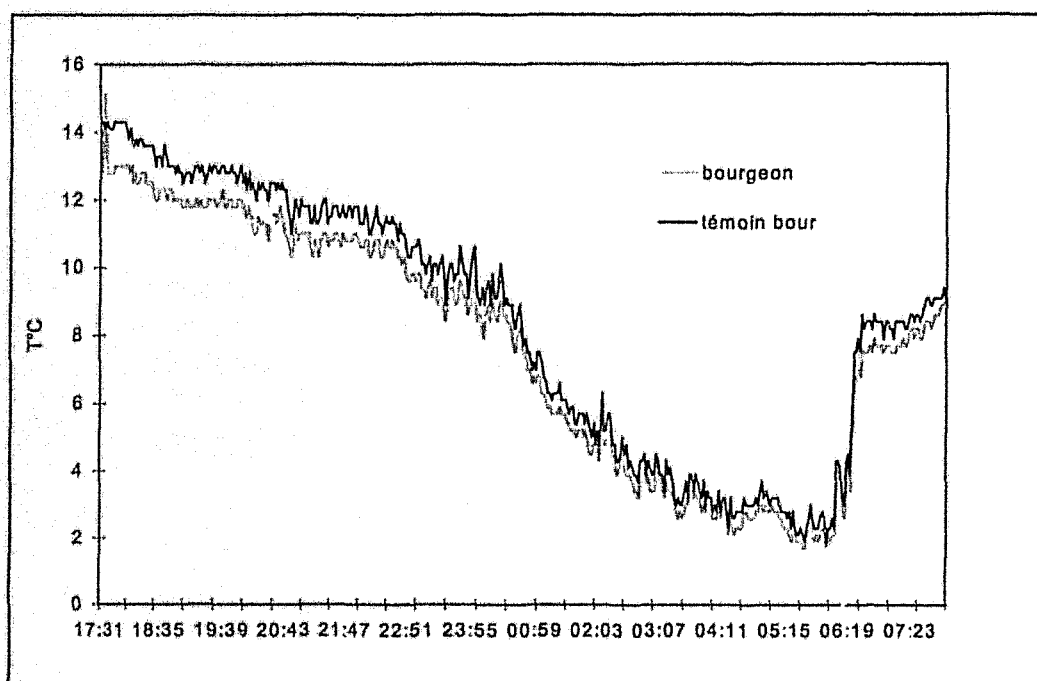


Fig 2.41 : Evolution de la température dans un bourgeon de poirier (stade phénologique pétales visibles E2) en fonction de la température de l'air libre en situation d'arrêt de mistral : données brutes avec un pas de temps de 2 mn (18-19/03/1999).

Ce type d'expérimentation à l'échelle du bourgeon démontre que les mesures de température de l'air, même en indice actinothermique, ne retranscrivent pas exactement le comportement du végétal et que les écarts thermiques ne sont pas identiques dans toutes les situations atmosphériques. Par temps radiatif, quel que soit le stade phénologique, la température dans le bourgeon est inférieure en moyenne de 0,3 à 0,7°C par rapport à celle du témoin (air libre) et en situation advective, l'écart de température atteint 1°C.

L'analyse des températures nocturnes sur une parcelle bordée par des haies brise-vent met en évidence une multitude de microclimats. A une échelle encore plus fine, on constate que l'arbre fruitier a une influence sur les paramètres climatiques pouvant favoriser la formation de microclimat - *de l'ordre du mètre* - et localiser, le cas échéant, les dégâts liés au gel à une partie spécifique de l'arbre. C'est le cas, notamment, du gel par évaporation des bourgeons floraux exposés aux premiers rayons solaires qui touchent seulement le côté de l'arbre exposé à l'Est. Ce type de variation ne peut se mesurer qu'avec des instruments de petites tailles implantés dans le végétal et suivant un pas de temps de l'ordre de la seconde.

## Conclusion

En période de gel de printemps, l'influence de la haie brise-vent sur les variables météorologiques et sur la croissance des arbres fruitiers génère une répartition hétérogène des dégâts.

L'action de la haie brise-vent sur les températures nocturnes est différente suivant sa nature (feuillu, cyprès, ...), sa perméabilité, son homogénéité, sa position par rapport à la pente et elle varie aussi en fonction des conditions atmosphériques. Quel que soit le type de gel - *radiatif, advectif et arrêt de mistral* - la haie agit plus ou moins intensément sur les phénomènes convectifs et radiatifs (tab 2.1) :

◆ En situation radiative - *anticyclonique, ciel clair, vent inférieur à 1-2 m/s* - quand la haie ne bloque pas les écoulements nocturnes, la réflexion du rayonnement infrarouge par les haies limite le refroidissement. Cet effet bénéfique sur la température n'est perçu que sur les premiers rangs à proximité des haies. Au milieu de la parcelle, les températures sont plus basses et comparables à celles relevées sur une parcelle ouverte. Dans ce cas de figure, la nature et l'homogénéité de la haie n'ont pas de grande influence ; seule, la hauteur du brise-vent détermine la surface de la parcelle profitant d'un apport énergétique.

◆ En situation radiative, quand la haie fait barrage aux écoulements nocturnes, le facteur radiatif est beaucoup moins prépondérant. C'est le ralentissement et le quasi-blocage de l'air par la haie imperméable qui provoque un fort refroidissement sur la parcelle située en amont du brise-vent. Immédiatement en aval du brise-vent, les températures sont plus clémentes puisque ce secteur est protégé de la masse d'air froid.

◆ En situation advective, c'est le facteur convectif qui est le plus influencé par la haie. Le ralentissement du vent, immédiatement à l'aval de la haie imperméable, accentue le refroidissement par déperditions radiatives. On note donc, sur la parcelle,

un écart de températures entre la partie protégée du vent et l'autre où le vent est suffisamment puissant pour empêcher la formation d'air froid au niveau du sol.

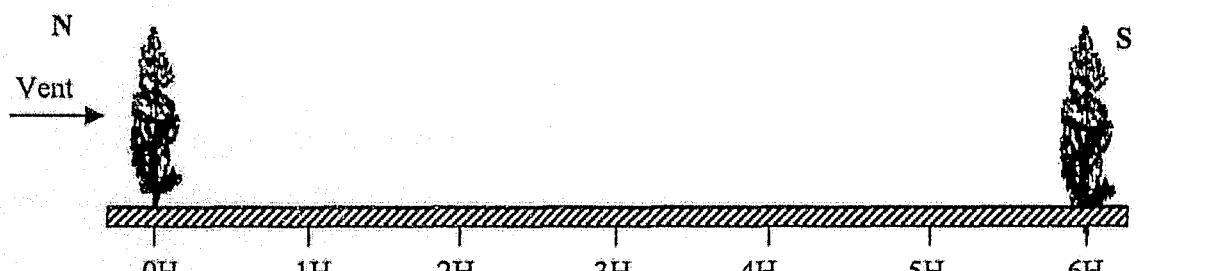
♦ En situation d'arrêt de mistral, deux phases gélives différentes se succèdent pendant lesquelles on peut voir l'importance des phénomènes radiatif et convectif suivant le type de gel. Durant la période advective, c'est l'influence de la haie sur le vent qui définit principalement le microclimat, alors qu'après l'arrêt du vent, c'est le facteur radiatif qui redevient prépondérant.

Quel que soit le type de gel (radiatif, advectif, arrêt de mistral), la variabilité spatiale des températures nocturnes à l'échelle microclimatique est importante. La forte hétérogénéité des températures est également constatée selon un axe vertical. Les haies brise-vent limitent totalement les échanges énergétiques et accentuent l'amplitude thermique verticale (stratification de l'air froid). Toutefois, l'apparition d'un couvert nuageux ou la formation d'un brouillard provoque une remontée immédiate et une homogénéisation (horizontale et verticale) des températures.

L'action des haies sur les paramètres radiatifs a également des conséquences sur la température de la couche superficielle du sol. Les températures relevées à 10 cm de profondeur montrent que le secteur ombragé (par la haie) subit un refroidissement plus important (plus de 5°C) que le secteur ensoleillé. La variabilité spatiale de la température du sol n'a pas de conséquence directe sur le risque gélif pour les cultures fruitières, mais elle peut entraîner à long terme un retard de la végétation dans la partie ombragée.

L'influence de la haie sur les processus de transfert d'énergie - *radiation, évaporation, convection et conduction* - provoque une importante variabilité spatiale de la température de l'air, du sol et du végétal. Cette hétérogénéité spatiale des températures agit sur le risque gélif à des échelles temporelles différentes. Sur une période très courte - *de quelques heures à quelques minutes* - les bourgeons situés en zone d'accumulation d'air froid en amont d'une haie imperméable ont une forte probabilité de subir des dommages. Sur une période beaucoup plus longues de plusieurs mois, la végétation disposée sur la partie ensoleillée de la parcelle a une croissance plus rapide par rapport à la partie ombragée. En cas de gel printanier, les organes végétaux les plus développés sont plus sensibles aux basses températures. C'est donc une interaction de phénomènes agissant à des échelles temporelles différentes qui définissent la forte variabilité spatiale du risque gélif à l'échelle microclimatique.





| Type de temps                 | Type de haie                                                                                 | Secteur le plus froid            | Secteur le moins froid                                               |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <u>Radiatif</u>               | <i>Imperméables</i>                                                                          | 2-4H                             | 0-2H et 4-6H                                                         |
|                               | <i>Perméables</i>                                                                            | 2-4H                             | 0-2H et 4-6H                                                         |
|                               | <i>Imperméable (blocage air froid)</i><br><i>Perméable (perpendiculaire aux écoulements)</i> | 25m en amont de la haie          | quelques mètres en aval de la haie<br>0-2H de chaque côté de la haie |
| <u>Advection</u>              | <i>Imperméables</i>                                                                          | 0-2H                             | 2-6H                                                                 |
|                               | <i>Perméables</i>                                                                            | homogénéisation des températures | homogénéisation des températures                                     |
| <u>Après arrêt de mistral</u> | <i>Imperméables</i>                                                                          | 2-3H                             | 0-2H et 4-6H                                                         |
|                               | <i>Perméables</i>                                                                            | 2-4H                             | 0-2H et 4-6H                                                         |
| <u>Nuageux ou brouillard</u>  | <i>Imperméables</i>                                                                          | homogénéisation des températures | homogénéisation des températures                                     |
|                               | <i>Perméables</i>                                                                            |                                  |                                                                      |

Tab 2.1 : Schématisation de la variabilité spatiale des températures nocturnes en milieu clos par divers types de temps favorables aux gelées printanières.

## 1.2 Les effets des brise-vent sur le vent

Les effets aérodynamiques des haies brise-vent ont été largement abordés dans les domaines de l'agriculture et de l'habitat. De nombreuses expérimentations portant sur l'efficacité des brise-vent ont été réalisées sur le terrain ou en laboratoire sous forme de simulation en soufflerie. En freinant ou en déviant l'écoulement du vent, le brise-vent protège les cultures sensibles ou les habitations des effets mécaniques du vent. Il existe deux types de haie : le brise-vent artificiel et la haie naturelle. Le premier, composé d'une bande plastique plus ou moins poreuse est généralement utilisé pour améliorer la qualité de vie (ex : brise-vent disposé en amont d'une terrasse). Le second, composé d'une rangée d'arbres, borde les parcelles agricoles. La haie d'arbres limite les dégâts dus aux effets mécaniques du vent, mais elle a également d'autres fonctions, comme celle de diminuer le dessèchement des plantes ou d'accentuer la précocité des cultures.

Après un bref rappel sur les effets aérodynamiques des haies brise-vent, nous évoquerons les résultats expérimentaux réalisés sur des parcelles protégées par des haies brise-vent.

### 1.2.1 Les connaissances actuelles sur les effets aérodynamiques des haies

#### 1.2.1.1 Action d'un obstacle sur le vent

« L'air s'écoule des hautes vers les basses pressions. Lorsqu'il rencontre un obstacle, il suit la solution de moindre énergie consistant à s'échapper par les côtés ou par le dessus, en contournant l'obstacle. Il va de soi que la forme et la nature de l'obstacle a une grande importance pour déterminer la nature de l'écoulement » (Aupetit, 1994). Un obstacle plein non profilé et perpendiculaire au vent perturbe fortement l'écoulement. Deux zones d'intense turbulence peuvent être observées : une zone de surpression *au vent de l'obstacle*, résultant de la compression contre l'obstacle, dans laquelle se séparent les filets d'air pour contourner l'obstacle par le dessus ; puis une zone dépressionnaire *sous le vent de l'obstacle* modifiant le « recollement des filets d'air » après le contour de l'obstacle. Cette zone est caractérisée par d'importants tourbillons divergents (fig 2.42) (Argent, 1992 ; Peter et Henderson-Sellers, 1999). De très fortes turbulences peuvent être observées *sous le vent* d'obstacles mal profilés ou non poreux. Inversement, dans le cas d'un obstacle poreux, les turbulences sont limitées *au vent* et *sous le vent*, seule la force du vent est diminuée (fig 2.43a). L'influence d'un obstacle sur le vent est différente suivant sa forme, sa porosité et sa hauteur. C'est le cas des haies brise-vent, dont les propriétés diverses modifient l'écoulement de l'air et créent un microclimat (Castener, 1984 ; Gandemer, 1985 ; Barthelmie *et al.*, 1993 ; Geiger, 1995).

#### 1.2.1.2 La notion de porosité

Si un obstacle plein crée une zone de surpression, elle-même à l'origine des tourbillons observés du côté sous le vent, une haie perméable propose une autre solution que celle de contourner l'obstacle : elle agit comme un filtre (fig 2.43b). En effet, une partie de la masse d'air comprimée traverse l'obstacle, même si l'essentiel le contourne encore par le haut

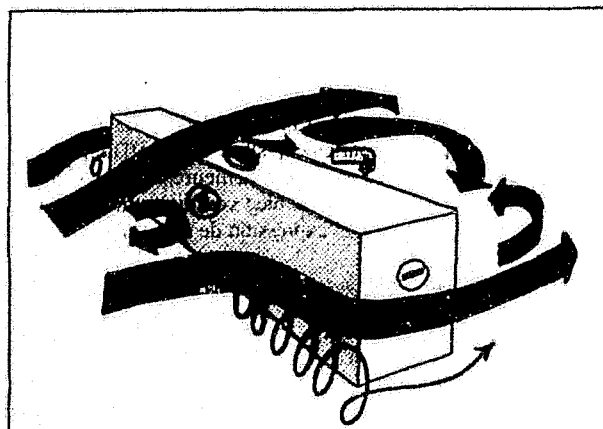


Fig 2.42 : Contournement d'un mur opaque (d'après Gandemer, 1991).

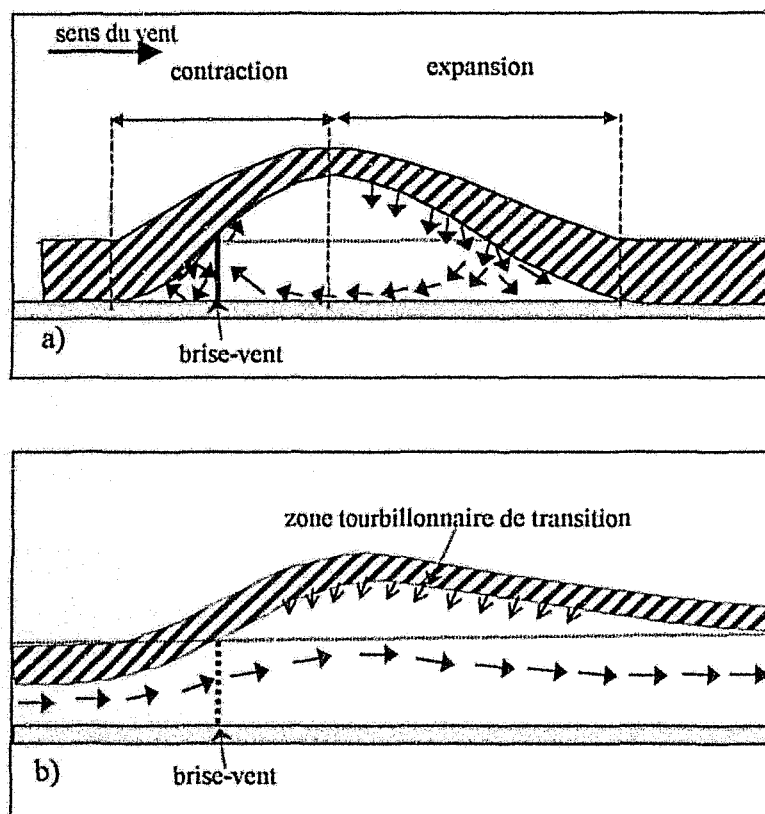


Fig 2.43 : Représentation schématique de l'effet d'un brise-vent imperméable (a) et d'un brise-vent perméable (b) sur l'écoulement de l'air (d'après Guyot, 1984).

et par les extrémités. La surpression est moins élevée, l'accélération moins violente, les tourbillons moins visibles et ce d'autant plus que l'air qui a pu traverser l'obstacle les repousse plus loin : *« la veine défléchie n'a pas tendance à se plaquer aussi rapidement au sol et donc l'action d'un brise-vent perméable sera d'autant plus étendue que dans le cas d'un brise-vent imperméable »* (Castaner, 1984). La notion de porosité agit donc sur le ralentissement de la vitesse du vent et sur la limitation de la zone tourbillonnaire générée à l'aval du brise-vent. Pour que le brise-vent joue réellement son rôle de protection vis-à-vis des cultures, il doit être assez perméable pour que l'air puisse s'infiltrer. Toutefois, le vent doit être suffisamment ralenti. *« De nombreuses expérimentations ont permis de montrer l'existence d'une porosité optimale pour laquelle la combinaison de la réduction du vent et de l'extension de la zone protégée a une valeur maximale. Cette porosité est de l'ordre de 40% pour un brise-vent sans épaisseur »* (Guyot, 1990).

#### 1.2.1.3 Notion d'homogénéité

Un brise-vent est efficace s'il permet, d'une part de freiner le vent et d'autre part de repousser les tourbillons. Une répartition des pores homogène s'avère donc primordiale: si, à une hauteur précise, le vent ne peut plus s'infiltrer, la zone de surpression s'accroîtra et dans le même temps, la turbulence de l'air. En fait, *« pour qu'un brise-vent fasse sentir son action sur une distance importante, il est indispensable que sa base soit perméable »* (Guyot, 1977). D'un autre côté, une base trop perméable laisse passer les filets d'air comprimés et accélérés, qui contournent ainsi par le bas comme par le haut du brise-vent : les tourbillons s'observent alors dès le passage de l'obstacle. A la notion de porosité, s'ajoute donc celle d'homogénéité de l'obstacle, de haut en bas.

#### 1.2.1.4 Importance de la hauteur du brise-vent

La hauteur du brise-vent joue évidemment un rôle important dans la protection des cultures. D'après Guyot (1990), *« l'extension de la zone que les brise-vent protègent est sensiblement proportionnelle à leur hauteur »*. En effet, plus un brise-vent est haut et plus la section du vent qui le heurte s'étend en hauteur. De cette remarque découle le fait que l'efficacité des haies se quantifie en longueur d'espace protégé, mesurée en nombre de fois la hauteur du brise-vent (ce qui permet de faire des comparaisons entre des obstacles différents).

#### 1.2.1.5 Application aux brise-vent naturels

Les différentes notions, abordées ici, concernent l'efficacité d'un obstacle exposé au vent. En les appliquant concrètement aux brise-vent naturels, nous pouvons opposer deux grands types de haies : les feuillus et les résineux. Les protections assurées par ces types d'arbres varient en fonction de la vitesse du vent. En effet, les feuilles *« ont tendance à se placer parallèlement à l'écoulement du vent. La porosité d'une haie de feuillus augmente avec la vitesse du vent »*. Les conifères réagissent différemment, *« les branches ont tendance à se plaquer les unes contre les autres lorsque la vitesse du vent s'accroît, réduisant ainsi la porosité du brise-vent »* (Castaner, 1984). Les feuillus, plus perméables, permettent donc de réduire la vitesse du vent sur une plus grande distance horizontale, par contre, les résineux assurent une protection permanente, mais sur une distance horizontale plus limitée.

#### 1.2.1.6 Caractéristiques du brise-vent « idéal »

Les effets du vent les plus dommageables pour les cultures sont logiquement ceux qui agissent sur la période allant de la formation à la maturité des fruits. Ainsi, les brise-vent doivent être composés d'espèces « *qui conservent leur feuillage suffisamment tard dans l'automne pour protéger les fruits jusqu'à leur récolte, et suffisamment précocement au printemps pour protéger les feuilles et les fleurs* » (Bazin, 1988). En effet, un arbre sans feuille a une porosité trop importante pour protéger efficacement les cultures. Ainsi, « *la première qualité d'un brise-vent est d'être perméable, afin d'éviter les tourbillons* ». Cependant, il doit être ni trop poreux : « *pour cela, on emploie des feuillus qui laissent passer, tout en ralentissant, 50% de l'air* », ni trop dense : « *les résineux, dont la perméabilité est plus faible créent après deux ou trois fois la hauteur du brise-vent, de violents tourbillons* » (Castaner, 1983). Les brise-vent agissent en effet à la manière d'un obstacle plein, engendrant la formation d'une cellule à l'aval où l'air est stable ; à cet espace limité de protection succède rapidement un vent violent et turbulent. En plus de cette notion de perméabilité, il faut rappeler l'importance de la question de l'homogénéité : dans des conditions naturelles, les arbres peuvent avoir tendance à se dégarnir en leur base par exemple (cas de certaines essences telles les troènes, cas également des vieux arbres). Ainsi, « *pour assurer une bonne protection, le brise-vent doit être bien garni de la base au sommet, ce qui amène souvent à utiliser plusieurs espèces* » (Guinaudeau, 1981) : il faut donc intercaler un bourrage composé d'arbustes entre les arbres de haut jet (Touret, 1998). Enfin, dans tous les cas, la haie doit être la plus haute possible, pour protéger une grande distance. L'estimation de l'efficacité de ces brise-vent est variable selon les auteurs : d'après Guinaudeau (1981), Biber (1987), Bazin (1988) et Soltner (1994), cette protection s'étend sur 15 à 20 fois la hauteur de la haie. Ringuelet (1969) est plus prudent et détaille les différentes distances de protection selon le pourcentage de réduction du vent (à une distance de 20 fois la hauteur de la haie, la réduction du vent initial est de 15%) et Mazerand (1970) estime que cette zone de protection peut s'étendre jusqu'à 25 fois la hauteur de la haie (avec une réduction du vent d'au moins 30%).

La distance de protection en aval des haies imperméables est nettement plus restreintes. D'après Mc Aneney et Judd (1990), elle s'étend jusqu'à 3 fois la hauteur de la haie. Les différentes distances de protection varient fortement suivant les auteurs parce qu'elles ont été établies suivant des méthodes (analyse en soufflerie ou mesures sur le terrain) et des types de vent différents (vent régulier ou par rafales) (Nord, 1990 ; Wang et Takle, 1995). Cependant, dans tous les cas, l'action des brise-vent est limitée dans l'espace. Pour protéger un large espace agricole, il est nécessaire de planter une succession de brise-vent plus ou moins rapprochés selon leur nature.

#### 1.2.1.7 Le réseau de haies brise-vent

D'après certains auteurs (Guyot et Seguin, 1976 ; Guyot, 1991), les effets aérodynamiques des brise-vent ne se notent pas seulement à l'échelle de la parcelle, mais également à une échelle plus vaste, c'est-à-dire au niveau du réseau de haies. Si l'on considère un réseau de protection suffisamment étendu, il se développe une « rugosité régionale ». La rugosité au sol formée par la succession de haies réduit la vitesse du vent. Un brise-vent situé à l'intérieur d'un réseau de protection combine donc un effet « parcellaire » qui se manifeste sur une faible distance (à cause de la turbulence induite par la détente de l'air en aval) et

l'effet de l'aménagement de haies qui se traduit par une réduction générale du vent sur toute la parcelle (fig 1.16 cf. partie 1).

### 1.2.2 Résultats expérimentaux

En procédant à l'analyse du comportement du mistral sur des parcelles bordées par des brise-vent, on parvient à définir les secteurs où les effets mécaniques du vent sont les plus intenses et les plus dangereux pour les cultures. Des relevés de direction et de vitesse du vent sont réalisés sur des parcelles situées en aval de haies brise-vent dont les caractéristiques (nature, perméabilité, hauteur) sont différentes. Le protocole ainsi que la technique de mesure ont évolué au fil de l'étude. Au commencement, les mesures sont effectuées ponctuellement sur plusieurs points de la parcelles plus ou moins éloignés de la haie. Chaque série de mesures a un décalage de quelques minutes (environ 15 mn), or, le mistral n'est pas un vent régulier et les données acquises en chaque point ne sont pas comparables dans l'absolu (Beltrando *et al.*, 1996). Afin de remédier à ces insuffisances, nous avons développé un second protocole expérimental permettant d'obtenir les informations simultanément sur plusieurs points de la parcelle. Les capteurs électroniques sont reliés en réseau à une station d'acquisition de données (Smart Reader) qui relève des tensions électriques suivant un pas de temps défini. Une girouette et un anémomètre sont également disposés sur un poste témoin situé dans un secteur dégagé.

#### 1.2.2.1 Ecoulement du vent en aval d'une haie imperméable

L'expérimentation réalisée au cours des épisodes de mistral du 30 avril 1997 (vent de nord-ouest et vitesse moyenne de 5 m/s à Marignane)<sup>12</sup> et du 7 juillet 1999 (vent de nord-ouest et vitesse moyenne de 10 m/s à Marignane) met en évidence l'impact d'une haie imperméable sur le vent et notamment le secteur où les effets mécaniques du vent sont amoindris.

Le 30 avril 1997, quatre girouettes reliées en réseau sont disposées à une hauteur de 3m50 (hauteur maximale des arbres fruitiers) sur plusieurs points à des distances variables de la haie brise-vent (cyprès/roseaux de 16 m de haut, imperméable de la base au sommet, parcelle n°11 de l'annexe n°5). Les mesures ponctuelles de vitesse ne sont pas exploitées parce que le temps entre chaque prise d'information est trop important pour valider les résultats. En amont de la haie, même si la direction principale du mistral (nord-ouest) est la plus fréquente, la rose des vent présente de multiples directions, traduisant la présence de turbulences. Le premier capteur situé en aval de la haie obtient deux directions principales complètement opposées. Cela démontre que la force du vent est très faible puisque l'empennage reste immobile un certain temps sur une direction. Cette partie de la parcelle correspond au secteur d'abri où le vent est « projeté » en hauteur après le contact avec la haie. Les directions de la girouette disposée à environ 30 m de la haie mettent en évidence un vent beaucoup plus turbulent. La forme « en étoile » de la rose des vents indique que l'empennage tourne sur lui-même sous l'action des tourbillons. A partir d'une distance correspondant à environ 6 fois la hauteur de la haie (60 m), l'influence de la haie diminue. La direction

<sup>12</sup> Cellule anticyclonique sur la partie occidentale de la France et dépression sur le sud-est de l'Italie (d'après BHER de Météo France).

principale est de nord-ouest même si de nombreuses turbulences sont toujours présentes (fig 2.44).

Le 7 juillet 1999, sept girouettes reliées en réseau sont disposées à une hauteur de 3m50 de façon à couvrir l'ensemble de la parcelle (photo 4 ; fig 2.45a ; parcelle n°12 cf. annexe n°5) :

- Immédiatement en aval de la haie (2<sup>ème</sup> rang), les capteurs en bordure de parcelles sont soumis à des turbulences générées par la compression latérale de l'air contre la haie. Au centre du rang, le vent est très faible ( $V_{moy} = 0,08$  m/s ;  $V_{max} = 6$  m/s).
- Au 6<sup>ème</sup> rang, le vent est turbulent sur tous les points de mesures. Ce secteur correspond à la retombée du vent dans les premiers mètres de la couche limite. Le vent est plus fort ( $V_{moy} = 0,9$  m/s ;  $V_{max} = 11$  m/s) et plus turbulent (forme des roses des vent) par rapport au secteur abrité.
- Au 11<sup>ème</sup> rang, le vent est moins turbulent mais plus intense. La direction principale est de nord-ouest (mistral). La vitesse maximale est comparable à celle enregistrée sur le 6<sup>ème</sup> rang ( $V_{max} = 10$  m/s), mais la vitesse moyenne est beaucoup plus élevée ( $V_{moy} = 3,4$  m/s).
- Sur le poste témoin, situé dans une parcelle dégagée (sans haie en amont), la force et la fréquence est beaucoup plus élevée ( $V_{moy} = 6$  m/s ;  $V_{max} = 16$  m/s) que sur la parcelle protégée (fig 2.45b, c).

Comme l'ont démontré Guyot et Seguin (1976), les haies imperméables agissent sur le vent comme un obstacle plein. En entrant en contact avec la haie, le vent est dévié verticalement avant de pénétrer violemment et tourbillonnant quelques mètres en aval de la parcelle. Les côtés de la parcelle sont également exposés aux turbulences issues de la déviation latérale du vent aux extrémités de la haie. La répétition des mesures a permis de définir un secteur d'une distance d'environ 2 à 3 fois la hauteur de la haie où les turbulences et la force du vent sont amoindries. Latéralement, on estime que les bords de parcelles subissent l'action négative du vent turbulent sur un secteur triangulaire dont le point partant de l'extrémité de la haie à un angle d'environ 15° (fig. 2.46). Ces valeurs sont valables pour les haies imperméables de cyprès homogènes. En aval de la haie de roseaux (cannes de Provence), encore plus imperméable, la zone dite « protégée » est évaluée sur une distance de 1.5 à 2 fois sa hauteur. Ces brise-vent, de faible hauteur, sont généralement disposés sur de petites parcelles de maraîchage (serres). Les distances de « protection » que nous obtenons sont nettement inférieures à celles estimées par Seguin (1976), Castaner (1983), Guyot (1991) qui varient entre 4H et 6H. Seul, la typologie de Mazerand (1970) portant sur les brise-vent du bocage présente des distances proches de celles que nous avons déterminées. Les nombreux travaux qui ont fait l'objet d'études sur les effets aérodynamiques des brise-vent ont été réalisés en laboratoire avec des analyses en soufflerie. Certains auteurs ont démontré que la réduction de la vitesse du vent derrière une haie était indépendante de la vitesse de référence mesurée en zone ouverte (Woodruff, 1954 ; Blenk et Trienes, 1956). D'après Verbrugghe (1989), ces constatations sont valables pour les brise-vent artificiels, mais lorsque les tests sont effectués sur des brise-vent naturels, le vent modifie la porosité des arbres. « Les

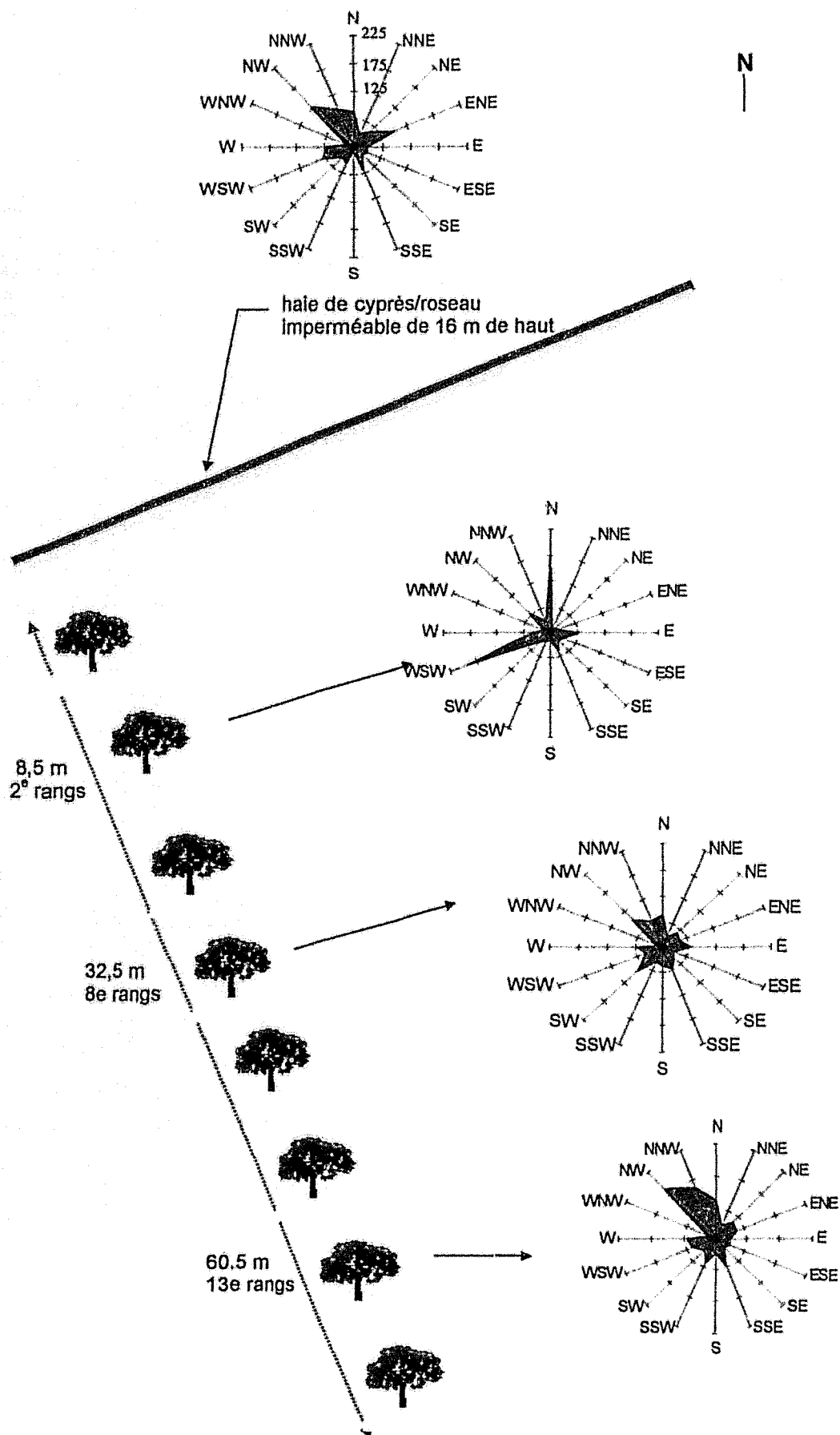


Fig 2.44 : Ecoulement du mistral en aval d'une haie imperméable : rose des vent réalisées avec des données enregistrées suivant un pas de temps d'une seconde (30/04/1997).



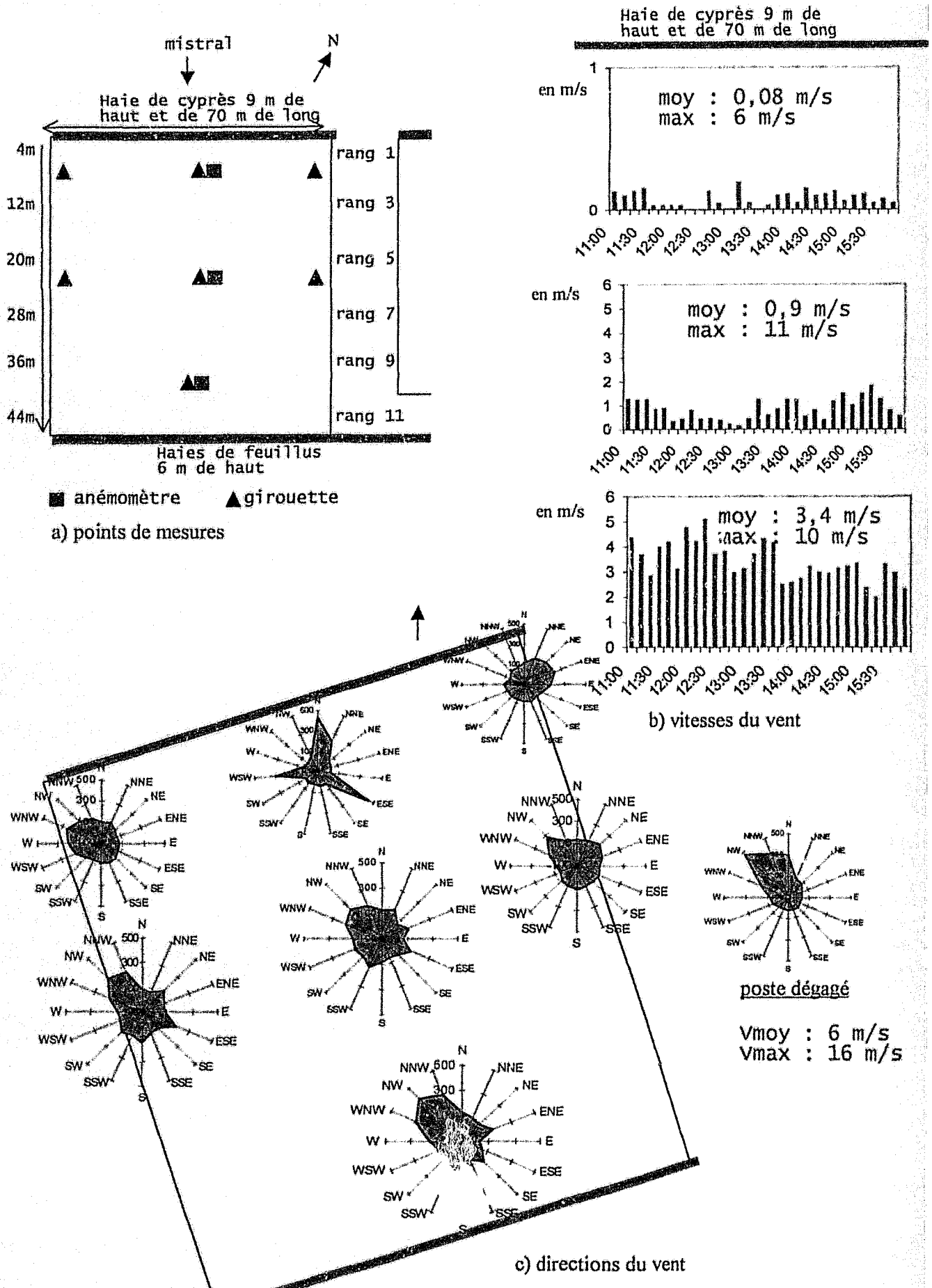


Fig 2.45 : Ecoulement du mistral en aval d'une haie brise-vent imperméable : moyenne toutes les 10 mn à partir d'un pas de temps de 10 secondes (7/07/1999 de 11h00 à 16h00).

a) emplacement des points de mesures  
b) vitesse du vent

feuilles des brise-vent de feuillus ont tendance à se placer parallèlement à l'écoulement, accentuant ainsi la porosité du brise-vent et modifiant ses effets aérodynamiques. Lorsque les brise-vent sont constitués de conifères, les branches se plaquent les unes contre les autres lorsque la vitesse du vent augmente, la porosité du brise-vent est réduite ainsi que son efficacité ». Il apparaît surtout que la nature de l'écoulement est très importante. Les expériences réalisées par Guyot (1991) démontrent qu'un même type de brise-vent peut avoir des effets aérodynamiques différents suivant le site d'étude. On remarque notamment que la protection d'un même type de brise-vent est plus efficace avec un vent peu turbulent comme en région parisienne qu'avec un vent très turbulent (Guyot et al., 1976 ; Vezina, 1985).

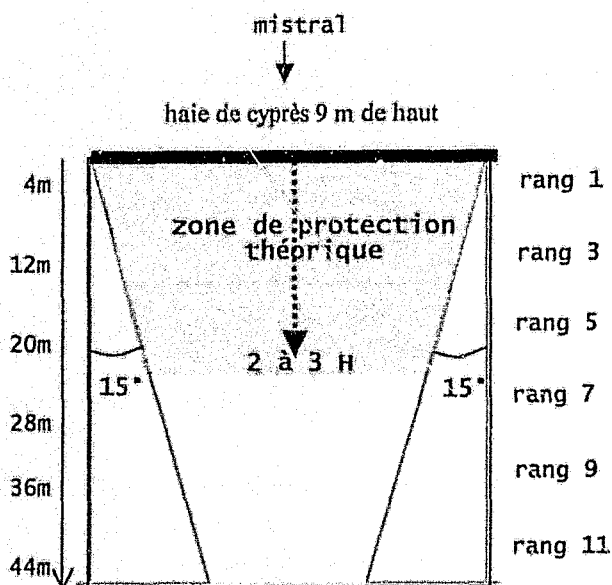


Fig 2.46 : Schéma de la protection théorique en aval d'une haie imperméable.



Photo 4 : anémomètre disposé sur un mât de 3m50 (cliché H.Quénol).

#### 1.2.2.2 Ecoulement du vent en aval d'une haie perméable

Le comportement du vent au contact d'une haie perméable diffère totalement par rapport à l'action de la haie imperméable. Le vent n'est pas bloqué mais freiné, ce qui limite les turbulences.

Le 22 avril 1997 (vent de nord-nord-ouest et vitesse moyenne de 13,5 m/s à Marignane)<sup>13</sup>, les girouettes disposées en amont et en aval d'une haie perméable de peupliers enregistrent des directions similaires sur l'ensemble des points de mesures (parcelle n°13 de l'annexe n°5). La prédominance du secteur nord-ouest démontre que les rafales de mistral ne sont pas déviées par la haie mais seulement ralenties (fig 2.47).

<sup>13</sup> Hautes pressions sur le nord-ouest de la France alors qu'un minimum barométrique est centrée sur l'Italie (d'après BHER Météo France)

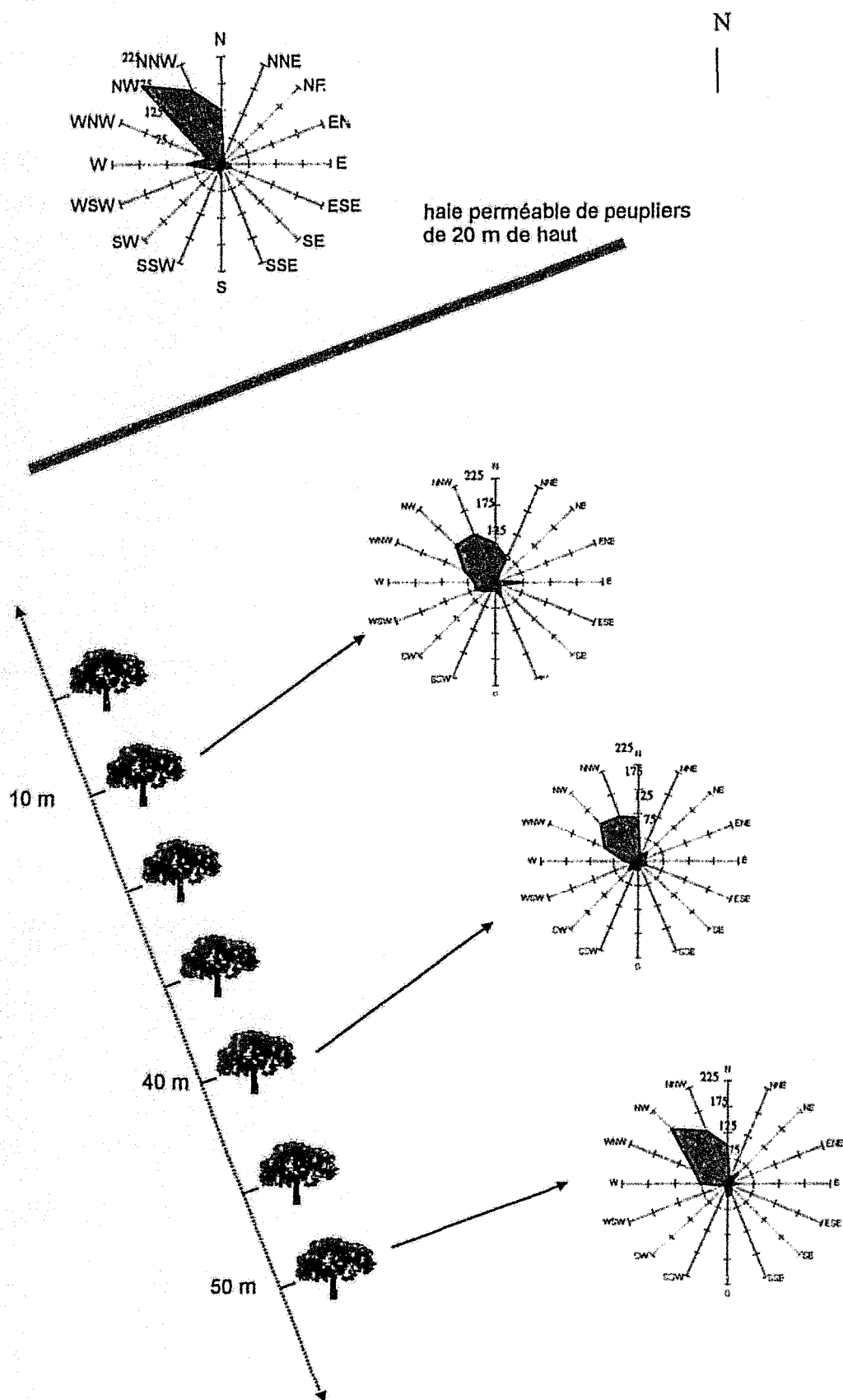


Fig 2.47 : Ecoulement du mistral en aval d'une haie perméable : rose des vent réalisées avec des données enregistrées suivant un pas de temps d'une seconde (22/04/1997).

Le 6 juillet 1999, des mesures de vitesse de vent sont réalisées sur cette parcelle (n°13) et sur un poste témoin sans haie en amont. Le vent est beaucoup moins fort en aval de la haie mais il n'y a pas de secteur complètement abrité comme dans le cas des haies imperméables. Des mesures itinérantes avec une girouette ont permis d'observer des turbulences à chaque extrémité des haies. Cela engendre un secteur néfaste pour les cultures en bordure de parcelle comparable à la haie imperméable (environ 15°) (fig 2.48). La distance sur laquelle le vent est ralenti représente toute la longueur de la parcelle c'est-à-dire près de 90 m. Des mesures réalisées sur une parcelle (n°14) beaucoup plus grande, (200 m de long en aval d'une haie de peupliers de 18 m de haut) ont montré que la vitesse du vent devient comparable à celle du poste témoin dégagé après une distance d'environ 8 à 10 fois la hauteur de la haie. L'avantage des haies perméables, constituées généralement de peupliers, est la hauteur des arbres qui augmente le secteur d'influence. L'action des haies perméables diminue de l'automne jusqu'au début du printemps lorsque les branches sont dépourvues de feuilles (période sans risque pour les arbres fruitiers). Pour les mêmes raisons évoquées dans le chapitre précédent, la distance de protection est inférieure à celles définies par certains auteurs comme Guyot ou Verbrugghe (1989) entre 15 et 20H.

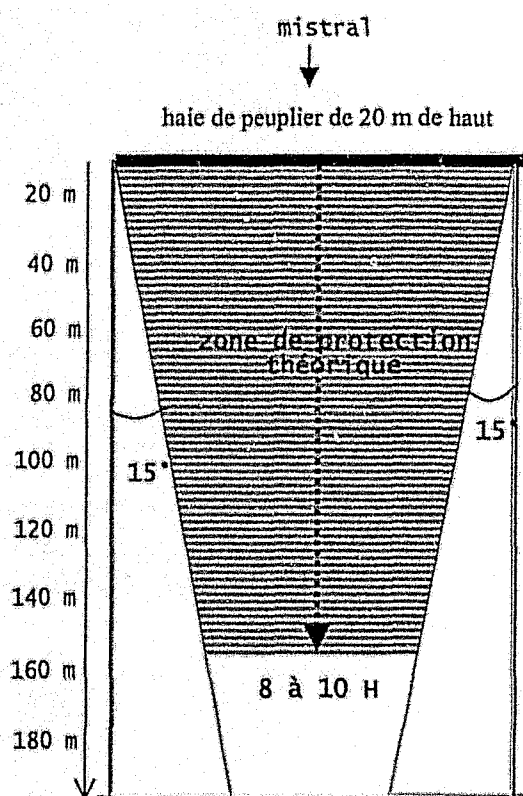


Fig 2.48 : Schéma de la protection théorique en aval d'une haie perméable.

### 1.2.2.3 Protection en aval des haies brise-vent ?

Lorsque le vent entre en contact avec une haie, les filets d'air subissent d'importantes modifications. Suivant les principes aérodynamiques développées précédemment (Rebuffet, 1975), les filets d'air sont accélérés et déviés aux abords de l'obstacle. Une zone de turbulence se met en place en aval de la haie entre le vent laminaire libre et le sol. Ces

turbulences sont à l'origine des dégâts qui affectent les cultures (fruits abîmés, serres arrachées, ...). Les mesures réalisées aux abords des haies ont permis de définir les secteurs « protégés » de la force du vent et de ses tourbillons. Ces secteurs dépendent de certaines caractéristiques des haies dont la porosité et la hauteur, qui déterminent les distances et la qualité de la protection.

Au cours des mesures météorologiques, les distances de protection ont été estimées en fonction de la réduction de la vitesse et des turbulences du vent. Il est cependant difficile de donner des valeurs fixes à partir desquelles les fruits risquent d'être endommagés. En effet, très peu d'étude ont été réalisées dans ce domaine. D'après Guyot (1983), un vent supérieur à 15 m/s peut casser les branches alourdies par les fruits ou alors, un vent de 8 m/s peut réduire la surface foliaire de certaines espèces sensibles. Aucune valeur n'est fixée sur une vitesse théorique à partir de laquelle les fruits subissent des dommages. Nous pouvons donc nous poser la question sur la validité des zones de protection définies dans la bibliographie.

Afin de valider les mesures météorologiques et d'étudier l'action du vent sur les fruits, nous avons mis en place une expérimentation agronomique visant à définir la proportion de fruits abîmés par arbre suivant la position par rapport à la haie. Les résultats de cette étude, qui seront exposés dans la troisième partie, apportent des informations supplémentaires sur le risque lié aux effets mécaniques du vent.

## Conclusion

Les mesures réalisées aux abords des haies ont permis d'évaluer la surface parcellaire « protégée » de la force du vent et de ses turbulences. Ces secteurs dépendent de certaines caractéristiques des haies dont la porosité et la hauteur, qui déterminent les distances et la qualité de la protection :

- ◆ en entrant en contact avec une haie imperméable, le vent est propulsé en hauteur avant de retomber violemment et sous forme tourbillonnaire sur les arbres fruitiers. Le contact avec les extrémités de la haie engendre également des turbulences et une déviation latérale du vent sur une zone triangulaire dont le point partant du bord de la haie à un angle d'environ 15°. La zone, en aval d'une haie imperméable (cyprès), où les effets mécaniques du vent (force et turbulences) sont limitées s'opère sur une distance d'environ 2 à 3 fois la hauteur de la haie. En aval d'une haie de roseaux (encore plus imperméable que le cyprès), l'air subit une très forte compression contre le brise-vent et retombe plus rapidement sur la parcelle. La distance de « protection » est estimée à 1,5 à 2 fois la hauteur de la haie ;
- ◆ en entrant en contact avec une haie perméable, la vitesse du vent est moins ralenti (par rapport à une haie imperméable), mais comme la compression de l'air est moins forte, les turbulences néfastes pour les arbres fruitiers sont plus faibles. En aval d'une haie perméable, nous estimons que le vent est fortement ralenti sur une distance de 8 à 10 fois la hauteur de la haie.

Ces deux types de haies analysés sont complémentaires. L'efficacité d'un réseau de brise-vent ne s'évalue pas seulement à l'échelle de la parcelle mais également sur plusieurs

parcelles successives. L'aménagement idéal et le plus répandu sur le site d'étude est composé d'une haie haute perméable (peupliers) en amont d'une succession de haies imperméables (cyprés, roseaux, ...). La haie peupliers pouvant atteindre 25m de haut est idéale pour freiner le vent sur une longue distance (+ de 200m). La haie de cyprès, d'une hauteur moyenne de 10m de haut, crée une zone calme d'environ 25m de long où le niveau de protection est supérieur à celui de la haie perméable. Cependant, le retour des turbulences est très violent alors qu'il est progressif derrière la haie perméable. La combinaison de ces deux types de haies permet de créer une protection graduelle en freinant progressivement le vent. L'effet cumulatif des divers brise-vent amplifie la qualité de la protection.

Etudier l'influence du brise-vent à l'échelle microclimatique est une étape nécessaire pour évaluer l'impact du remblai sur le gel printanier et sur l'écoulement du mistral. En effet, la variabilité spatiale des variables météorologiques peut être très importante sur une petite surface. En situation gélive, les variations de températures atteignent plusieurs degrés en amont et en aval d'une haie imperméable en situation de blocage d'air froid. Ces fortes fluctuations thermiques pouvant être apparentées à des phénomènes d'échelles plus vastes, il est donc nécessaire de connaître leurs origines.

Dans les deux chapitres qui suivent, nous présentons les résultats des mesures météorologiques réalisées à différentes échelles spatiales dans le but de définir l'impact climatique de la LGV. Dans le cadre de l'expérimentation sur la variabilité spatiale des températures nocturnes en situation gélive, les mesures sont effectuées de l'échelle la plus vaste (*mésolocale*) à la plus fine (*microclimatique*) de manière à évaluer, selon l'emboîtement des échelles spatiales, l'influence des différents éléments du milieu sur la répartition des températures. Les mesures météorologiques permettant d'étudier les fluctuations de l'écoulement du mistral à proximité de la LGV sont faites au cours des différentes phases de construction des infrastructures ferroviaires. Celles-ci permettent d'observer la variation de l'écoulement du mistral en fonction des diverses transformations du milieu (destruction des haies brise-vent sur un large couloir ; construction d'un obstacle de plus de 15 m de haut).

## 2 IMPACT DE LA LIGNE FERROVIAIRE SUR LE GEL PRINTANIER

---

### 2.1 Echelle locale ou topoclimatique

A l'échelle topoclimatique, l'influence du relief sur les températures est prépondérante. Choissnel et Jacq (1987), dans leur méthodologie sur l'étude des topoclimats en moyenne montagne définissent le niveau du topoclimat comme « *les modifications des caractères du climat régional liées à des phénomènes météorologiques systématiques se produisant régulièrement chaque jour avec plus ou moins d'intensité comme les brises ou les variations du rayonnement solaire dues à l'exposition des pentes* ».

Par temps radiatif, les secteurs en pente et dégagés sont généralement moins gélifs parce que le brassage de l'air y est possible alors que dans les fonds de vallée ou les dépressions l'air froid peut stagner. L'objectif de l'expérimentation à ce niveau d'échelle est de déterminer les types d'écoulements présents dans la basse vallée de la Durance afin d'évaluer leur influence sur les températures nocturnes.

Par temps advectif ou en situation d'arrêt de mistral, la variabilité spatiale des températures est moins importante qu'en situation radiative. Le vent, en limitant l'apparition des écoulements nocturnes, homogénéise les températures. Cependant, les secteurs à l'abri du vent, c'est-à-dire en aval d'un massif montagneux, subissent un refroidissement plus important principalement en situation d'arrêt de mistral (Bordreuil, 1975). En phase advective, le vent étant moins fort en secteur abrité, il limite l'action de brassage de l'air froid au niveau du sol. Les secteurs les plus gélifs sont donc ceux où, du fait de l'orographie, les arrêts nocturnes ont le plus de chance de se produire. Il s'agit, par exemple, des secteurs sous le vent des reliefs transversaux au vent de nord-ouest, des cuvettes et des bassins abrités du mistral. En 1975, Bordreuil a réalisé une cartographie des zones gélives dans les Bouches du Rhône. Ce travail, accompli à partir d'une étude statistique des variables météorologiques mesurées au cours de gelées printanières entre 1946 et 1975, aboutit à un découpage du département en secteurs à probabilité plus ou moins importante de gel. Une classification des secteurs de production agricole par ordre de gélivité décroissante a été réalisée pour « *le cas du gel consécutif à un arrêt nocturne (ou tout du moins à un affaiblissement très marqué) des courants de nord à nord ouest, 80 à 90% des gelées de printemps du département étant associées à des fins de mistral* » (Bordreuil, 1975). Sur un classement comportant 8 classes, la probabilité de gel d'Orgon à Mallemort est moyenne (classe 5, moyennement gélive). L'ouverture entre les Massifs du Petit Lubéron et des Alpilles permet au mistral de s'engouffrer et d'homogénéiser les températures en brassant l'air. Par contre, à l'est de Mallemort, la probabilité de gel est très forte (classe 2, très gélive). Le Petit Lubéron crée un secteur d'abri où la faiblesse du mistral accentue le refroidissement radiatif (fig 2.49). Par gel advectif ou d'arrêt de mistral, il est fréquent d'observer, au lever du jour, de la gelée blanche vers la commune de Charleval alors qu'à Mallemort les températures sont positives (fig 2.50).

- ZONE 1 :** Pays d'Aix, Haute Vallée de l'Arc et Vallée de la Durance de la région de Meyrargue à l'extrême Est du département.
- ZONE 2 :** Vallée de la Durance de l'Ouest de Meyrargue jusqu'à Mallemort et versant Nord de la Trevaresse.
- ZONE 3 :** Régions de Roquevaire, Aubagne et Cuges-les-Pins.
- ZONE 4 :** Zone comprise entre Durance et Alpilles et limitée approximativement par le triangle Orgon-Noves-St-Rémy.
- ZONE 5 :** Plaine de la Crau et vallée de la Durance entre Orgon et Mallemort.
- ZONE 6 :** Basse Durance et vallée Rhône et, plus généralement l'ensemble des zones situées au Nord-Ouest de la limite Noves-St-Rémy-Arles.
- ZONE 7 :** Pourtour de l'étang de Berre.
- ZONE 8 :** Camargue et régions immédiatement voisine du littoral.

Fig 2.49 : Classement des zones de production agricole par ordre de gélivité décroissante (d'après Bordreuil, 1975).

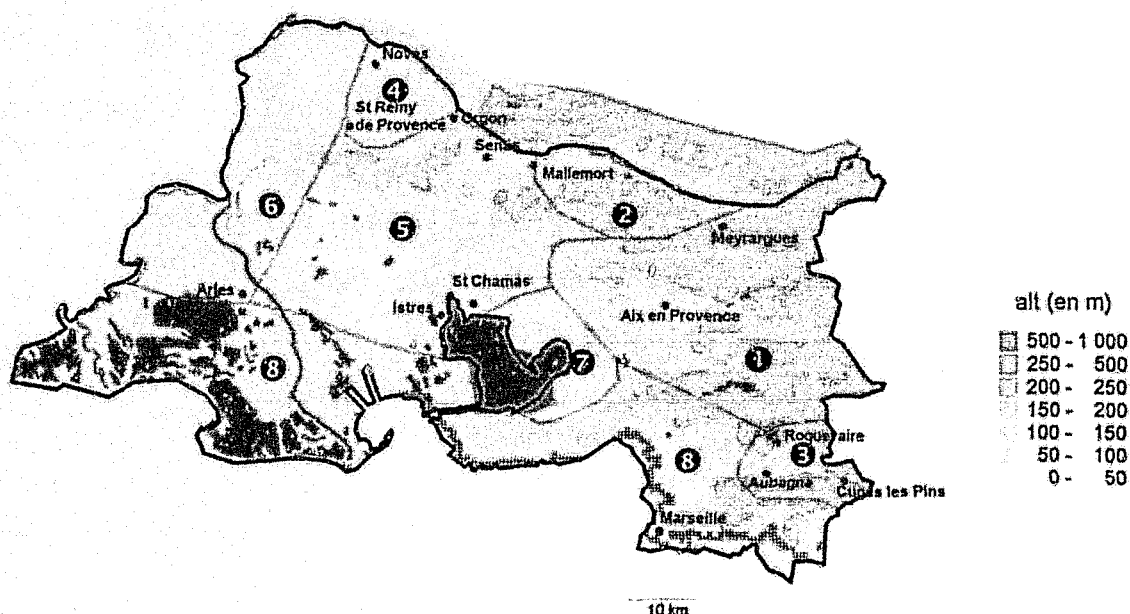


Fig 2.50 : Localisation des secteurs agricoles gélifs (d'après Bordreuil, 1975).



L'expérimentation de terrain s'est déroulée en deux temps : tout d'abord avec des mesures itinérantes des directions d'écoulements nocturnes, du taux d'humidité relative et de températures, puis par l'installation de postes fixes munis de capteurs enregistreurs disposés à 1,5 m de haut. Le parcours théorique des écoulements ainsi que les secteurs subhorizontaux sont identifiés sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT)<sup>14</sup>. L'utilisation de cet outil et les résultats des mesures itinérantes ont permis de définir l'implantation des points de mesures fixes en fonction du relief. Sur six postes de mesures, trois sont installés dans la vallée principale (un à proximité de la Durance et deux sur des parcelles dégagées), un est disposé au pied un versant du Petit Luberon et deux autres sont placés près de vallées transversales de dimensions plus restreintes. Pour ces deux derniers points de mesures, le premier capteur est disposé en bas de versant exposé au nord alors que le second est installé de l'autre côté du versant orienté vers le sud (fig 2.51).

Le réseau a donc été mis en place en prenant en compte les caractéristiques du relief et de façon à limiter au maximum les perturbations liées à l'occupation du sol (haies, bâtiments, ...). Les sites choisis respectent assez bien les règles de l'OMM (1990) *préconisant que les capteurs doivent être disposés à une distance supérieure à dix fois celle des obstacles qui les entourent*. Les points de mesures qui peuvent présenter un doute sur leur validité sont ceux placés à proximité du réseau de haies brise-vent. Même s'ils sont à une distance supérieure à dix fois la hauteur des haies, il est possible que l'effet "régional" du réseau agisse sur les températures.

### 2.1.1 Par temps anticyclonique : refroidissement limité par une brise de vallée descendante

#### 2.1.1.1 Une brise de vallée puissante qui limite la formation des brises de versant

Durant les situations météorologiques stables, la vallée de la Durance est drainée par une *brise de vallée descendante*. C'est l'écoulement nocturne le plus influant dans cette forme de relief. Ce type d'écoulement, qui peut être par exemple apparenté aux phénomènes rencontrés dans le massif des Vosges ou dans le Fossé Rhénan, s'établit sur de longues pentes avec un faible dénivelé (Rotten, 1964 ; Scriber, 1965 ; Carrega, 1989, 1994 ; Fallot, 1992 ; Kastendeuch, 1996).

La brise de vallée descendante subit des variations journalières, elle ne peut être apparentée à un phénomène d'échelle topoclimatique (Choisnel et Jacq, 1987) mais de niveau régional (100km à 1km). Les mesures de directions de ce type d'écoulement mettent en évidence sa présence sur plusieurs dizaines de kilomètres en amont du site expérimental.

Les directions mesurées correspondent à l'orientation générale de la pente de la vallée. On constate que celle-ci varie d'est en ouest (fig. 2.51). Entre Pertuis et Mallemort, la vallée est orientée selon un axe nord-est/sud-ouest. Elle marque un changement à partir de Mallemort pour suivre un axe sud-est/nord-ouest. Le secteur de Mallemort forme donc un coudé où la direction change progressivement. Sur le secteur de l'étude, la direction doit donc

<sup>14</sup> Les différentes étapes de la construction du M.N.T. sont développées dans la partie consacrée à la modélisation par S.I.G.

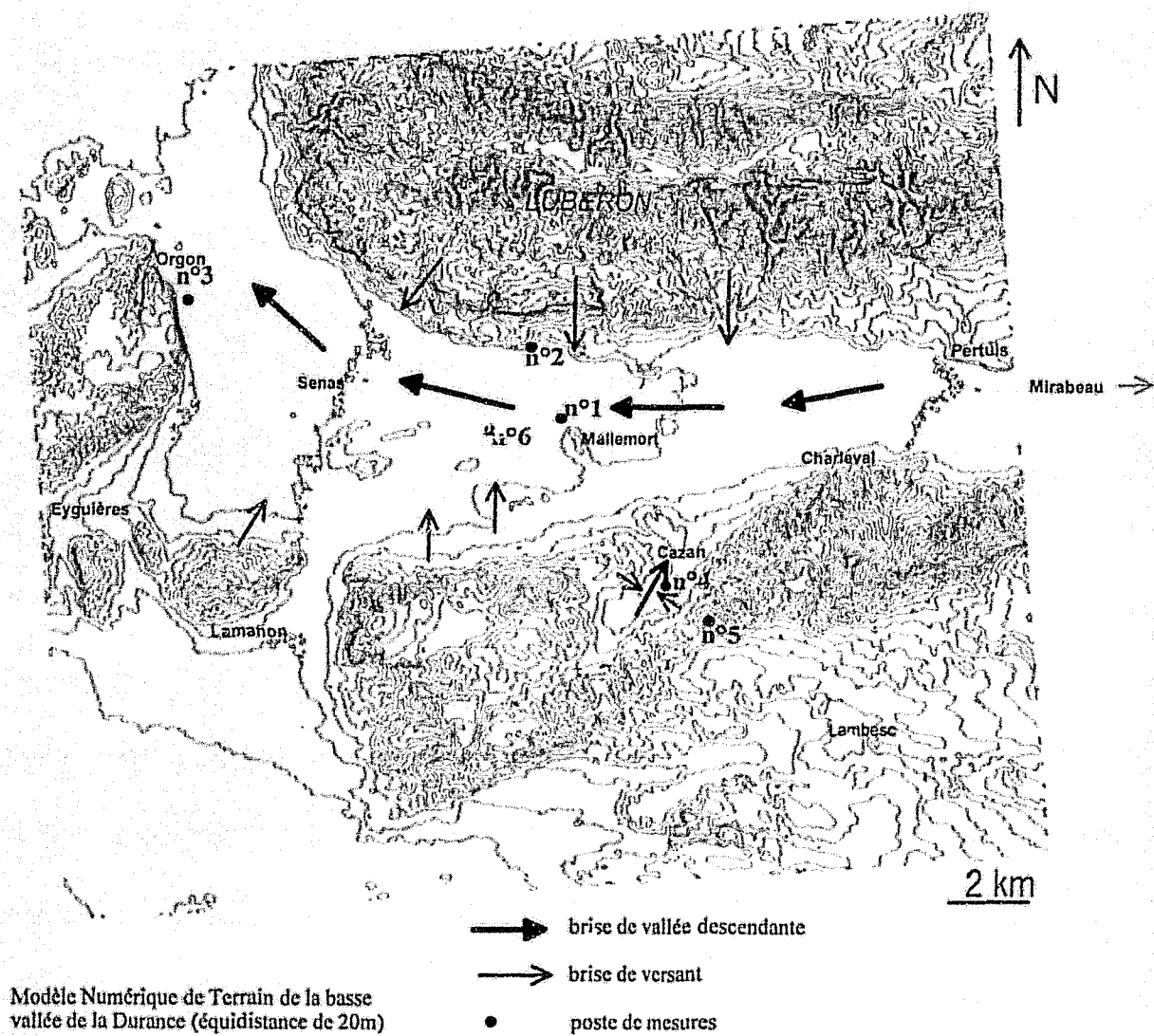


Fig 2.51 : Direction des écoulements nocturnes et postes de mesures pour les relevés à l'échelle locale.

suivre un axe oscillant entre est-ouest et sud-est/nord-ouest. Les campagnes de mesure concernant la direction des écoulements d'air dans ce secteur de la Durance confirment les observations faites à partir du Modèle Numérique de Terrain. La nuit du 20 au 21 octobre 1998, la brise suit la pente de la vallée de la Durance. Sa vitesse, relevée au-dessus de la Durance, atteint un maximum de 5m/s et une moyenne de 2.8m/s sur 5mn (action de brassage de l'air). Cette brise de vallée descendante est observée le long de la Durance jusqu'à 50km en amont de Mallemort, à Mirabeau. Elle est probablement présente plus en amont mais aucune mesure n'a été réalisée (fig 2.52 et annexe 8a).

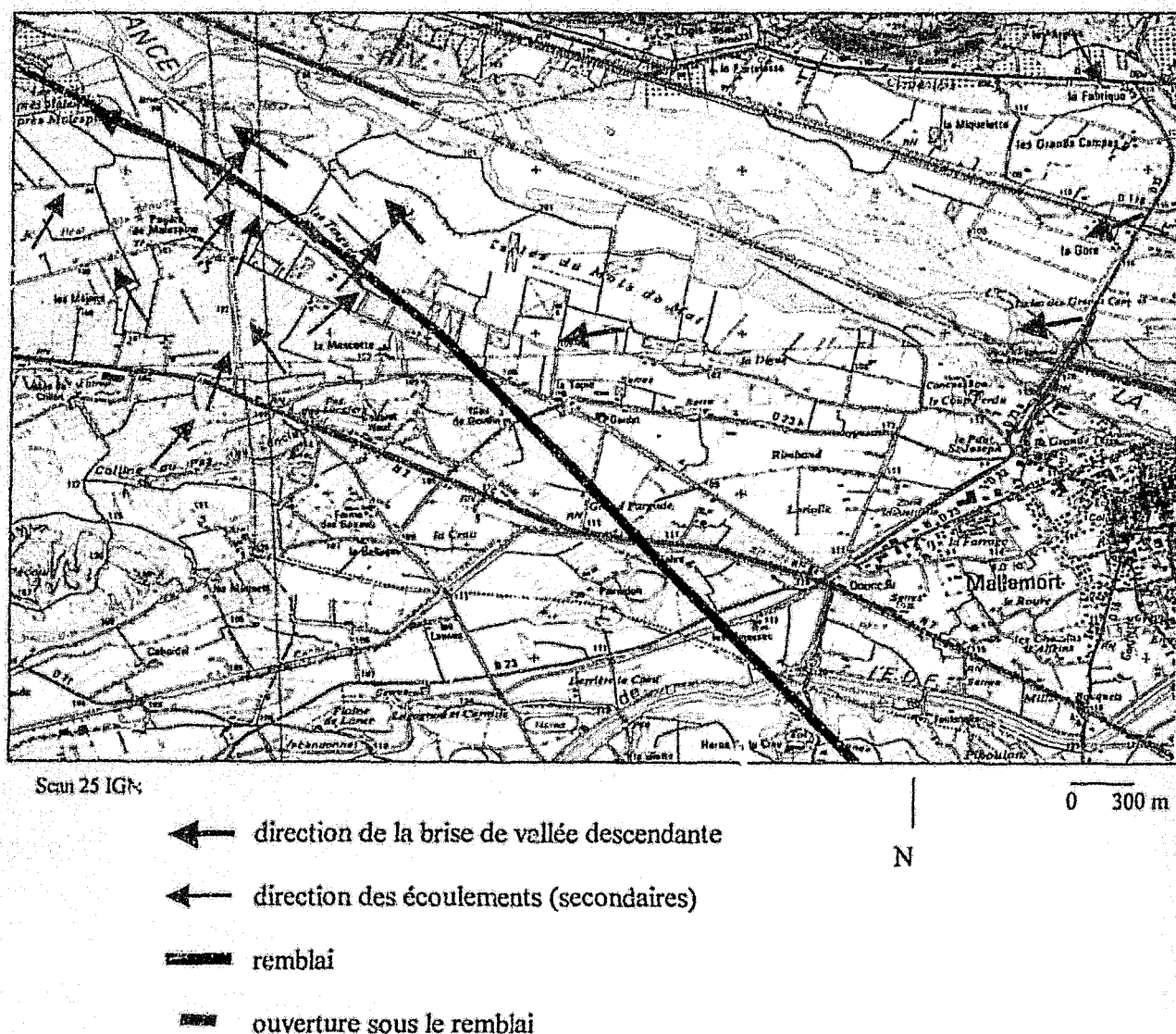


Fig 2.52 : Direction des écoulements nocturnes entre Mallemort et Senas lors d'une nuit de type radiatif : mesures itinérantes, (20-21/10/1998).

Des écoulements plus localisés suivent le sens de la pente dans les secteurs situés à proximité de reliefs plus accentués comme sur le versant du Petit Luberon ou des Alpilles, vers la commune d'Eyguières (fig 2.51). Il s'agit de brises de versants (écoulements secondaires) d'échelle topoclimatique. Les brises de versant ne peuvent se manifester que dans un environnement calme. La brise de vallée joue un rôle de brassage sur l'ensemble du fond de la vallée, même sur les écoulements assez puissants qui descendent du Luberon. Ces résultats montrent que si la brise de vallée est suffisamment puissante et rapide pour brasser les écoulements gravitaires produits par le Luberon, elle brasse également les écoulements secondaires provenant des micro-reliefs (collines de la Mascotte ou du Pas des Lanciers). Le brassage de l'air froid par la brise de vallée descendante est similaire au phénomène constaté par Schreiber (1965) à l'ouest du lac de Neuchâtel : le Joran, brise thermique dépendant des conditions orographiques locales, descend le long des flancs sud du Jura et empêchent la formation de couches stables d'air froid en entraînant une élévation de la température.

Les écoulements de versant sont présents dans les secteurs où l'influence de la brise principale n'est plus significative. Au sud-ouest de Mallemort, à Cazan, les écoulements catabatiques ne sont pas limités par d'autres vents locaux. Ces coulés d'air froid suivent les lignes de pente des collines bordant le talweg de Cazan et s'accumulent dans le fond de la vallée. L'air froid provenant des versants alimente une brise qui s'écoule dans le talweg en direction du nord-est, vers la vallée principale (fig 2.51).

Les mesures itinérantes de directions d'écoulements nocturnes par temps calme mettent en évidence un système de brises thermiques imbriquées à différentes échelles (Choisnel, 1986 ; Carrega, 1989 ; Fallot, 1992 ; Kastendeuch, 1996).

Les brises de versants contribuent donc *"à la formation de systèmes de brises plus puissantes dans les vallées"* (Kastendeuch, 1996). Ce système peut être apparenté à un arbre dont le tronc représente la brise principale alimentée par les écoulements d'échelles inférieures que symbolisent les branches. Certaines branches sont composées d'un seul élément et d'autre, de plusieurs rameaux. Ainsi, la brise de vallée descendante reçoit les écoulements d'air provenant des versants des massifs adjacents, mais également de brises de vallée d'échelles plus fines, elles-mêmes alimentées par des brises de versant. L'apport des écoulements transversaux ainsi que l'absence d'obstacle le long de la vallée de la Durance peut expliquer la vitesse importante de la brise de vallée. Selon P. Carrega (1994), la puissance de l'écoulement *« n'est pas seulement liée à la pente topographique, elle est aussi fonction du taux de remplissage en air froid du réservoir situé en contrebas »*. Dans le cas où le réservoir se remplit rapidement, l'air ne s'écoule plus et se refroidit en stagnant. L'action de brassage d'une brise de vallée au niveau de la couche limite se vérifie donc lorsque la morphologie de la vallée facilite l'écoulement de l'air, c'est-à-dire une vallée large avec peu de coudes, d'étranglements ou de resserrements favorisant le blocage de l'air. Dans le cas de la vallée de la Durance, où le réservoir est de dimension importante, l'écoulement est continu toute la nuit. Nous n'observons pas un ralentissement significatif de la brise en amont du resserrement entre les massifs des Alpilles et du Petit Luberon. Les températures minimales relativement élevées dans une vallée en situation radiative s'explique par la vitesse relativement élevée de la brise descendante nocturne (Carrega, 1994). D'ailleurs Fallot (1992)

et d'autres spécialistes des écoulements gravitaires alpins ont montré que la vitesse des brises augmente avec la longueur de la pente (Doran et Horst, 1981 et 1986). L'augmentation de la turbulence va limiter le refroidissement au niveau du sol.

**La vitesse de la brise de vallée est comparable à celle d'un vent synoptique -de l'ordre de 3-4m/s-, et l'air est, du fait de la présence de la Durance, relativement humide. Ces deux facteurs limitent les déperditions énergétiques en situation radiative et ont une action bénéfique sur la température. Contrairement à la brise de vallée descendante, les écoulements gravitaires, moins forts, ne semblent pas limiter le refroidissement radiatif. L'air présent en surface provient des déperditions énergétiques du substrat et de la végétation, sa vitesse relativement lente accentuant la baisse des températures.**

#### 2.1.1.2 Des températures nocturnes influencées par l'aérodynamique locale

La brise de vallée, par son intensité, a une action bénéfique sur les températures relevées à proximité de la rivière. Les températures nocturnes constatées dans les secteurs proches de la Durance sont plus clémentes par rapport aux autres postes situés dans la vallée. L'action de brassage de l'air dans les premiers mètres au-dessus du sol par la brise de vallée homogénéise les températures et amoindrit le refroidissement radiatif. Cet effet positif sur les températures diminue lorsque l'on s'éloigne du lit de la Durance, ceci probablement à cause du réseau de haies qui forme un obstacle semi-perméable. Mais, les directions relevées à l'intérieur des cultures indiquent la présence de cette brise sur la majeure partie du terrain expérimental situé au nord de la LGV, ce qui montre qu'elle agit à travers le réseau de haies comme agent turbulent, sans être complètement perturbée et bloquée par ces obstacles.

Par temps radiatif, la différence de température entre le point 1 (proche de la Durance) et le point 6 (dans le réseau de haies mais à une distance supérieure à 10 fois la hauteur de l'obstacle) est en moyenne de 1 à 4°C. La direction de la brise est similaire sur les deux postes, mais la vitesse est plus importante sur le point près du cours d'eau. Cette constatation est valable pour les points 2 et 3 (en contrebas des versants des Alpilles et du Petit Lubéron) où l'air froid provenant de ces versants est immédiatement brassé par la brise de vallée. L'action bénéfique de la brise sur les températures se produit la nuit du 30 au 31 octobre 1997. La température sur le point 1 ne descend pas en-dessous de 0°C alors qu'elle est inférieure à -5°C dans les secteurs peu influencés par la brise de vallée (fig 2.53 et annexe 8b).

Les deux postes placés en dehors de la vallée principale ont des écarts thermiques importants par rapport aux autres points de mesures. Cette variabilité thermique est également forte entre ces deux points de mesures. C'est sur le point n° 4, disposé en bas de versant, au niveau du fonds du talweg de Cazan, que l'on obtient les températures les plus froides. La différence de température moyenne peut atteindre 4 à 6°C. Ce secteur est particulièrement gélif à cause de sa topographie et de l'absence d'influence de la brise de vallée descendante (position d'abri). Les brises de versant, transversales au talweg, fournissent de l'air froid qui s'accumule et s'écoule lentement en direction de la vallée principale (fig 2.51). En fin de nuit, la masse d'air d'une hauteur de plusieurs mètres forme un lac d'air froid.

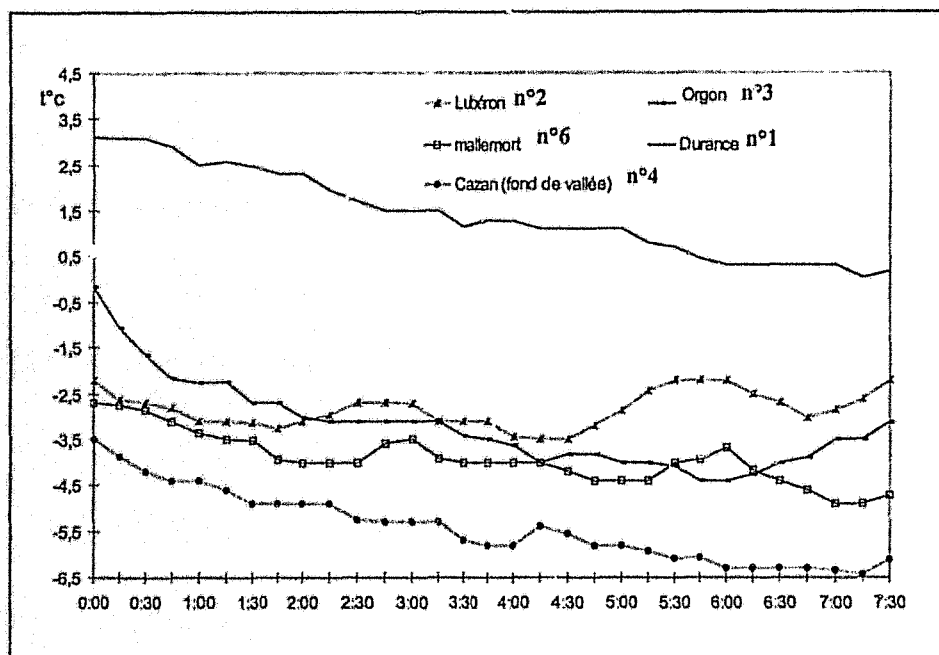


Fig 2.53 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle locale en situation radiative : moyenne toutes les 15 mn (30-31/10/1997), emplacement des 5 points sur la fig 2.51.

Les écarts de températures de part et d'autre de la colline sont encore plus conséquents et peuvent dépasser 5 à 7°C en fin de nuit. Le point de mesure n° 5 est le plus chaud, la température moyenne de la nuit est supérieure de 1°C par rapport au point situé à proximité de la Durance. Ce poste de mesures est disposé sur une terrasse exposée au sud. Le gain énergétique solaire dû à l'exposition de la pente favorise la hausse de la température (fig 2.54 et annexe 8c). M. Rotten (1964), dans sa thèse sur les "recherches microclimatiques sur la vallée du Rhône en Valais", expose l'action de l'exposition de la pente sur les températures nocturnes : *"Quant à l'orientation, elle offre aux coteaux exposés au sud, l'avantage d'un réchauffement solaire intense pendant la journée. Le sol emmagasine, de cette façon, d'appréciables quantités de chaleur qu'il libère durant la nuit. Grâce aux réserves faites pendant la journée, le déficit nocturne est moins accentué que dans les régions regardant vers le nord"*. Il s'agit, à un niveau moins important, des contrastes thermiques observés entre les versants dans le milieu montagnard (opposition entre l'adret et l'ubac). Toutefois, l'influence positive de l'exposition au rayonnement solaire n'est pas un facteur suffisant pour provoquer une variation de température aussi importante entre les deux versants. Il semblerait que ce secteur soit soumis à des masses d'air différentes de celles localisées dans le talweg de Cazan.

A l'échelle locale, la variabilité spatiale des températures n'est pas toujours engendrée par la topographie. Au cours de la nuit du 8 au 9 décembre 1997, les variations thermiques entre chaque poste de mesures sont similaires à celles exposées ci-dessus (écart moyen de +1°C entre la Durance et Mallemort ; de -1°C à -2°C entre la Durance et Lambesc ; de +2°C à +4°C entre la Durance et Cazan), mais le profil des courbes est différent entre la vallée principale et les points de Cazan et de Lambesc. De 03h00 à 03h30, la température augmente brusquement de 1°C à 2°C dans ces deux postes. L'origine de cette fluctuation est due à un passage nuageux. Ce phénomène, qui a duré quelques minutes, a homogénéisé

temporairement les températures des deux points (n°1 et 6), alors qu'aucune modification n'a été observée sur Cazan et Lambesc. Cet exemple démontre que sur une distance de quelques kilomètres, les conditions météorologiques peuvent évoluer et accentuer la variabilité spatiale des températures (fig 2.55).

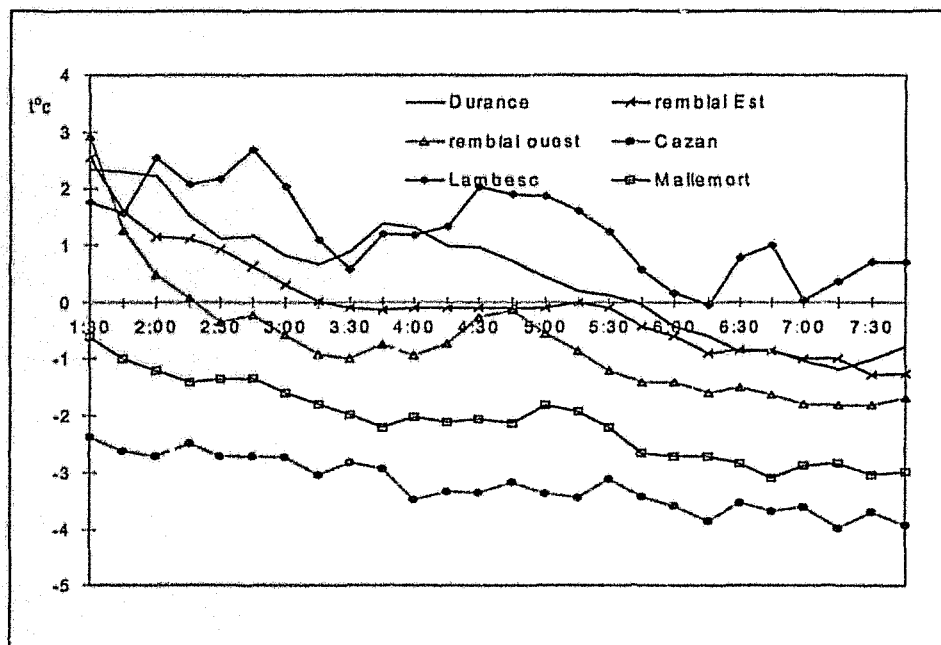


Fig 2.54 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle locale en situation radiative : moyenne toutes les 30 mn (14-15/11/1997).

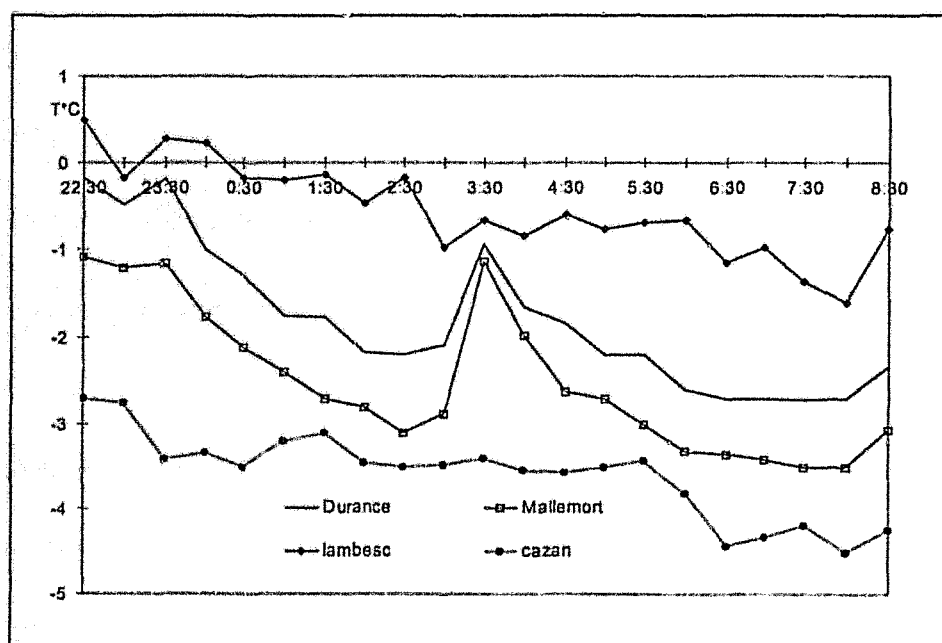


Fig 2.55 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle locale en situation radiative : moyenne toutes les 30 mn (14-15/11/1997).



En conclusion, le secteur est drainé par un système de brises thermiques imbriquées selon des niveaux d'échelles différents dont l'élément principal est une brise de vallée descendante qui s'écoule puissamment le long du lit de la Durance. Les écoulements, dits secondaires (brises de versants), se « déversent » dans la brise principale, ce qui limite leur action.

L'expérimentation réalisée à l'échelle topoclimatique, met en évidence l'influence bénéfique de la brise de vallée descendante sur les températures nocturnes en situation de refroidissement radiatif. Cet écoulement, de part sa nature (fort taux d'humidité relative) et sa vitesse supérieure à 3m/s, limite les pertes radiatives et homogénéise les températures dans les premiers mètres au dessus du sol sur l'ensemble du site expérimental. Toutefois, dès que l'influence de la brise diminue, le refroidissement s'intensifie. La présence d'obstacles, plus ou moins imperméables, ralentit la vitesse de l'écoulement au niveau du sol. Dans la vallée, la présence du réseau de haies brise-vent ne limite pas totalement l'influence de la brise mais les températures sont plus basses de quelques degrés (moyenne de 1 à 2°C) sur les postes de mesures disposés dans les vergers. Les secteurs où la brise de vallée n'est pas présente, accusent un écart thermique moyen proche de 5°C par rapport aux données relevées dans le lit de la Durance. Cette variation témoigne du rôle de « régulateur thermique » généré par cet écoulement d'échelle régionale.

#### 2.1.2 Par temps advectif et arrêt de mistral : refroidissement accru dans les secteurs abrités du vent

En situation advective et d'arrêt de mistral, l'action du relief sur les variables météorologiques ne génèrent pas autant de variations thermiques locales qu'en situation atmosphérique stable. Le brassage de l'air par le vent, limite les déperditions énergétiques du sol, empêchent la formation d'écoulements de pente et homogénéise les températures sur l'ensemble du site (fig 2.56 et annexe 8c). L'advection d'air froid accompagnée d'un vent violent de nord dégage le ciel de tout couvert nuageux. La situation est propice à un refroidissement radiatif au cas où les fortes turbulences engendrées par le mistral sont limitées. Dans ces conditions, les secteurs abrités sont exposés à un refroidissement plus important (Erpicum, 1980 ; Carrega, 1994). Les relevés de températures montrent un écart de 2 à 3°C en fin de nuit entre les parties dégagées et protégées de la vallée. Les températures les moins froides se trouvent sur le point de mesures proche de la Durance car aucun obstacle ne ralentit le vent. Aucune mesure n'a été réalisée sur le poste d'Orgon, mais on peut émettre l'hypothèse que le resserrement entre le Petit Lubéron et les Alpilles accentue la vitesse du vent (effet venturi) et amoindrit la baisse des températures.



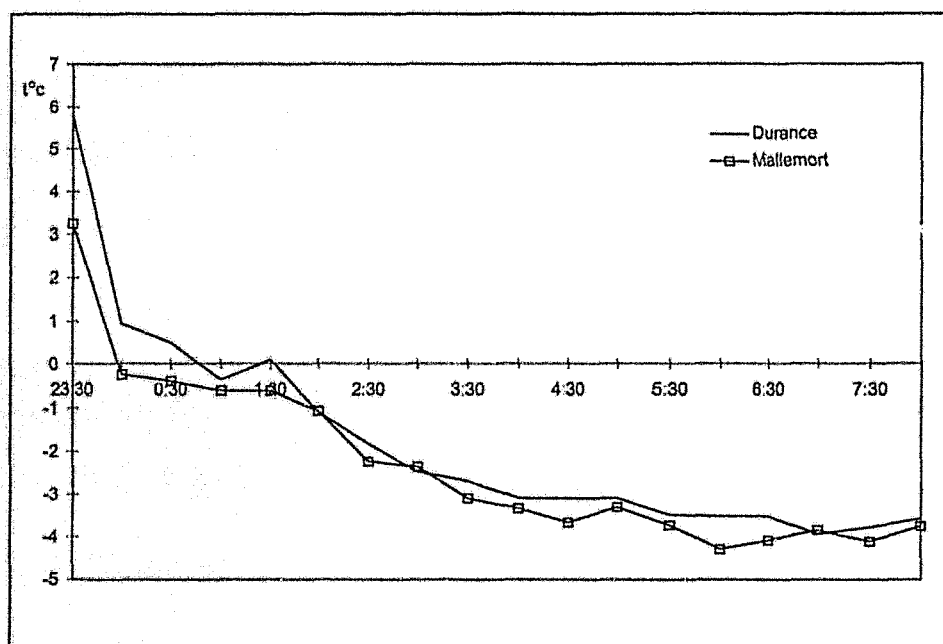


Fig 2.56 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle locale en situation advective : moyenne sur 30 mn entre 23h30 et 08h00 (05-06/12/1998).

Les mesures de températures et de direction d'écoulements nocturnes réalisées à l'échelle topoclimatique ont permis d'évaluer l'action du relief sur les variables météorologiques. En fonction de ces résultats, nous pouvons mettre en place un second protocole de mesures à une échelle plus fine afin d'évaluer l'influence du remblai ferroviaire sur les températures.

## 2.2 Echelle mésolocale ou du bassin versant

L'expérimentation réalisée dans le chapitre précédent a permis d'estimer les caractéristiques thermiques de la vallée pour chaque type de gel. L'objectif de l'analyse des variables météorologiques à l'échelle du bassin versant est d'observer l'influence du remblai ferroviaire sur les divers types d'écoulements (brises nocturnes, mistral) définis précédemment ainsi que sur la répartition des basses températures.

Nous savons qu'en situation atmosphérique anticyclonique, une brise thermique puissante draine l'ensemble de la vallée. Mais la présence de haies brise-vent, plus ou moins perméables suivant leur nature, ainsi que du remblai, peut limiter son action d'homogénéisation des températures dans les premiers mètres au-dessus du sol. Quel sera l'action de cet ouvrage imperméable de plusieurs mètres de haut sur les températures ? Par temps advectif, le mistral atténue, dans les espaces non abrités, le refroidissement d'origine radiative grâce aux turbulences générées par le vent. L'obstacle ferroviaire va-t-il accentuer le brassage de l'air ou va-t-il créer une zone d'abri favorable au refroidissement nocturne ?

Les postes expérimentaux sont disposés de façon à limiter l'influence des éléments microclimatiques. Contrairement à l'échelle précédente (topoclimatique), les capteurs ne peuvent pas être placés à une distance supérieure à dix fois celle des obstacles qui les entourent parce que la ligne ferroviaire traverse le réseau de haies brise-vent (OMM, 1991). Des mesures de températures montrent que les données obtenues au milieu d'une parcelle cloisonnée sont comparables à celles relevées sur une parcelle ouverte (fig 2.6). Les capteurs de mesures - *thermomètres à minima, capteurs électroniques de températures, d'humidité relative, anémomètre* - sont disposés, à 1m50 du sol et en milieu de parcelle, de part et d'autre du remblai. La hauteur du remblai ferroviaire et des murs antibruit varie entre 5 et 15 mètres sur l'ensemble du site expérimental (cf. fig I.3). Quatre ouvertures, nécessaires au passage des engins agricoles, sont présentes sous le remblai. Le positionnement des capteurs a été défini en fonction des diverses caractéristiques de l'ouvrage ferroviaire mais également dans le but de quadriller l'ensemble du site expérimental. seize points de mesures sont répartis de chaque côté du remblai (fig 2.58). Au nord de l'obstacle, 4 capteurs sont installés sur des parcelles à proximité du remblai et 3 sont plus éloignés. Une parcelle test se situe près d'une des ouvertures (n°6). Au sud du remblai, 4 points de mesures sont proches de l'obstacle. Un poste en secteur dégagé (n°16) est utilisé pour des mesures de vitesse et de direction de vent. Le point n°12, bien que disposé en milieu de parcelle, est sous l'influence d'un élément microclimatique : placé en amont d'une haie imperméable faisant barrage aux écoulements d'air froid, ce poste de mesures enregistre des valeurs particulièrement froides par nuits radiatives. Nous avons volontairement gardé ce point de mesures afin de montrer l'influence d'un facteur *microclimatique* sur les températures relevées à l'échelle *mésolocale*. Sur les points n°5, 9 et 11, des capteurs de températures sont disposés à des hauteurs de 1m50, 3, 6 et 8m afin d'obtenir un profil vertical de températures (fig 2.57). La figure 2.58 met en évidence les caractéristiques de l'environnement de chaque poste de mesures : par exemple, le poste 9 est situé au sud ouest de la LGV, dans un secteur en pente sur une parcelle proche du remblai et des murs antibruit de 15 m de haut.

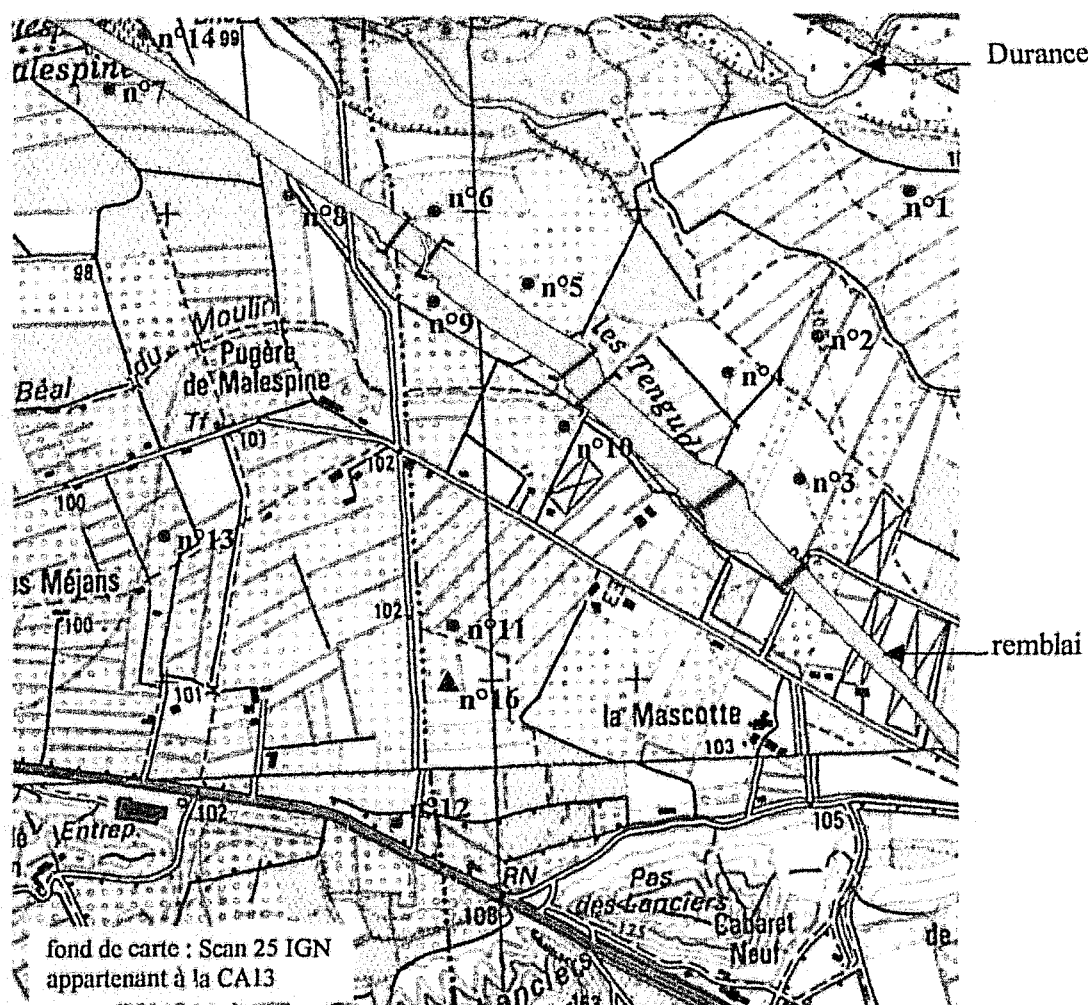


Fig 2.57 : Emplacement des 16 points de mesures à l'échelle méso-locale (de part et d'autre de la LGV).

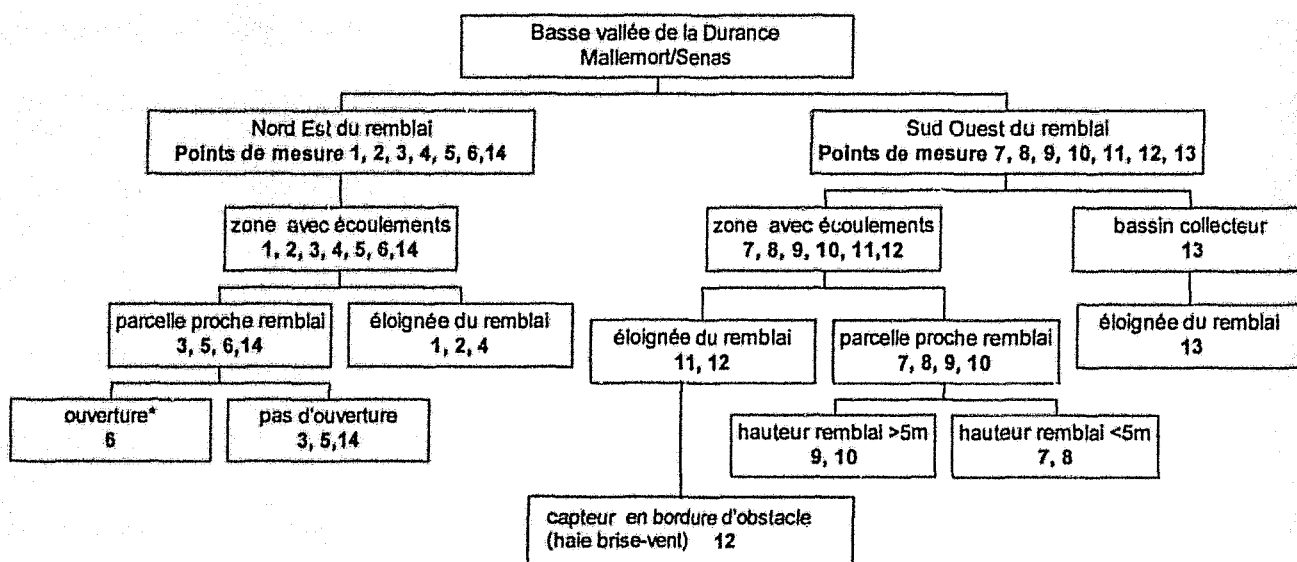


Fig 2.58 : Hiérarchisation des éléments du milieu pouvant perturber les paramètres météorologiques de chaque point de mesures à l'échelle méso-locale.

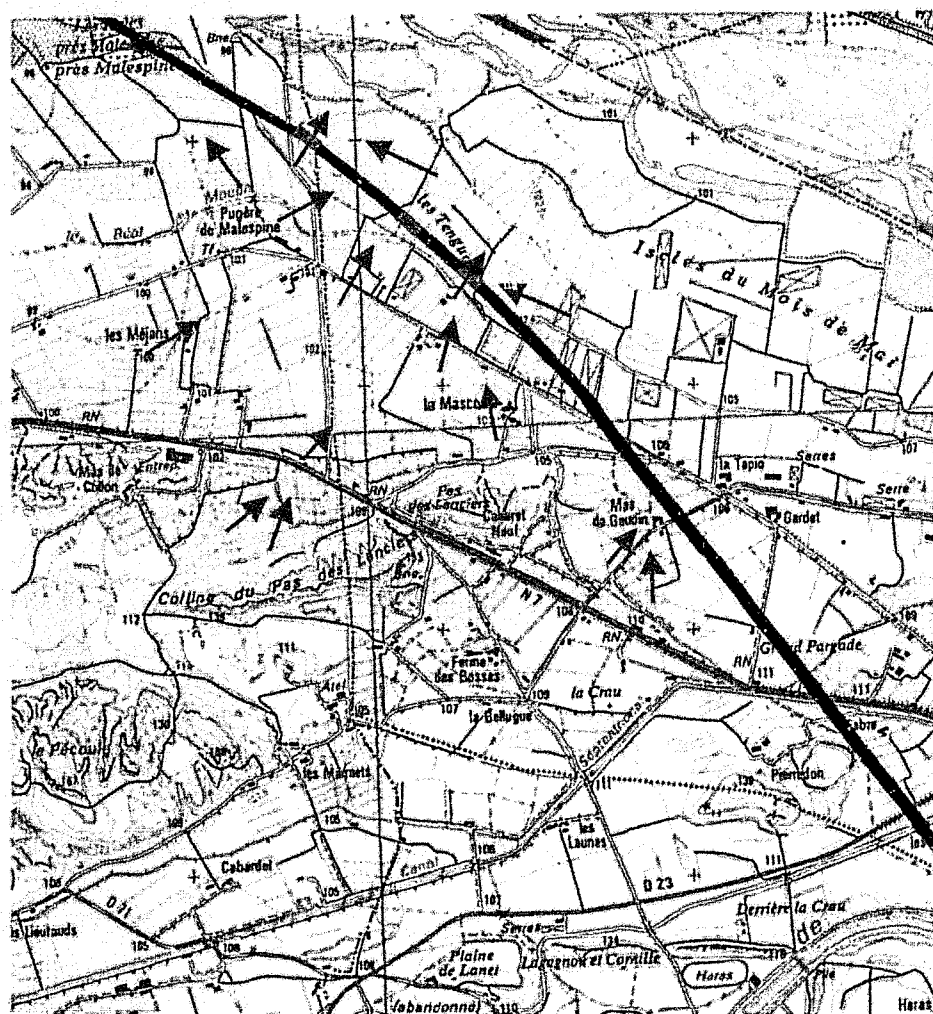
\* Ouvertures réalisées dans le remblai pour permettre aux engins agricoles de passer

### 2.2.1 Modification de l'aérologie nocturne en situation radiative : une atténuation de la brise de vallée descendante au profit des écoulements gravitaires

Les mesures de direction des écoulements nocturnes à proximité de la LGV confirment les premières observations obtenues à l'échelle locale : le remblai provoque des modifications de la circulation locale de l'air superficiel. Il dévie en particulier la brise thermique de vallée et favorise une zone de calme qui permet aux brises de pente (écoulements secondaires) venant des reliefs environnants (collines du Pas des Lanciers et de la Mascotte) de s'y établir. **L'ouvrage ferroviaire a donc pour effet de modifier l'aérologie nocturne du site en isolant un secteur topographiquement à risque - zone subhorizontale en aval d'un bassin versant - du vent ambiant qui le protégeait auparavant.** Nous savons que les écoulements gravitaires locaux, provenant des déperditions énergétiques radiatives, ont un caractère gélif important. S'écoulant lentement, le moindre ralentissement ou blocage de l'air présent au niveau du sol risque d'accentuer le refroidissement nocturne. Par conséquent, on peut définir deux secteurs distincts. **Le premier, au nord-est du remblai, est toujours sous l'influence du brassage de la brise de vallée descendante qui limite un refroidissement accru au niveau de la couche limite. Le second, au sud-ouest du remblai, où les écoulements de pente peuvent augmenter le refroidissement nocturne radiatif.** Cela peut occasionner une stratification supplémentaire de l'air froid, dangereuse près de la surface, pour le végétal dans les secteurs subhorizontaux ou en amont d'obstacles (remblai, haies imperméables). Le blocage de la brise de vallée par l'ouvrage ferroviaire n'est pas observé tout le long du tracé. Les mesures de direction des écoulements montrent que la brise de vallée est présente, à la hauteur des capteurs, au sud-ouest du remblai lorsque celui-ci n'excède pas 5 mètres, c'est à dire sur la partie nord-ouest du site expérimental. On remarque également qu'au niveau de l'ouvrage ferroviaire, les écoulements gravitaires empruntent naturellement les ouvertures. Les mesures réalisées à la sortie des ouvertures font apparaître la présence d'écoulements turbulents de faible vitesse (proche de 1 m/s) avec, par intermittence, des directions correspondant aux écoulements gravitaires et à la brise de vallée (fig 2.59 et 2.52 et annexe 8e).

En définitive, nous retiendrons qu'en situation radiative, l'effet le plus marquant de l'implantation de l'ouvrage ferroviaire, est de **détourner la circulation de la brise thermique à l'échelle de la vallée (plusieurs dizaines de kilomètres) pour favoriser la mise en place d'écoulements gravitaires d'échelle plus fine (quelques centaines de mètres) au pied de la colline du Pas des Lanciers au sud-ouest du remblai.** D'une part, l'obstacle artificiel dévie la brise de vallée qui limite les refroidissements locaux de l'air au niveau du sol. D'autre part, il permet aux écoulements gravitaires, brassés jusque là, de s'établir avec plus d'intensité et de générer dans les secteurs plats, une accentuation du refroidissement nocturne (fig 2.60).

L'étude des températures nocturnes va permettre d'observer si l'amoindrissement de l'influence de la brise de vallée principale au sud du remblai peut être comparable à la situation thermique observée dans le fond de Cazan, secteur où la brise de vallée descendante n'est pas présente. Il est probable que s'il y a un refroidissement supplémentaire au sud-ouest du remblai, il ne sera pas comparable à celui du talweg de Cazan parce que la topographie est différente (fig 2.53). Le « fond de Cazan » est un « bassin collectant l'air froid » provenant des versants transversaux.



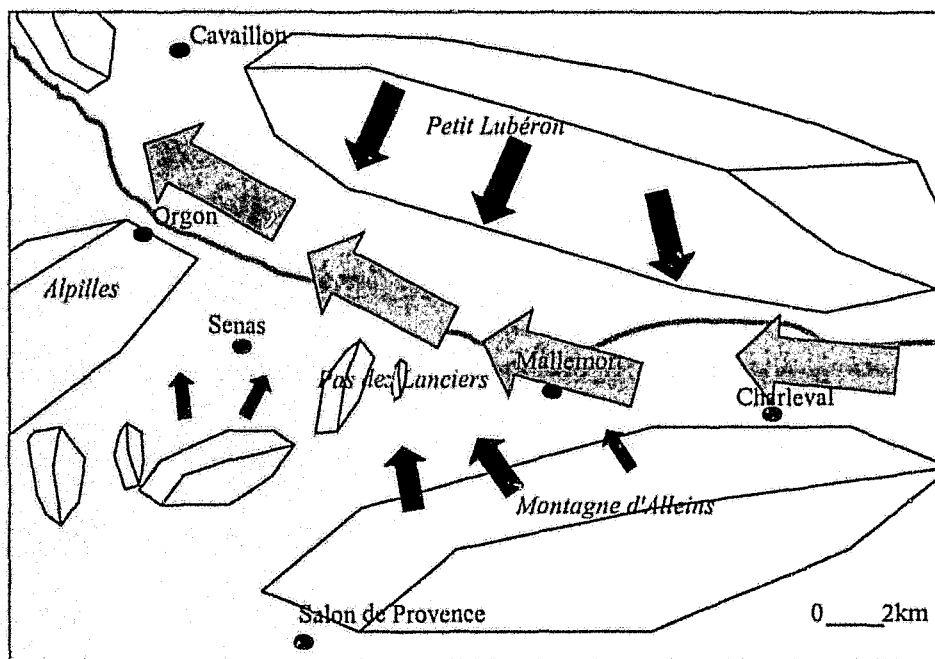
N  
|  
1 300 m

← direction des écoulements nocturnes

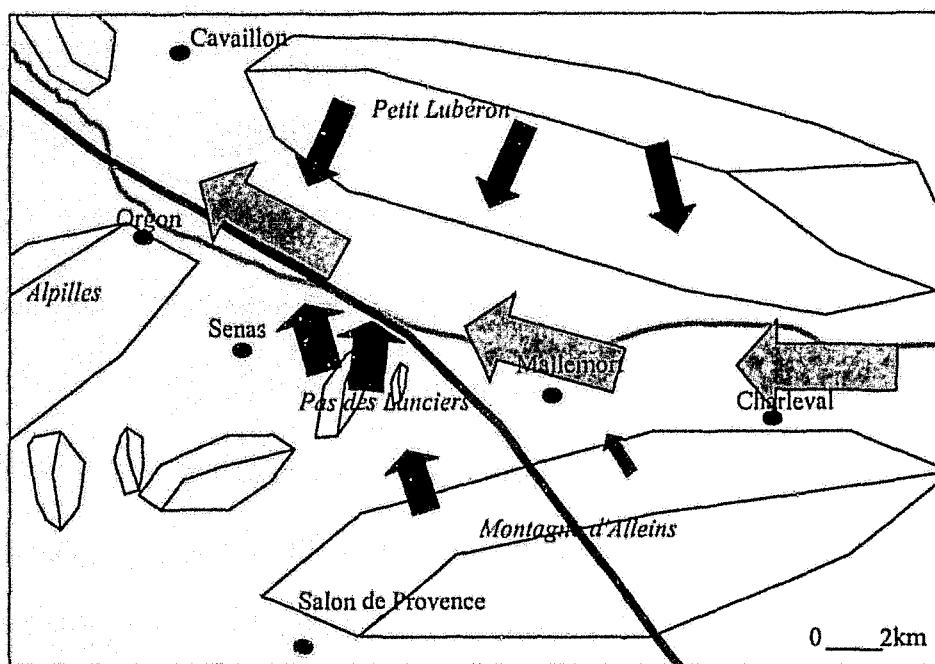
— remblai

— ouverture sous le remblai

Fig 2.59: Direction des écoulements nocturnes entre Mallemort et Senas lors d'une nuit de type radiatif : nuit clair et calme ; la journée du 14 septembre était ensoleillée en mistral fort avec l'arrêt vers 16h (14-15/09/1998).



a) Avant remblai S.N.C.F.



b) Après remblai S.N.C.F.

Fig 2.60 : Comportement aérologique avant et après l'implantation de la LGV Méditerranée dans le secteur de Mallemort/Senas en situation radiative.

### 2.2.2 Modification du champ de températures en situation radiative : un comportement thermique différent suivant les conditions atmosphériques de la journée

L'analyse des températures minimales des différentes nuits de mesures confirme l'effet de limitation de la brise de vallée ainsi que les conséquences de l'effet d'abri du remblai. D'une manière beaucoup plus nette que pour les haies brise-vent, l'obstacle ferroviaire bloque totalement la brise de vallée et provoque l'établissement des écoulements gravitaires et des arrivées d'air froid au sud du remblai. Cela se manifeste par **une différence moyenne de la température minimale de la nuit de 1 à 2°C d'un côté et de l'autre de la ligne ferroviaire** (sur un même substrat et même type d'emplacement du capteur par rapport au réseau de haies). La répartition des basses températures correspond aux secteurs plats (les Méjeans) où l'air froid, s'écoulant le long de la pente depuis la colline du Pas des Lanciers, vient stagner et s'accumuler. Au nord du remblai, la brise de vallée amoindrit le refroidissement radiatif dans les premiers mètres de l'atmosphère au dessus du sol.

A proximité du remblai, on sait que l'air froid véhiculé par l'intermédiaire des écoulements gravitaires s'écoule en direction de l'obstacle. Or, l'analyse des températures ne montre pas un blocage systématique de l'air froid en amont du remblai. Au contraire, dans certaines situations, les températures nocturnes aux abords du remblai sont nettement supérieures à celles obtenues sur l'ensemble du site expérimental. C'est le cas, par exemple, de la nuit du 14 au 15 novembre 1997 (fig 2.54) où la température moyenne mesurée par des capteurs situés de part et d'autre du remblai est nettement moins froide ( $T_{\text{moy}} = 0^{\circ}\text{C}$  au nord du remblai et  $T_{\text{moy}} = -0,7^{\circ}\text{C}$  au sud) que sur le poste de mesure de Mallemort ( $T_{\text{moy}} = -2,1^{\circ}\text{C}$ ). Ce phénomène se produit lorsque la journée précédant l'épisode radiatif est ensoleillée. Dans le cas contraire (ciel nuageux), les températures aux abords du remblai indiquent un blocage de l'air froid au sud-ouest de l'obstacle.

Des mesures de températures (minimales et instantanées) à différentes hauteurs (1m50, 3, 6 et 8 m) d'humidité relative et de vitesse du vent (à 1m50 de haut) ont permis d'étudier la structure atmosphérique horizontale et verticale de la partie inférieure de la couche limite.

#### 2.2.2.1 Situations radiatives avec ciel dégagé la veille : un refroidissement nocturne limité à proximité du remblai

Les résultats de ces mesures météorologiques font apparaître un zonage des basses températures dans les zones subhorizontales au niveau des Méjeans. L'air froid s'écoulant le long de la pente depuis la colline des Pas des Lanciers vient s'accumuler dans ce secteur. Nous observons une différence de température de 1 à 2°C de part et d'autre du remblai (sur un même substrat). Cette tendance est vérifiée pour l'ensemble des thermomètres à minima disposés sur les parcelles éloignées du remblai (points n°1, 2, 11, 12 et 13). Ces données confirment d'une part l'effet de limitation de la brise de vallée et d'autre part, les conséquences de l'effet d'abri du remblai (fig 2.61a et 2.62a). Cependant, sur les parcelles à proximité du remblai (points n°5, 6, 9 et 10), le refroidissement nocturne est limité (fig 2.61a et 2.62a). Nous constatons un gain thermique moyen supérieur à 1°C entre les points de



mesures proches de la LGV et ceux plus éloignés. Il semble que le remblai accumule, durant la journée ensoleillée, une quantité d'énergie relativement importante (fort rayonnement direct) et qu'il la restitue, limitant ainsi le refroidissement nocturne sur les parcelles limitrophes. Par exemple, les températures instantanées des nuits du 30 au 31 mars 1999 et du 17 au 18 mars 1998 font apparaître un écart de  $2,5^{\circ}\text{C}$  entre les points n°13 et n°9 (fig 2.61b, 2.62b, annexe 9a et b). Nous observons également cette différence de températures dans la première partie (entre 19h00 et 01h00) de la nuit du 02 au 03 décembre 1998 (fig 2.63 et annexe 9c).

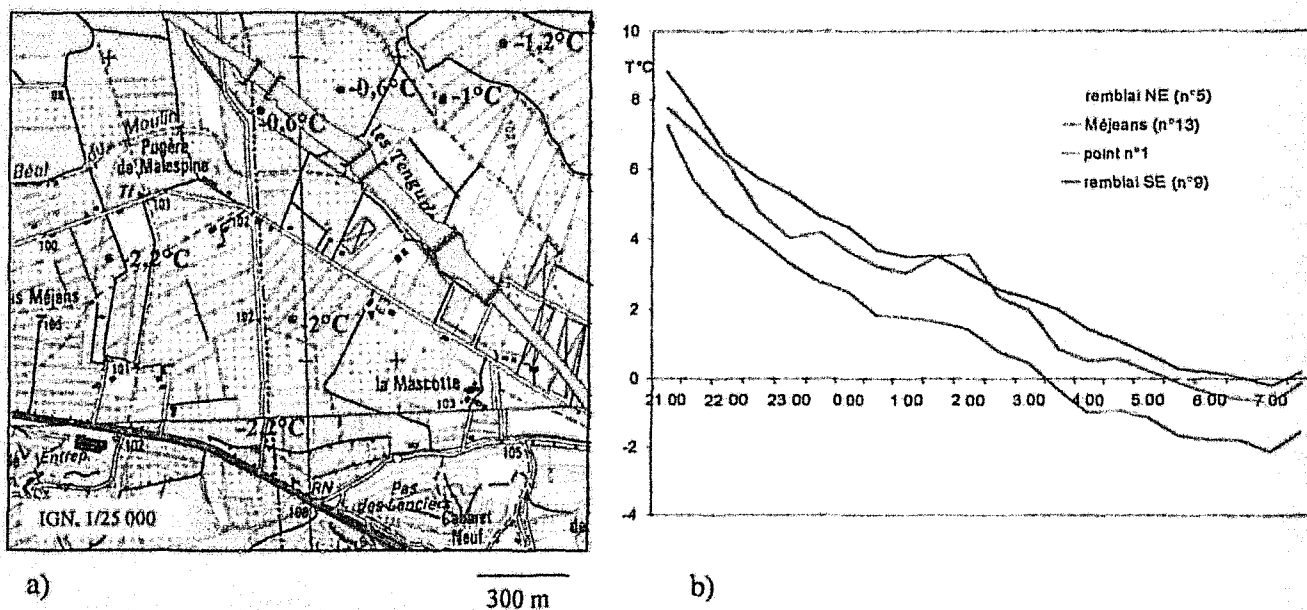


Fig 2.61 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle méso-locale (de part et d'autre de la LGV) en situation radiative avec temps ensoleillé la veille : températures minimales (a) et températures instantanées (b) 30-31/03/1999.

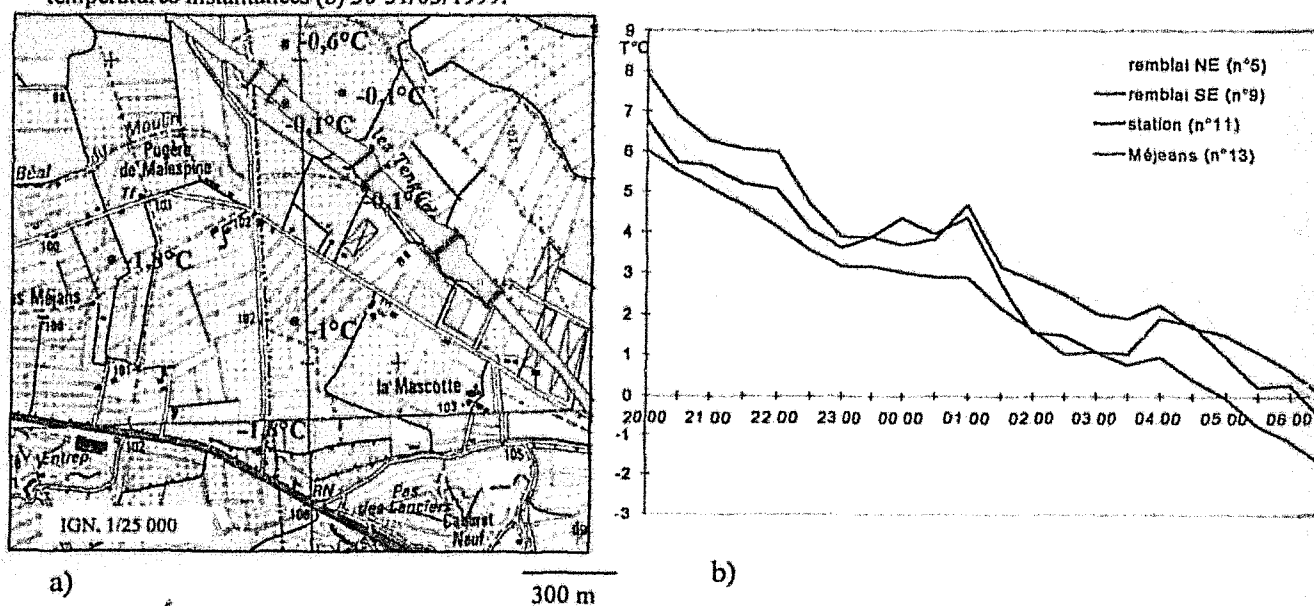


Fig 2.62 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle méso-locale (de part et d'autre de la LGV) en situation radiative avec temps ensoleillé la veille : températures minimales (a) et températures instantanées (b) 17-18/03/1999.



## Partie 2 : Variabilité météorologique aux échelles fines

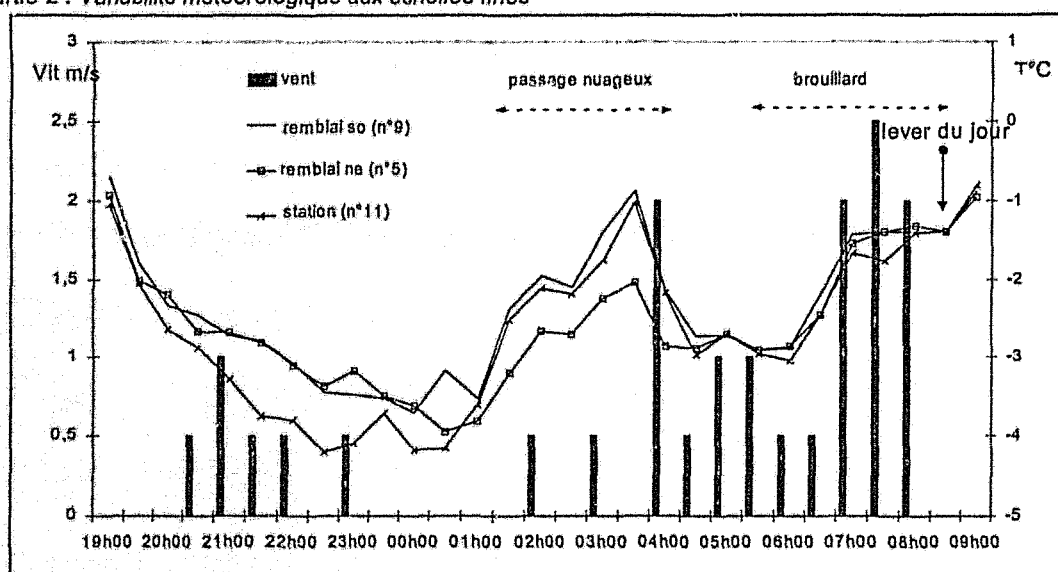


Fig 2.63 : Evolution de la température de part et d'autre de la LGV en fonction de la vitesse du vent et de l'état du ciel : moyennes réalisées toutes les 30 mn (02-03/12/1998).

L'analyse des profils thermiques verticaux met en évidence une stratification thermique moins marquée à proximité de la LGV par rapport à la parcelle témoin. Il semble que la chaleur restituée par le remblai amoindrit l'intensité de l'inversion thermique et limite l'accumulation d'air froid au niveau du sol (fig 2.64a et b).

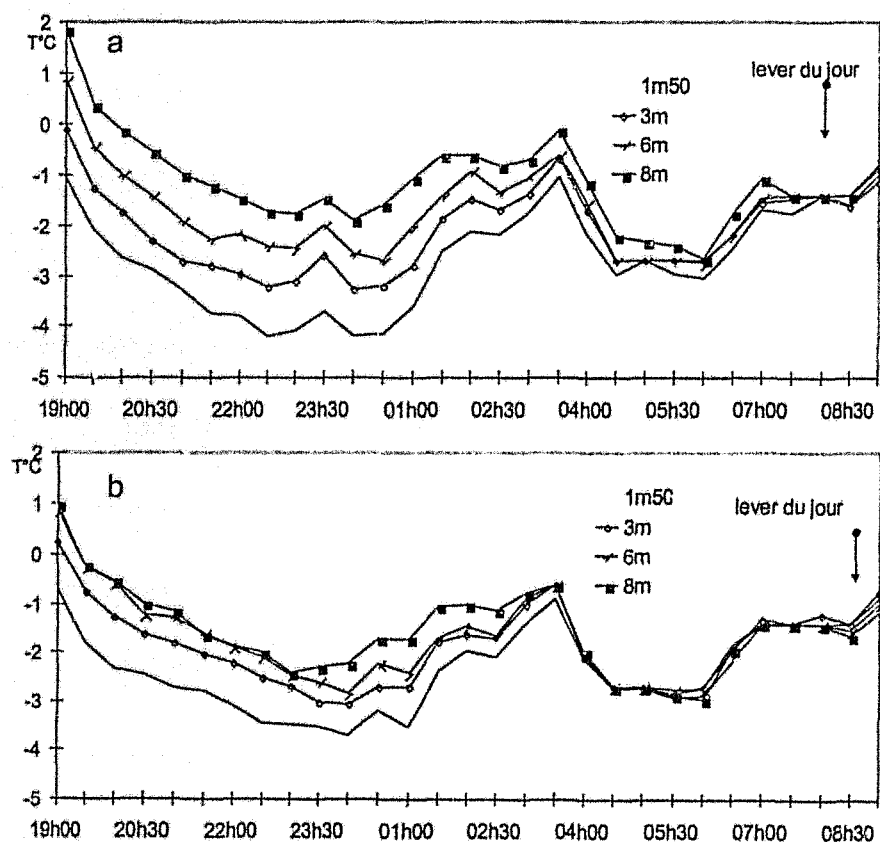


Fig 2.64 : Stratification thermique sur la parcelle témoin (a) et au sud de la LGV (b) au cours d'une nuit radiative avec temps ensoleillé la veille : moyennes toutes les 30 mn (02-03/12/1998).

L'étude comparative de la température dans le sol à une profondeur de 10cm d'une parcelle témoin et du versant du remblai exposé au sud-ouest renforce l'hypothèse d'une restitution de l'énergie solaire accumulée par l'ouvrage durant la journée. Au niveau du remblai, les températures sont, en moyenne, plus élevées de plusieurs degrés. Au cours de la nuit du 02 au 03 décembre 1998, l'écart thermique est en moyenne de 2,5°C (fig 2.65). Les variations de la température de l'air ne sont pas perceptibles dans le sol. La température du sol subit des fluctuations dues aux processus de transfert d'énergie (radiations, évaporation, conduction et convection), mais ces variations d'échelle journalière, très importantes au niveau de l'air de la couche limite, se retrouvent minorées dans le sol (Boulaine, 1975 ; Smith, 1979 ; William's 1982 ; Geiger, 1995). Toutefois, on remarque une diminution progressive de l'écart thermique entre les deux capteurs du début de la nuit jusqu'au lever du jour. De nombreuses mesures ont montré cette tendance. En dépit de cela, ces réserves énergétiques limitent le refroidissement nocturne à proximité de la ligne ferroviaire sur la totalité de la nuit.

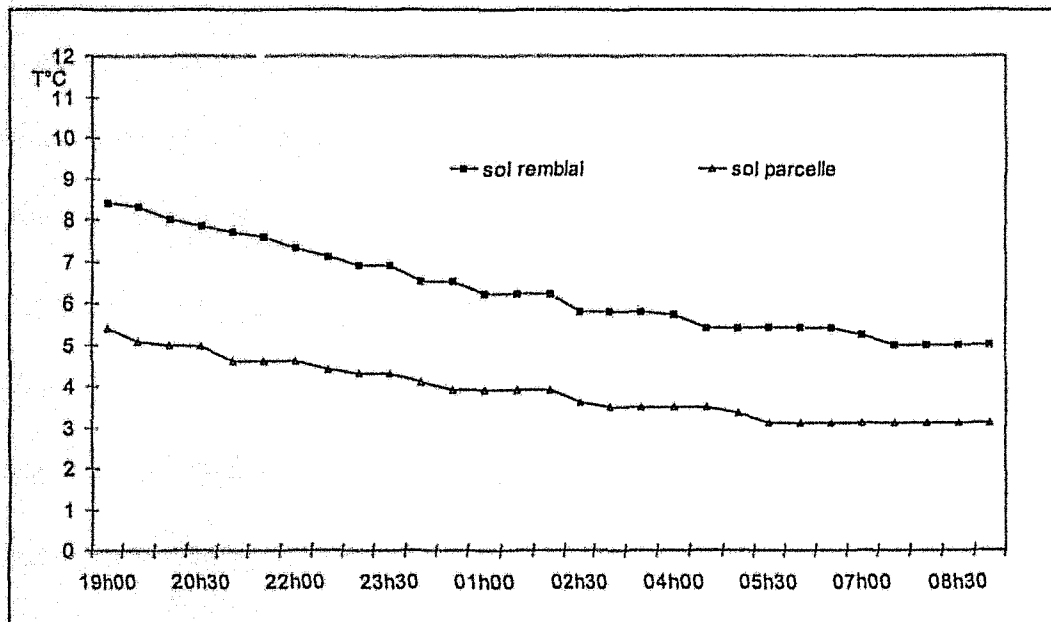


Fig 2.65 : Températures dans le sol (à 10 cm) sur le versant sud du remblai et sur une parcelle témoin : moyennes réalisées toutes les 30 mn (2-3/02/1999).

#### 2.2.2.2 Situations radiatives avec présence d'un couvert nuageux la veille : un refroidissement nocturne accentué par le remblai

Au cours des nuits radiatives avec présence d'un couvert nuageux la veille, le remblai n'a plus d'effet bénéfique sur la baisse des températures. Au contraire, l'air froid provenant du Pas des Lanciers vient s'accumuler contre l'obstacle ferroviaire, d'où la présence d'une inversion thermique de plusieurs degrés Celsius. Les températures enregistrées à proximité du remblai sont semblables à celles du secteur des Méjeans qui est souvent le plus froid (secteur subhorizontal où l'air froid stagne). Cependant, l'accumulation au sud du remblai est très localisée. En effet, les mesures effectuées vers les Iscles de Malespines, secteur où la hauteur

du remblai est inférieure à 5 m, les températures sont moins basses. De la même manière, les températures mesurées de l'autre côté du remblai sont nettement supérieures.

Le gel consécutif à la nuit radiative du 12 au 13 avril 1998 a occasionné de gros dégâts sur les cultures fruitières (pertes quantitatives et qualitatives). Les températures minimales les plus basses concernent le secteur au sud du remblai (de  $-2,5^{\circ}\text{C}$  à  $-3,5^{\circ}\text{C}$ ) alors que les températures relevées au nord sont proches de  $-1,5^{\circ}\text{C}$ . Aux abords du remblai, on remarque un refroidissement plus intense au sud qui se traduit par un blocage des écoulements d'air froid. Le remblai n'ayant pas accumulé d'énergie solaire, nous n'observons plus de températures clémentes au sud de l'ouvrage ferroviaire. Les données minimales dans le secteur abrité à proximité du remblai sont comparables à celles relevées dans le secteur plat « des Méjeans » où l'air froid stagne. Au nord du terrain expérimental, les températures minimales obtenues de part et d'autre de la LGV sont proches. Cela confirme les observations faites à partir des mesures des écoulements nocturnes où la faible hauteur de l'obstacle n'entrave pas l'action de la brise de vallée (fig 2.66 et annexe 9d). En effet, la hauteur du remblai varie entre Mallemort et Sénas : elle atteint 15 m de haut dans le secteur de la Pugère. C'est à ce niveau que son effet est le plus remarquable. Plus au nord, le remblai mesure environ 5m et on observe des conditions locales de températures et d'écoulements différentes. La brise de vallée n'est plus modifiée par l'ouvrage, elle joue à nouveau un rôle de régulation des températures en brassant l'air au niveau de la couche limite.

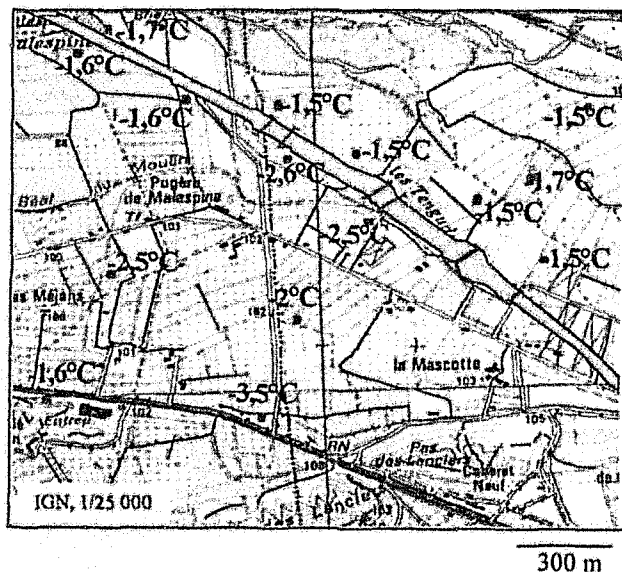


Fig 2.66 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle méso-locale (de part et d'autre de la LGV) en situation radiative avec temps nuageux la veille : températures minimales (12-13/04/1998).

L'analyse de la structure verticale de l'air froid confirme que le remblai a un réel effet de barrage sur les écoulements d'air froid nocturnes en favorisant une stratification plus importante (empilement des couches froides en fonction de leur intensité) à proximité de l'ouvrage (Marht, 1986, ...). L'utilisation des profils verticaux de températures fait apparaître une stratification différente entre les points les plus près et les plus éloignés au sud du remblai. La nuit du 20 au 21 mars 2000, l'épaisseur de la couche la plus froide atteint 3m à

une distance de 30 mètres du remblai alors qu'elle ne fait qu'un mètre cinquante sur la parcelle témoin (à 600m du remblai) (fig 2.67 et annexe 9e).

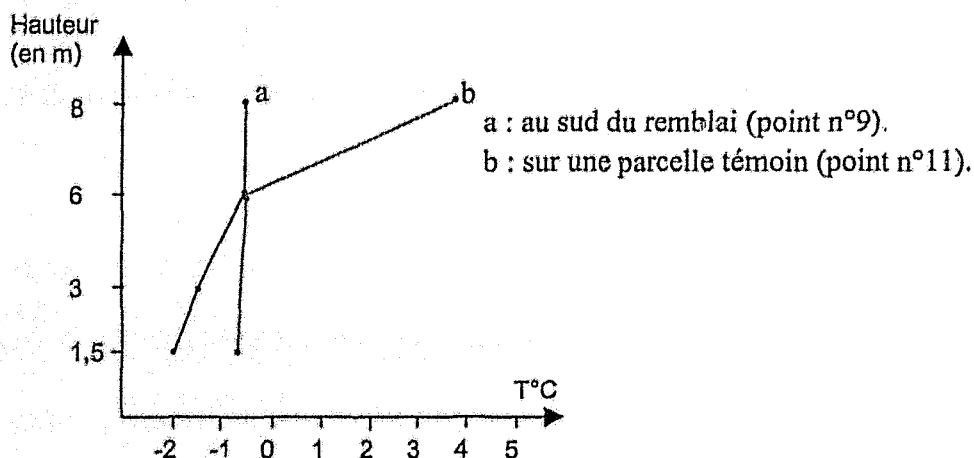


Fig 2.67 : Profils de températures au moment du minimum de la nuit du 20 au 21 mars 2000.

La stagnation et la stratification de l'air froid contre le remblai accentue l'inversion thermique. De nombreuses études (Brooks, 1958 ; Schultz, 1962 ; Tabard, 1967 ; Reese, 1969 ; Bates, 1971) ont démontré que, « si le phénomène de forte inversion thermique ne se produit que par nuits claires à fort rayonnement, il semble que le facteur déterminant soit de nature purement topographique, c'est-à-dire l'accumulation d'air froid dans les plus basses couches résultant des courants de densité nocturnes » (Seguin et al., 1975). Sur le terrain expérimental, la topographie est favorable à la stratification d'air froid, comme le prouve les mesures à 1,50, 3, 6 et 8m de haut, mais la présence de l'obstacle ferroviaire intensifie l'inversion thermique notamment dans les premiers mètres au-dessus du sol (0-3m). Par conséquent, nous observons deux systèmes d'inversion thermique imbriqués d'échelle différente : une inversion thermique due à la topographie (vallée) et une autre provoquée par le blocage de l'air par le remblai (fig 2.68 et annexe 9f).

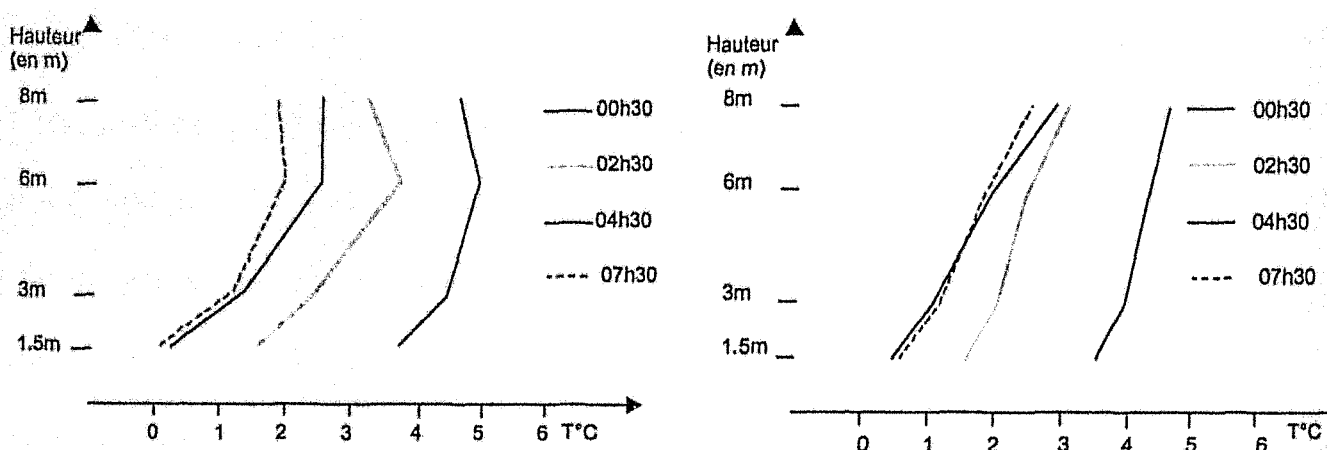


Fig 2.68 : Profils de températures à proximité du remblai (a) et sur une parcelle témoin (b) : (14-15/11/1998).

### 2.2.2.3 Le remblai : un accumulateur thermique ou un obstacle aux écoulements d'air froid ?

Quelle que soit la situation atmosphérique présente lors d'une nuit à fort refroidissement radiatif (nuit claire et calme avec journée ensoleillée ou nuageuse), le remblai a une action de blocage de l'air froid en faisant barrage aux écoulements gravitaires provenant des collines au sud de la ligne ferroviaire. Mais, lorsque la journée précédent un épisode gélif est ensoleillée, l'intensité du refroidissement est atténuée aux environs du remblai. Les mesures de températures de l'air à proximité de l'obstacle et les relevés dans le sol<sup>15</sup> mettent en évidence les réserves énergétiques emmagasinées la journée et libérées pendant la nuit. C'est pour expliquer ces résultats que nous examinons plus en détails l'influence de la nature du sol et de la roche sous-jacente, l'exposition ainsi que l'inclinaison du remblai.

#### a) Les matériaux du remblai

Sur le site expérimental, le sol et le sous-sol des parcelles et du remblai sont très différents du point de vue de leurs caractéristiques physiques (notamment leur texture et leur structure), de la charge en cailloux et de leur condition de drainage. Le sol des parcelles, dans lesquelles nous avons réalisé les mesures de températures est composé de limons sableux meubles et poreux d'une couleur brun foncé sans éléments grossiers sur une profondeur qui varie de 40 à 80 cm. En dessous de ce niveau, des éléments grossiers sont présents (cailloux, galets). La construction du remblai ferroviaire a nécessité l'utilisation de galets extraits du lit de la Durance. Les horizons se composent, sur les 5 premiers centimètres, d'un sol brun foncé sans éléments grossiers ayant une texture de limons sableux (comparable au premier horizon de la parcelle), puis sur le reste de l'ouvrage, de galets empilés les uns sur les autres (Duclos, 1994). La végétation recouvrant la surface est rase et très éparse (photo 4). Sur le remblai, la texture du « sous-sol » très grossière -*quelques centimètres en dessous de la surface*-, la couleur du sol ainsi que les conditions de drainage vont fortement agir sur les phénomènes d'absorption et de restitution des calories.



Photo 4 : Vue de la surface du merlon antibruit de la LGV : (mars 2000, cliché H. Quéno).

<sup>15</sup> Nous considérons comme sol « la partie superficielle des roches, pellicules faites de minéraux altérés de matières organiques » (Les Mots de la Géographie ; Brunet *et al.*, 1992). D'après, cette définition, appliquée par les géomorphologues, le sol représente les premiers centimètres au dessus de la roche.

La conjonction de la faible épaisseur d'un sol foncé et d'une importante épaisseur de galets de Durance génère un apport calorifique important. En effet, la couleur foncée du sol permet l'absorption d'une grande proportion de l'énergie calorifique (jusqu'à 80%), contrairement à un sol clair où plus de 50% du rayonnement peut être réfléchi vers l'atmosphère (Duchaufour, 1970 ; Bonneau, 1994 ; Carrega, 1994). Ce faible albédo du remblai contribue à augmenter l'absorption du rayonnement et donc les températures de la couche superficielle. Les propriétés thermiques des pierres de Durance favorisent une forte accumulation de la chaleur solaire mais également une importante restitution durant la nuit (fig 2.69). Selon P. Carrega, l'influence de l'albédo est limitée par rapport aux autres caractéristiques du sol. «La capacité à s'échauffer de la surface de ces milieux est d'autant plus forte que leur chaleur spécifique, leur conductance et leur teneur en eau sont faibles» (Endlicher, 1979 ; Carrega, 1994). Rappelons que les propriétés thermiques du sol sont la chaleur spécifique et la conductivité thermique qui interviennent conjointement sur la température du sol. La chaleur spécifique est la quantité de calories qu'il faut apporter à un corps pour augmenter de 1°C l'unité de masse (Gaucher, 1968). Le sol s'échauffera donc d'autant plus rapidement que sa chaleur spécifique sera plus faible, mais comme la chaleur spécifique n'est pas la même pour chacun de ces éléments constitutifs, la rapidité d'échauffement dépend également de sa texture. D'après les recherches sur les caractéristiques thermiques des roches (Oke, 1987 ; Gras, 1994), nous remarquons que les différences, par unité de poids, sont sensibles suivant la nature minéralogique (sable : environ  $1\text{J.cm}^{-3}$  ; limons sableux :  $2,80\text{J.cm}^{-3}$  ; argile :  $2,92\text{J.cm}^{-3}$ ) ; cela explique que les sols sableux s'échauffent très vite en été. La chaleur spécifique des galets (éléments non poreux : entre 2 et  $2,50\text{J.cm}^{-3}$ ) n'atteint pas celle du sable mais elle est plus faible que celle du limon sableux (Gaucher, 1968). La conductibilité et la diffusivité détermine la capacité du sol à transmettre les calories dans les horizons profonds. «Par exemple, la conductivité du sol à l'égard de la chaleur augmente avec sa teneur en eau. Les radiations calorifiques se propagent donc plus rapidement en profondeur dans un sol humide que dans un sol sec» (Duchaufour, 1970). Selon Missenard (1965) et Raznevic (1970)<sup>16</sup> la conductibilité de l'eau (à 20°C), de l'air, des sol sableux et de la terre sont respectivement de 0,6, 0,025, 0,25 à  $1\text{W/m}^\circ\text{K}$  et 0,25 à  $0,75\text{W/m}^\circ\text{K}$ .

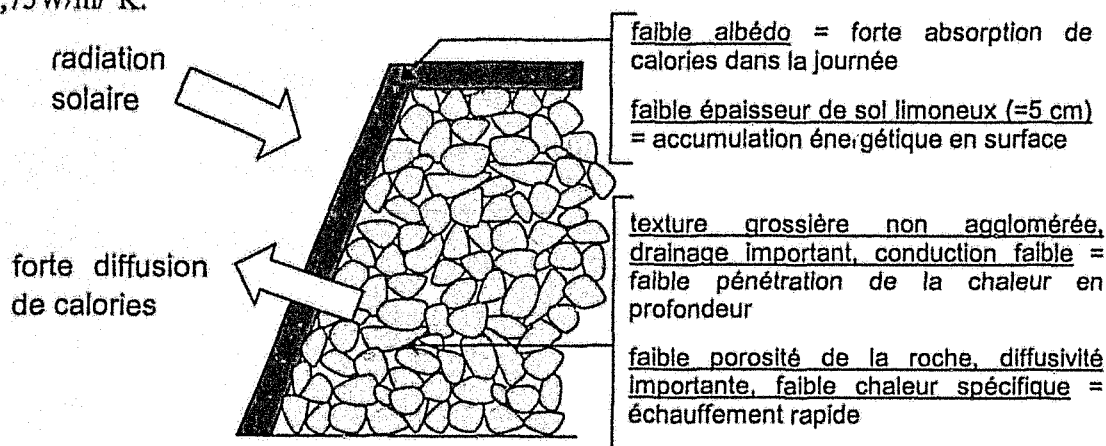


Fig 2.69 : Propriétés thermiques du remblai favorables à l'accumulation d'énergie solaire et à la restitution en phase nocturne (dessiné à partir des documents RFF).

<sup>16</sup> références obtenues dans la thèse d'état de P. CARREGA « topoclimat et habitat » (1994).

Dans le cas des galets (roches non poreuses), la conductivité est importante si on la compare à celle de la terre fine, mais la structure du sol, très aérée, crée une mauvaise diffusion de l'énergie en profondeur. La chaleur spécifique moyenne ainsi que la faible conductivité du remblai permettent à l'énergie de rester dans les premiers mètres du sol et de ne pas pénétrer en profondeur. « *Un sol à faible profondeur constitue un milieu sensiblement plus chaud* » (Demolon, 1951). Par contre, le comportement thermique du sol des parcelles témoins est très différent. La chaleur spécifique plus forte ainsi que la porosité plus importante impliquent un réchauffement du sol beaucoup moins rapide que le remblai.

Les variations de températures entre le sol de la parcelle et celui du remblai observées au cours d'une nuit radiative après une journée ensoleillée sont confirmées par l'analyse de la composition des sols. La présence de pierres, à proximité de la surface du remblai, accentue le réchauffement du sol par le rayonnement solaire et il en résulte une température plus élevée qu'en l'absence de galet. La nuit, le flux de chaleur vers l'atmosphère est accru. « *Lorsqu'il existe entre deux corps ou deux parties d'un même corps une différence de température, celle-ci a tendance à s'égaliser par échange de chaleur, la chaleur passant du corps le plus chaud au corps le plus froid* » (Gras, 1988). Le remblai a dans ce cas un « *effet bouillotte* » comparable à l'action des murets utilisés dans l'Altiplano péruvien pour protéger les cultures du gel. Les études réalisées dans cette région montrent que les parcelles entourées de murs de pierres subissent un refroidissement moins intense que les parcelles ouvertes. Les explications avancées pour ce gain énergétique font référence à un emmagasinage diurne de chaleur par les pierres des murets (Morlon, 1989).

Les mesures dans le sol et à 1m50 du sol confirment que la température est plus élevée sur le remblai que sur la parcelle test. Néanmoins, pour la température du sol, l'apport énergétique est maximum en début de nuit puis il s'amenuise au cours de la nuit. Mais, la très grande réserve énergétique fait que la température du sol du remblai reste toujours supérieure à celle de la parcelle. Hormis l'importance des propriétés thermiques que nous venons d'évoquer, l'orientation et l'inclinaison des faces du remblai sont des facteurs très importants pour l'apport énergétique diurne. La forte variation thermique du sol entre les deux versants du remblai démontre la forte influence de ces deux éléments.

### c) Inclinaison et exposition

En milieu montagnard, les phénomènes énergétiques et dynamiques qui influencent sur les caractéristiques du topoclimat sont, entre autres, l'interception du rayonnement solaire par les pentes et les modifications du bilan énergétique de surface (Choisnel, 1986). L'influence de l'exposition au rayonnement solaire engendre des nuances thermiques considérables entre des versants d'orientations différentes. Par exemple, l'adret (*versant exposé au sud*) est relativement chaud et ensoleillé alors que l'ubac (*exposé de nord-ouest à nord-est*) est frais et plus souvent à l'ombre (Choisnel, 1986 ; Geiger, 1995 ; Cellier, 1996 ; Hufty, 1997). A l'échelle du remblai ferroviaire, l'influence de l'inclinaison et de l'exposition des pentes est également très importante du point de vue de l'acquisition du rayonnement solaire. Dans le secteur expérimental, le remblai et les murs antibruit ont une pente d'environ 60°. Les deux versants de l'ouvrage sont orientés sud-ouest et nord-est.

Le flux d'insolation varie fortement suivant l'inclinaison et l'orientation des surfaces. Toutes conditions égales, la quantité de radiation par unité de surface du sol varie proportionnellement à l'inclinaison des rayons solaires sur la surface. Le rayonnement solaire direct intercepté par une pente par unité de surface dépend de l'angle d'incidence  $\alpha$  des rayons provenant du disque solaire ( $I \text{ pente} = I \sin \alpha$ ). Les meilleures conditions d'interception du rayonnement solaire correspondent à un angle de  $90^\circ$ . Sur la figure 2.70 représentant l'exposition des faces du remblai au rayonnement solaire, la quantité de chaleur reçue est proportionnelle à la largeur du flux solaire qui est donné par a, b, c et d. Pour les secteurs 1, 2 et 3, cette quantité est d'autant plus faible que l'angle  $\alpha$  est plus aigu. Elle est presque nulle pour les secteurs 4 et 5 car ils sont à l'ombre. Le secteur 2 est celui qui reçoit le plus de rayonnement solaire parce qu'il l'intercepte pratiquement perpendiculairement. Les différences d'interception du rayonnement solaire par les pentes suivant l'inclinaison ont des conséquences sur le bilan radiatif de surface. Celles-ci sont accentuées suivant l'orientation de la pente. Le rayonnement net est plus important sur un versant sud que sur un versant nord. Cela se traduit, pour le versant sud, par une plus grande quantité d'énergie acquise durant la journée. Des différences existent également entre des pentes orientées à l'ouest et à l'est. Geiger (1969) et Choissnel (1986) expliquent qu'avec même une distribution similaire du rayonnement solaire entre les deux versants, « la différence provient au cours du cycle diurne d'une plus forte utilisation de l'énergie radiative solaire reçue par le versant est le matin pour évaporer l'humidité présente à la surface du sol, soit du fait du dépôt de rosée, soit du fait de la réhumidification du sol en surface par capillarité. Par contre l'énergie solaire reçue par le versant ouest (dont le maximum est décalé vers l'après-midi) est absorbée par une surface plus sèche en surface et le flux de chaleur sensible est plus important d'où un meilleur réchauffement de l'air et du sol ».

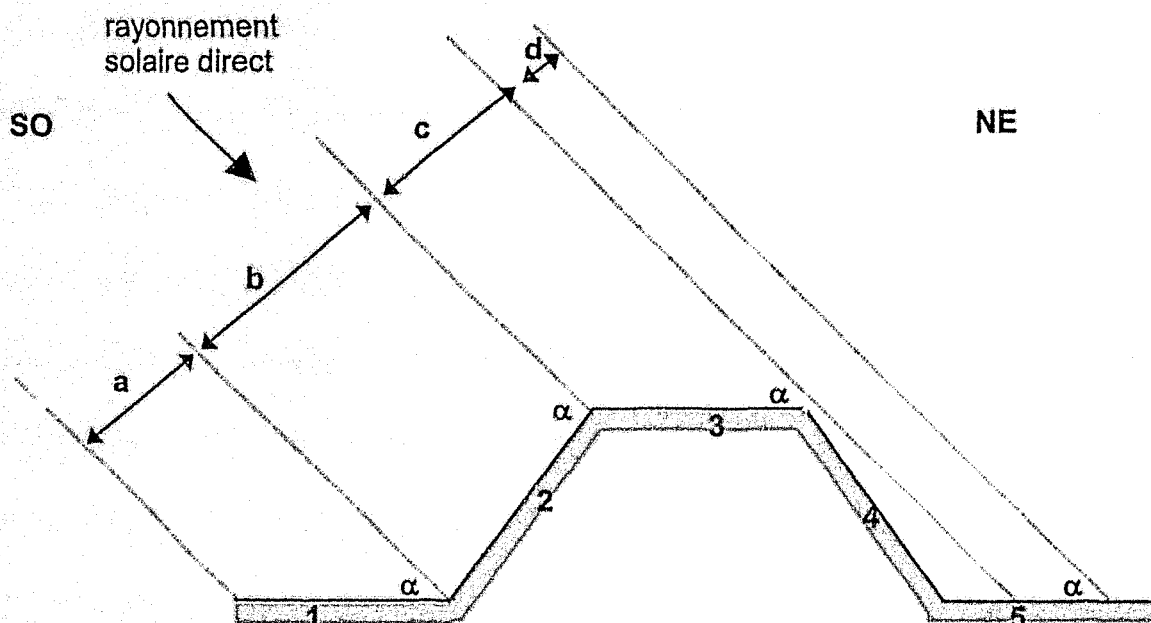


Fig 2.70 : Influence de l'inclinaison et de l'exposition des surfaces du remblai sur le rayonnement reçu par le sol.



L'inclinaison et l'orientation des pentes du remblai mettent en évidence un apport énergétique plus grand sur la face sud-ouest que sur la face nord-est. Cette variation du rayonnement diffère en fonction de la période de l'année et de la journée. Au printemps, les orientations vers le sud sont les plus privilégiées. Ainsi, à l'équinoxe de printemps, pour une inclinaison de pente de  $30^\circ$  et à la latitude de  $45^\circ\text{N}$ , le rayonnement solaire direct intercepté par la pente par ciel clair varie de  $2070\text{J}/\text{cm}^2\cdot\text{jour}$  pour une orientation sud, à  $1370\text{J}/\text{cm}^2\cdot\text{jour}$  pour une orientation est ou ouest et seulement  $550\text{J}/\text{cm}^2\cdot\text{jour}$  pour une orientation nord (Monteith, 1973) (fig 2.71a). En été, les différences entre les orientations sont atténuées. A l'échelle de la journée, nous avons évoqué les différences est/ouest dues à un décalage du maximum du rayonnement solaire (fig 2.71b). Entre les versants nord/sud, ce sont les effets d'ombre portée qui peuvent engendrer des variations. Mais, que cela soit à l'échelle de la journée ou de quelques mois, les versants exposés au sud ou sud-ouest acquièrent un rayonnement solaire nettement supérieur au versant nord ou nord-est.

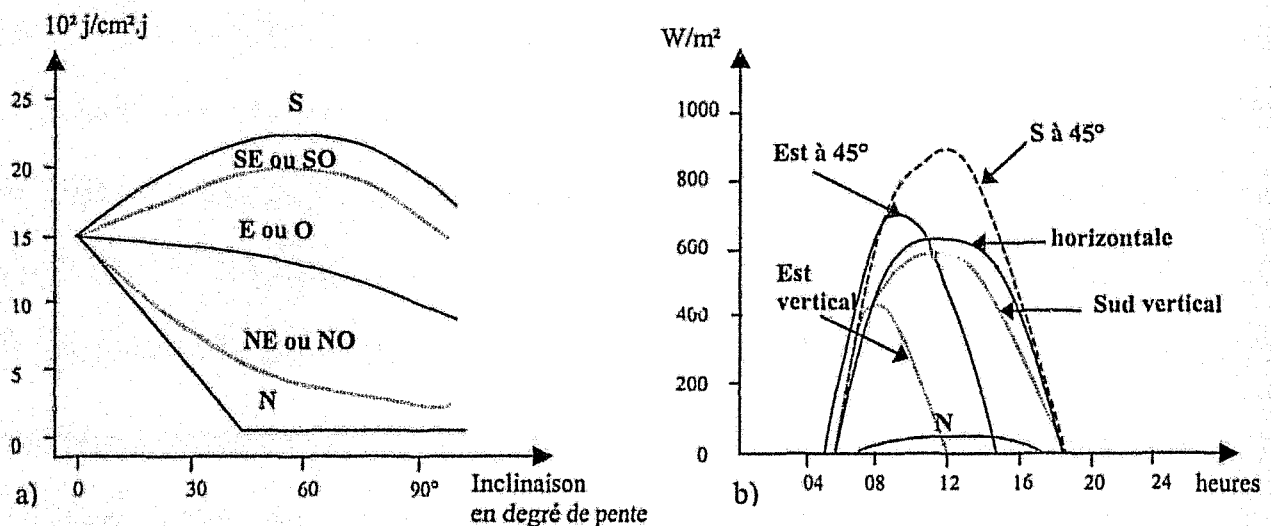


Fig 2.71 : Irradiation solaire reçue par des pentes d'orientations différentes en fonction de leur inclinaison aux dates des équinoxes.

a) Irradiation totale journalière (d'après Monteith, 1973).

b) Cycle diurne du rayonnement solaire (d'après Gates, 1965).

Les mesures dans le sol (à 10cm de profondeur) sur les faces du remblai, montrent des températures plus élevées au sud-ouest. Au début de la nuit radiative après une journée ensoleillée du 30 au 31 mars 1999, la température dans le sol est supérieure de  $9^\circ\text{C}$  sur le versant sud-ouest par rapport au nord-est. Cet écart diminue durant la nuit et atteint environ  $3^\circ\text{C}$  en fin de nuit. La température de l'air qui a été évoquée dans une partie précédente est plus chaude aux abords du remblai que dans les parcelles situées au sud de la ligne ferroviaire. La différence de température du sol de part et d'autre du remblai ne se retrouve pas au niveau de la température de l'air. Or, il ne faut pas oublier qu'au nord du remblai, la brise de vallée limite préalablement le refroidissement radiatif de 1 à  $2^\circ\text{C}$  (fig 2.72). La forte variation du flux d'insolation entre les deux faces du remblai permet donc à la partie sud-ouest d'acquérir une quantité de calories beaucoup plus importante qu'au nord-est. Même si cette énergie est

fortement diffuse en début de nuit, les grandes réserves emmagasinées durant la journée font que le refroidissement nocturne de l'air est atténué jusqu'au lever du jour aux abords du versant sud-ouest du remblai.

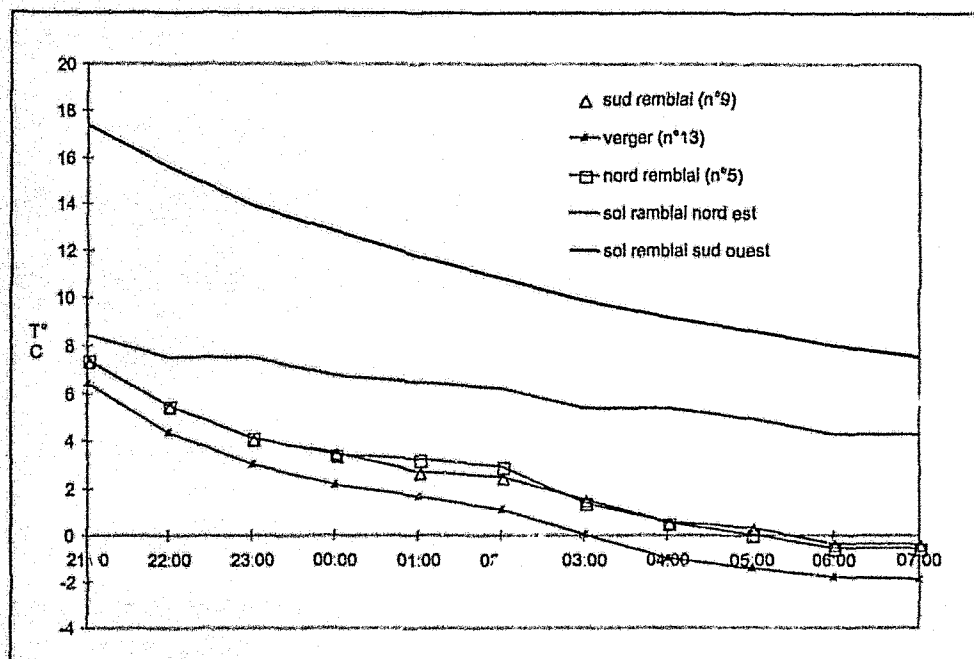


Fig 2.72 : Températures du substrat des « versants » du remblai et températures de l'air en situation radiative : sol nu et tassé, à 5 cm de profondeur, moyenne horaire à partir d'un pas de temps de 2 mn (30-31/03/1999).

Les propriétés thermiques, l'inclinaison et l'exposition des pentes du remblai permettent au sol du remblai d'absorber, grâce au réchauffement solaire intense, une grande quantité de chaleur qu'il libère durant la nuit sous forme de rayonnement infrarouge. Grâce aux réserves faites pendant la journée, notamment sur la face sud-ouest du remblai, le déficit nocturne est moins accentué aux abords de la ligne ferroviaire que sur les parcelles plus éloignées. Cette analyse, généralement exposée pour les effets de coteaux exposés au sud à l'échelle topoclimatique, semble se confirmer à l'échelle du remblai. **L'action bénéfique du remblai ne concerne que les parcelles juxtaposant la ligne ferroviaire, c'est-à-dire jusqu'à une distance d'environ 70-90 mètres (évaluation sur 36 campagnes de mesures).**

Dans les situations de nuit radiative après une journée nuageuse, le remblai n'a plus d'action bénéfique sur le refroidissement radiatif. Les mesures de température dans le sol sont plus froides dans le remblai que dans les parcelles car la réserve énergétique est pratiquement nulle. La diffusivité du sol est très importante. Le sol se refroidit donc très rapidement, ce qui favorise les déperditions énergétiques et le blocage de l'air froid issu des écoulements gravitaires provenant des collines du Pas des Lanciers. **La forte diffusivité du sol du remblai est par conséquent un atout en cas d'importantes réserves énergétiques durant la journée (rayonnement solaire), mais elle devient très rapidement un facteur négatif si l'apport solaire est médiocre.**

En définitive, nous retiendrons qu'en situation radiative, l'ouvrage ferroviaire modifie la circulation de la brise de vallée descendante et crée une zone d'abri favorisant la mise en place d'écoulements gravitaires (d'échelle plus fine) au sud-ouest du remblai (au pied de la colline du Pas des Lanciers). En accentuant indirectement les écoulements gravitaires, le remblai augmente le risque de stagnation d'air froid dans ce secteur. Cela se manifeste par une différence moyenne de la température minimale de 1 à 2°C de chaque côté de la ligne ferroviaire.

A proximité du remblai de la LGV, l'évolution des températures nocturnes semble être influencée par le rayonnement solaire :

- ♦ durant une journée ensoleillée, le remblai accumule, une quantité d'énergie solaire relativement importante (fort rayonnement direct). Grâce à ces réserves, le refroidissement nocturne est atténué à proximité de la ligne ferroviaire ;

- ♦ après une journée nuageuse, la quantité d'énergie solaire acquise par le remblai est faible. L'ouvrage n'a plus d'effet régulateur de la température. Bien au contraire, l'air provenant du Pas des Lanciers vient s'accumuler et stagner contre l'obstacle.

### 2.2.3 Modification du champ de températures en situation advective et d'arrêt de mistral : combinaison des facteurs convectifs et radiatifs

En situation advective, le facteur « convection » réduit les disparités thermiques locales induites par les déperditions énergétiques radiatives. Celles-ci sont moins importantes que lors d'un refroidissement radiatif. Le vent limite les fortes variations de températures sur l'ensemble du site néanmoins, pour ce type de refroidissement, les postes de mesures ne peuvent pas éviter l'action des haies car « l'effet régional » du réseau de haies ralentit le vent et son action de brassage au niveau du sol.

La température instantanée et minimale d'une nuit advective subit une baisse moins intense sur les parcelles proches du remblai, parce que le mistral, engouffré et compressé dans l'emprise ferroviaire, est y plus puissant. La compression du vent entre le remblai et les haies brise-vent génère la déviation vers les parcelles fruitières (petit effet venturi).

Le mistral possède une variation diurne marquée : il a tendance à ralentir ou à s'arrêter durant la nuit (Aupetit, 1991). En cas d'arrêt du vent, le facteur radiatif redevient vite prépondérant. L'influence du remblai varie suivant la durée de la phase radiative :

- ◆ si le vent s'arrête en fin de nuit, les températures restent plus clémentes aux abords du remblai. L'écart de températures entre les parcelles éloignées et celles bordant la ligne ferroviaire n'a pas le temps de se combler. Si le vent est juste ralenti, il reste un écoulement résiduel dans l'emprise, suffisamment puissant pour mélanger les couches d'air au niveau du sol ;

- ◆ si le vent s'arrête en début de nuit, le refroidissement radiatif est important. L'air froid provenant des écoulements catabatiques de la colline du Pas des Lanciers stagne en amont du remblai. Le comportement thermique dépend également des conditions atmosphériques de la veille et des propriétés thermiques du remblai exposées dans le chapitre précédent. Après l'arrêt total du vent, l'écart thermique entre l'emprise de la LGV et les autres secteurs est rapidement réduit.

#### 2.2.3.1 Situation advective : un brassage de l'air à proximité de l'emprise ferroviaire

Par temps advectif, où le mistral souffle la totalité de la nuit, la température est plus élevée aux abords de la LGV par rapport aux parcelles éloignées (témoin). Le vent, engouffré dans l'emprise ferroviaire, empêche la stratification de l'air froid au niveau de la couche limite. La compression de l'air entre le remblai et les haies provoque une déviation du vent sur les parcelles et accentue les turbulences. « L'effet régional » des haies qui se traduit par une réduction générale du vent sur toute la parcelle (Guyot, 1991) limite l'action de brassage de l'air au niveau du sol. La vitesse du vent, moins importante, crée une zone d'abri où le refroidissement radiatif est à nouveau prépondérant. Les nuits du 15 au 16 novembre 1998 et du 22 au 23 mars 1999, le refroidissement nocturne est moins intense à proximité du remblai et les températures sont plus faibles dans les secteurs où la vitesse du vent est ralenti par le réseau de haies. Nous constatons un écart thermique moyen de 0,5 à 1°C entre ces deux secteurs (fig 2.73 ; 2.74 et annexe 9g).

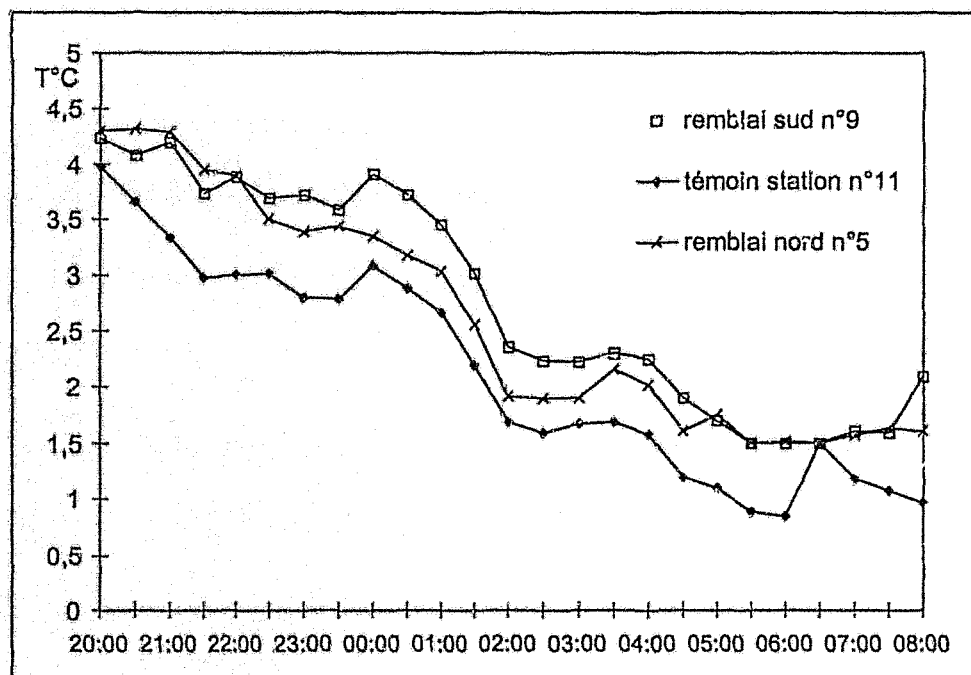


Fig 2.73 : Evolution de la température à proximité de la LGV et sur une parcelle éloignée en situation advective : moyennes réalisées toutes les 30 mn (15-16/11/1998).

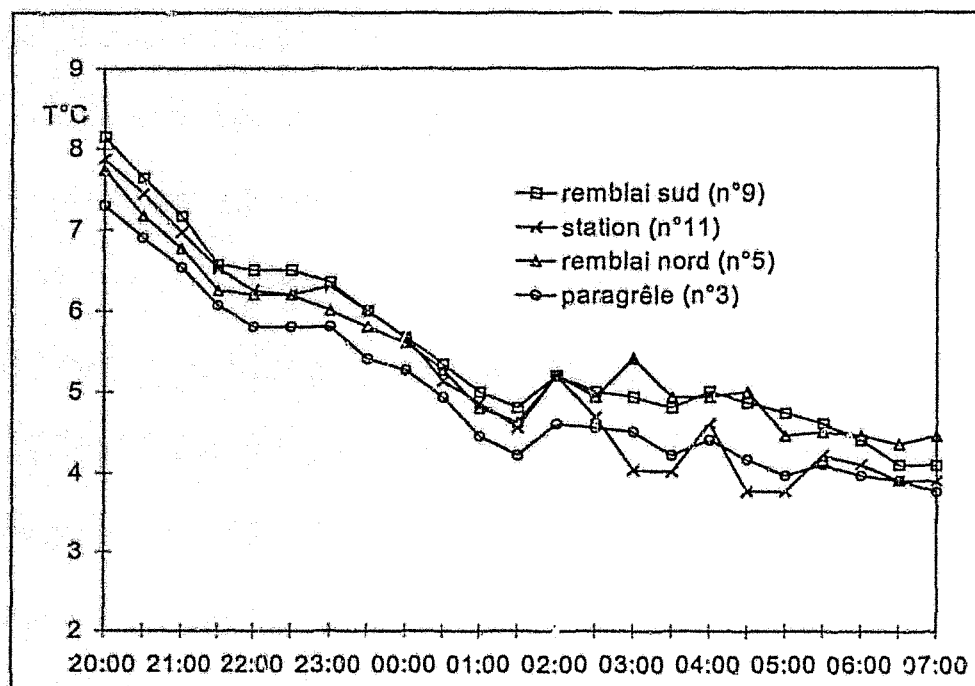


Fig 2.74 : Evolution de la température à proximité de la LGV et sur une parcelle éloignée en situation advective : moyennes réalisées toutes les 30 mn (22-23/03/1999).

Les profils verticaux de températures mettent en évidence une stratification de l'air entre 1m50 et 8m plus marquée sur le mât témoin qu'aux abords du remblai. L'écart moyen de température entre 1m50 et 3m est de 0,4°C sur le poste n°11 alors qu'il est de 0,25°C à proximité du remblai (fig 2.75a). Le vent homogénéise les températures en pénétrant sur les parcelles en bordure d'emprise. Par contre, sur le point de mesure où le vent n'est pas dévié latéralement sur la parcelle, l'air présent dans les premiers mètres au-dessus du sol est peu turbulent, ce qui explique un refroidissement plus important (fig 2.75b).

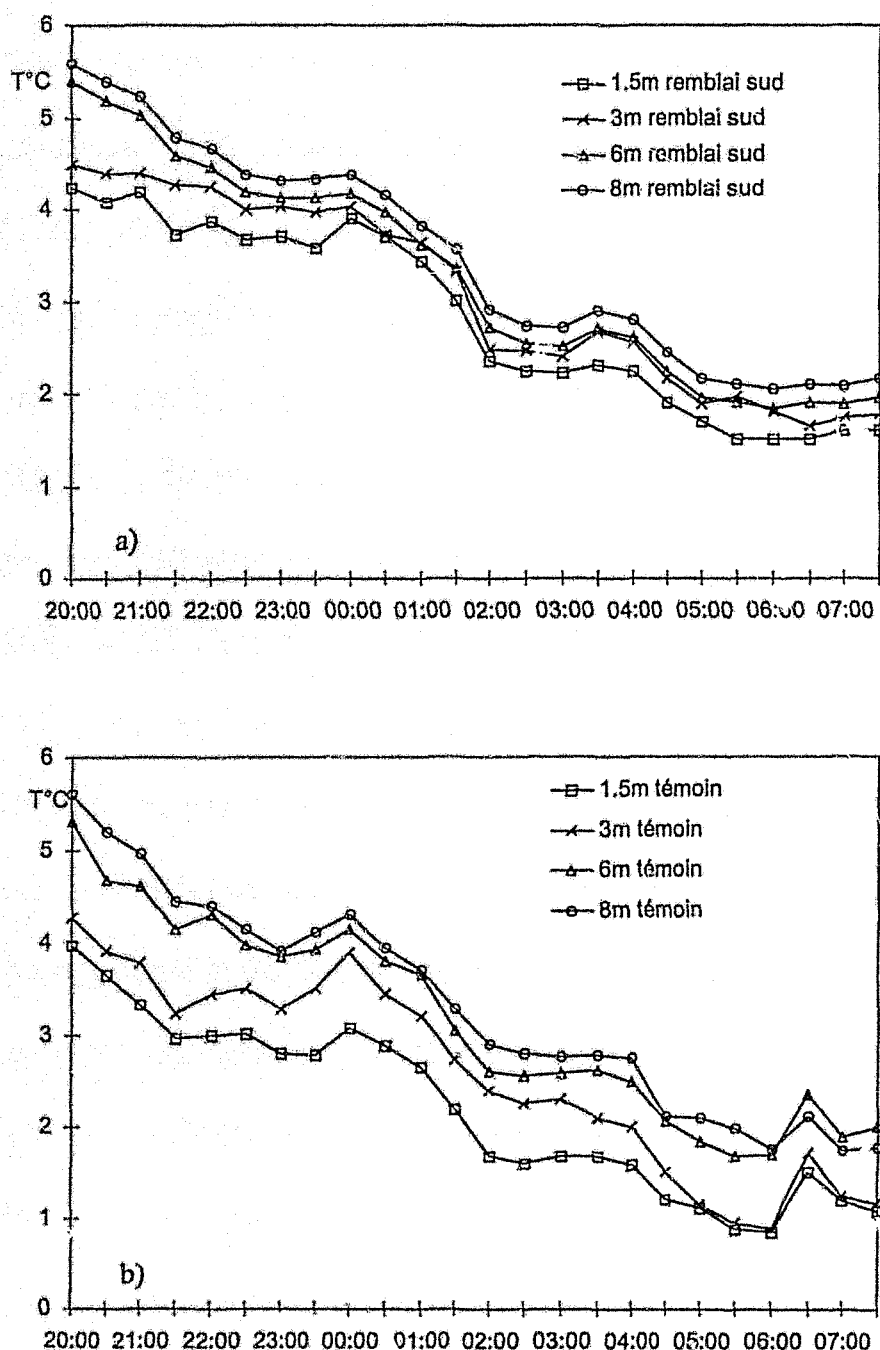


Fig 2.75 : Stratification thermique à proximité de la LGV (a) et sur une parcelle éloignée (b) en situation advective : moyennes réalisées toutes les 30 mn (15-16/11/1998).

Nous retiendrons que par temps advectif, le vent agit différemment sur les températures puisque d'une part, il véhicule la masse d'air froid et d'autre part, il limite le refroidissement radiatif par brassage d'air. Au printemps, même si l'air provenant de l'Europe du Nord est moins froid qu'en hiver, la succession de journées de mistral occasionne des températures diurnes peu élevées. Le capital énergétique diurne étant faible, le bilan radiatif nocturne risque d'être fortement négatif. Mais durant la nuit, dans les secteurs peu abrités, l'action du vent devient positive (brassage). A proximité du remblai, le mistral canalisé dans l'emprise ferroviaire homogénéise les températures de la couche limite et amoindrit les déperditions énergétiques infrarouges. Mais dès que le vent ralentit, le refroidissement nocturne s'intensifie.

Par exemple, la nuit du 19 au 20 novembre 1998, le vent ne s'est pas totalement arrêté mais a faibli à plusieurs reprises. Trois capteurs séparés chacun de quelques mètres sont disposés perpendiculairement à la LGV. Le premier se situe dans l'emprise, le second sur une parcelle voisine (point n°9) et le troisième sur une parcelle plus éloignée (point n°11 cf fig 2.57). Quand le vent souffle, la température est plus élevée (plus de 2°C) dans l'emprise car il n'y a aucun obstacle qui limite le vent contrairement aux parcelles qui sont protégées par des haies imperméables. Dès que la vitesse du vent ralentit, on remarque une forte chute de la température en un laps de temps très court. Par exemple, vers 02h00 lorsque la vitesse est inférieure à 3m/s, la température du capteur n°3 est passée de -2,5°C à -5,5°C en 1h30. Dans l'emprise, l'intensité du refroidissement est similaire (-3,5°C en 1h30) mais le minimum n'excède pas -4,5°C. Vers 07h00, moment le plus froid de la nuit, la température du capteur 1 atteint -5,5°C, celle du capteur 2 est inférieure à -6°C alors que le capteur 3 est proche de -7°C. Nous remarquons donc une différence significative à quelques mètres d'intervalle (fig 2.76 et annexe h).

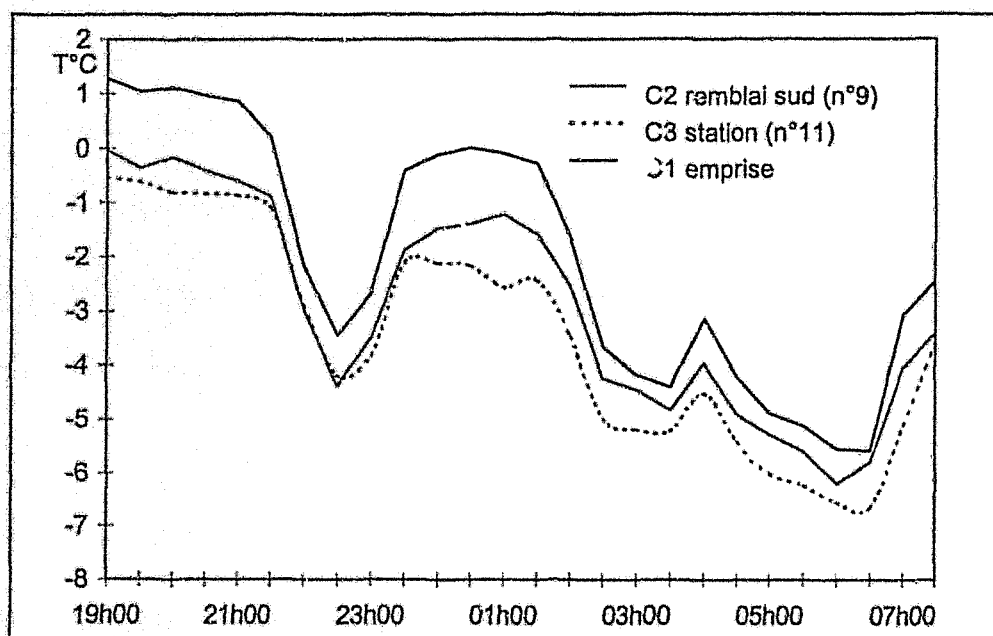


Fig 2.76 : Ecarts de températures entre l'emprise S.N.C.F. et les parcelles avoisinantes en situation advective avec ralentissement du mistral : moyennes réalisées toutes les 30 mn (19-20/11/1998).

Dans cet exemple, l'effet d'abri généré par les haies est peu visible car nous ne sommes pas dans une véritable situation d'arrêt de mistral où le vent s'arrête complètement, mais il est intéressant d'observer l'apport énergétique du brassage d'air engendré par le vent lorsque sa vitesse est supérieure à 3 m/s. Le couloir formé par l'emprise retarde la phase radiative, mais au cours d'un véritable arrêt de mistral (arrêt total du vent), l'effet de brassage d'air sur les températures au niveau du sol s'atténue progressivement lorsque le temps devient calme.

### 2.2.3.2 Situation d'arrêt de mistral :

En situation d'arrêt de mistral, l'influence du remblai sur les températures est complexe.

Au cas où le vent s'arrête en fin de nuit, les températures sont plus élevées aux abords de la ligne ferroviaire. L'absence d'obstacle dans l'emprise provoque un arrêt plus tardif du vent par rapport aux parcelles protégées par le réseau de haies. Un vent résiduel de 2 à 3 m/s limite le refroidissement aux abords de l'emprise pendant plusieurs dizaines de minutes par rapport aux parcelles éloignées du remblai. L'arrêt du vent se produisant en fin de nuit, les différences de températures entre les deux secteurs (proches et éloignés du remblai) ne se combleront pas. Cela explique des températures minimales plus élevées (environ  $+1^{\circ}\text{C}$ ) sur les parcelles bordants la ligne ferroviaire (fig 2.77).

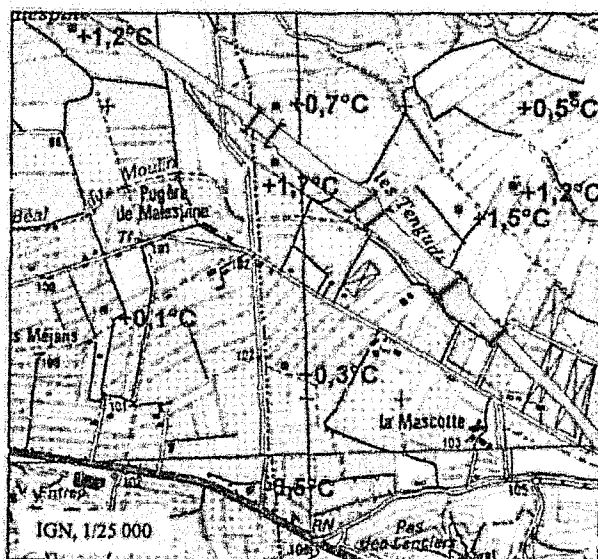


Fig 2.77 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle méso-locale (de part et d'autre de la LGV) en situation d'arrêt de mistral en fin de nuit : températures minimales 19-20/04/1998.

Quand le vent faiblit en début de nuit, l'écart de température entre les abords du remblai et les autres points de mesures du site se réduit rapidement. Au moment de l'arrêt du mistral, l'air, plus sec dans l'emprise (car asséché par le vent), subit un refroidissement plus intense à cause d'une forte évaporation. Comme l'humidité relative de l'air est faible, l'eau présente à la surface du sol va s'évaporer pour combler le déficit de saturation de l'air. Cette



évaporation va donc s'accompagner d'une consommation d'énergie qui va accélérer le refroidissement. Après l'arrêt total du vent, les écoulements gravitaires s'établissent et l'action du remblai est la même qu'en situation de gel radiatif.

La nuit du 23 au 24 mars 1999, après l'arrêt du mistral vers minuit, le refroidissement nocturne s'intensifie sur l'ensemble des points de mesures (en moyenne  $-6^{\circ}\text{C}$  en 3 heures). Nous remarquons que le point de mesures des « Méjeans », généralement le plus froid en situation radiative, enregistre la plus faible baisse durant la phase advective. Mais, dès l'arrêt du vent, le refroidissement est très intense sur ce poste. Au lever du jour, les températures les plus basses relevées sur ce poste mettent en évidence la présence de l'air froid dans ce secteur subhorizontal (fig 2.78). Si le vent s'arrête suffisamment tôt, le système d'écoulements gravitaires et d'accumulation d'air froid dans les secteurs plats ou en amont d'obstacles se reforme rapidement. Dans cet exemple, la forte baisse, induite par un air très sec et une forte déperdition énergétique d'origine radiative, est moins importante aux abords du remblai que sur les autres points de mesures. De manière comparable aux situations radiatives, le remblai accumule le rayonnement solaire au cours de la journée et la restitue durant la nuit (fig 2.79 et annexe i).

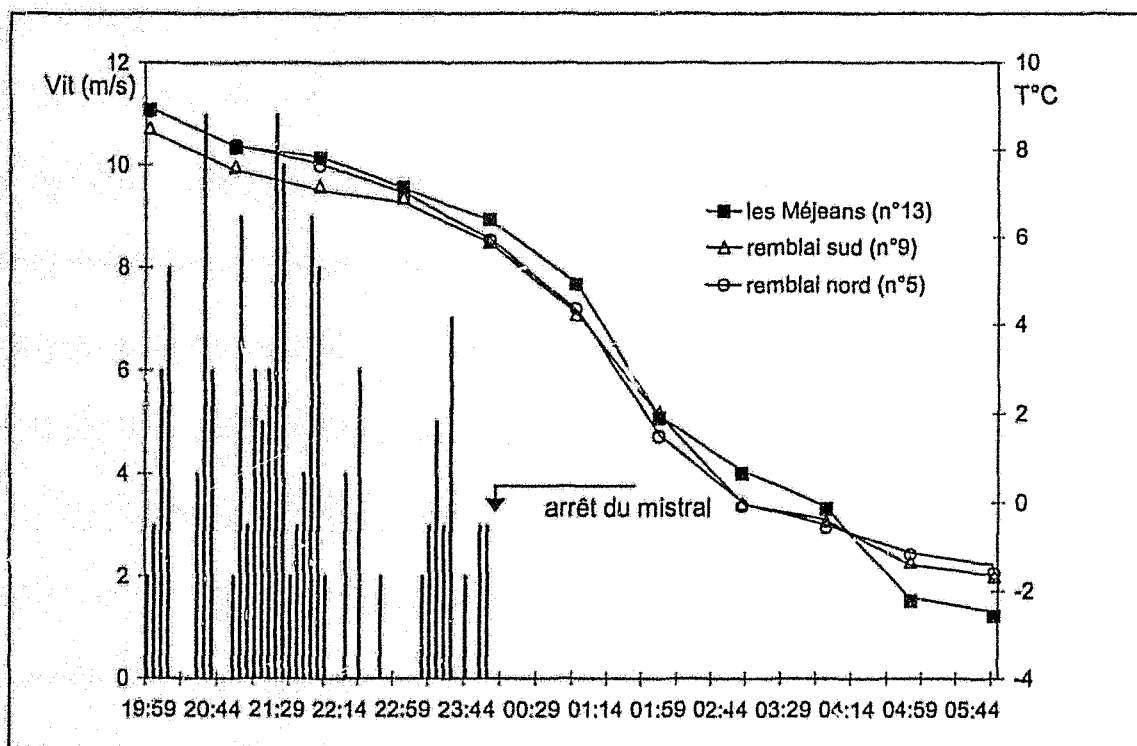


Fig 2.78 : Vitesse du vent enregistrée dans l'emprise de la LGV et évolution des températures à l'échelle méso-locale après un arrêt de mistral en milieu de nuit : vitesse du vent toutes les 5 minutes et moyennes de températures réalisées toutes les heures (23-24/03/1999).

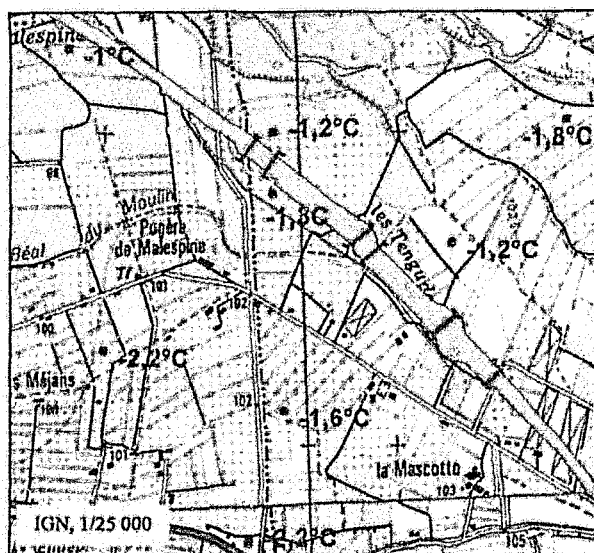


Fig 2.79 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle méso-locale (de part et d'autre de la LGV) en situation d'arrêt de mistral en milieu de nuit : températures minimales 23-24/03/1999.

Si la veille est nuageuse et que le vent ralentit suffisamment tôt dans la journée, la ligne ferroviaire risque d'agir sur les températures de façon similaire aux situations de gel radiatif avec faible rayonnement solaire. La nuit du 12 au 13 novembre 1998, l'évolution des températures à proximité de la LGV et sur la parcelle témoin (éloignée du remblai) est liée au comportement du vent et au faible apport énergétique diurne acquis par le remblai. Le vent de nord-ouest est plus fréquent et plus fort au bord du remblai que sur la parcelle témoin qui est mieux protégée. Mais dès l'arrêt du vent, les écoulements gravitaires se développent à nouveau. Nous constatons que le blocage de l'air froid par le remblai est immédiat, il ne se produit pas seulement en fin de nuit. La forte nébulosité de la journée du 12 novembre limite l'apport énergétique du remblai et accentue le refroidissement nocturne à proximité de la LGV (fig 2.80).

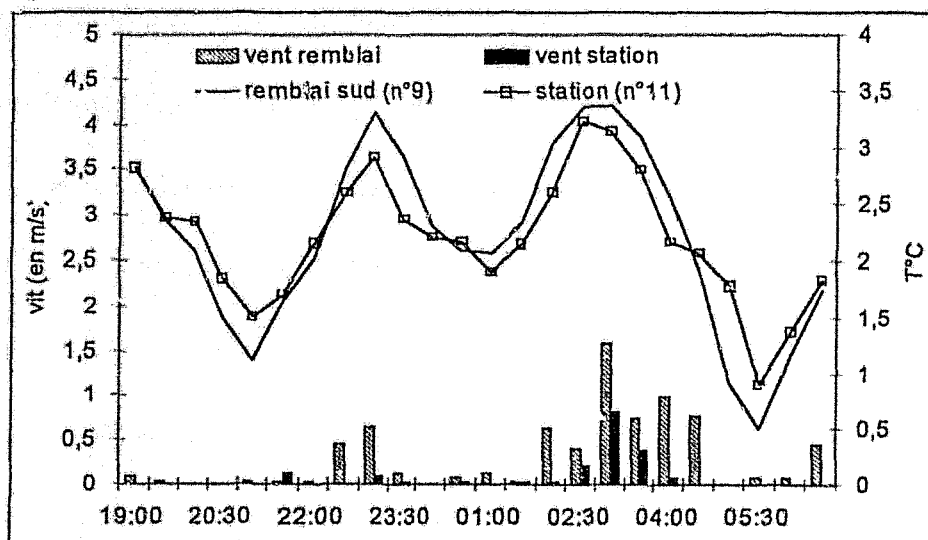


Fig 2.80 : Evolution des températures à proximité de la LGV et sur une parcelle éloignée en fonction de la vitesse du vent en situation d'arrêts de mistral précédant une journée nuageuse : moyennes de températures et de vitesses de vent réalisées toutes les 30 mn (12-13/11/1998).

Les différentes actions du vent sur la température de l'air (soit apport d'air froid, soit action de brassage) et les propriétés thermiques du remblai (soit restitution de l'énergie solaire, soit blocage de l'air froid) provoquent des situations gélives pendant lesquelles la ligne ferroviaire agit de façon opposée sur les températures. Le cas le plus défavorable peut être représenté par une nuit claire, faisant suite à une journée nuageuse et fraîche (mistral noir) lorsque le vent s'arrête en début de nuit. Le faible capital énergétique diurne et le fort rayonnement infrarouge nocturne provoque un bilan radiatif très négatif (formation d'écoulements gravitaires) et une baisse des températures importante. Le blocage de l'air froid par le remblai génère un refroidissement supplémentaire d'environ 1 à 2°C pour les parcelles situées au sud de la ligne ferroviaire. Ces valeurs sont comparables à celles observées en situation radiative avec journée nuageuse, mais le refroidissement général étant plus intense, le risque de gel pour les cultures au sud de la ligne ferroviaire est plus important.

## Bilan

Les mesures expérimentales réalisées en tenant compte des imbrications d'échelles spatiales ont permis de comprendre l'influence du remblai ferroviaire sur les températures nocturnes au cours de différents types de gel printanier. Les gelées printanières étant rares, certaines nuits de mesures sont effectuées en hiver, période où le rayonnement solaire est moins important et la durée du jour, plus courte. Toutefois, ces exemples sont présentés parce qu'ils apportent des informations supplémentaires (total de 68 nuits de mesures).

Les résultats de l'expérimentation, en situation de gel radiatif, font apparaître un zonage des basses températures dans les secteurs subhorizontaux situés au pied de la colline du Pas des Lanciers. Le remblai ferroviaire, en limitant l'action bénéfique de la brise de vallée et en créant une zone d'abri, favorise la circulation des écoulements gravitaires et des arrivées d'air froid au sud de l'ouvrage (cf fig 2.60). Par temps radiatif au nord de la ligne ferroviaire, le refroidissement est limité grâce à la brise de vallée. L'écart moyen des températures à 1m50 du sol varie entre 1 et 2°C sur les points de mesures de part et d'autre de la LGV. Néanmoins, la zone d'abri au sud du remblai est assez restreinte. Elle concerne les secteurs où le remblai atteint 10 à 15 mètres de haut (quelques centaines de mètres entre Mallemort et Senas). Dès que la hauteur du remblai est inférieure à environ 5 mètres (nord du site expérimental), la brise de vallée n'est plus bloquée, elle amoindrit l'action des écoulements gravitaires et limite le refroidissement radiatif. L'analyse de la structure verticale de la masse d'air au sud du remblai fait apparaître la présence d'une inversion thermique témoignant de l'accumulation d'air froid au niveau du sol. Au nord de la ligne ferroviaire, malgré la brise de vallée qui brasse l'air au niveau du sol, on constate une stratification thermique. Celle-ci est moins intense qu'au sud du remblai mais elle met en évidence l'influence du réseau de haies semi-perméables sur l'écoulement de vallée.

A l'échelle parcellaire, sur les parcelles limitrophes de chaque côté du remblai, l'évolution des températures nocturnes est conditionnée par l'apport du rayonnement solaire. Le refroidissement nocturne est atténué lorsque la nuit, de type radiatif, est précédée d'une journée ensoleillée. Le remblai (peu végétalisé) accumule, durant la journée, une quantité d'énergie solaire relativement importante (fort rayonnement direct). Grâce à ces réserves, le déficit nocturne est amoindri à proximité de la ligne ferroviaire. En situation radiative avec un temps couvert la veille, le remblai n'a aucun effet régulateur. Au contraire, l'air provenant du Pas des Lanciers vient s'accumuler contre l'obstacle. Les caractéristiques thermiques du secteur situé près du remblai sont semblables à celles du secteur plat « des Méjeans », qui est toujours le plus froid. Le remblai provoque une stratification de l'air froid dont la couche la plus froide s'étend de 3 à 6m de haut. Dans ce secteur, les parcelles dont les haies imperméables bloquent les écoulements d'air froid subissent un refroidissement supplémentaire d'environ 1,5°C. Par temps radiatif, les modifications de l'aérologie par les différents éléments du milieu provoquent une forte variabilité spatiale des températures au niveau de la couche limite. Le protocole expérimental que nous avons défini a permis de hiérarchiser les différents éléments « perturbateurs » et d'évaluer leur influence sur les températures (fig 2.81).

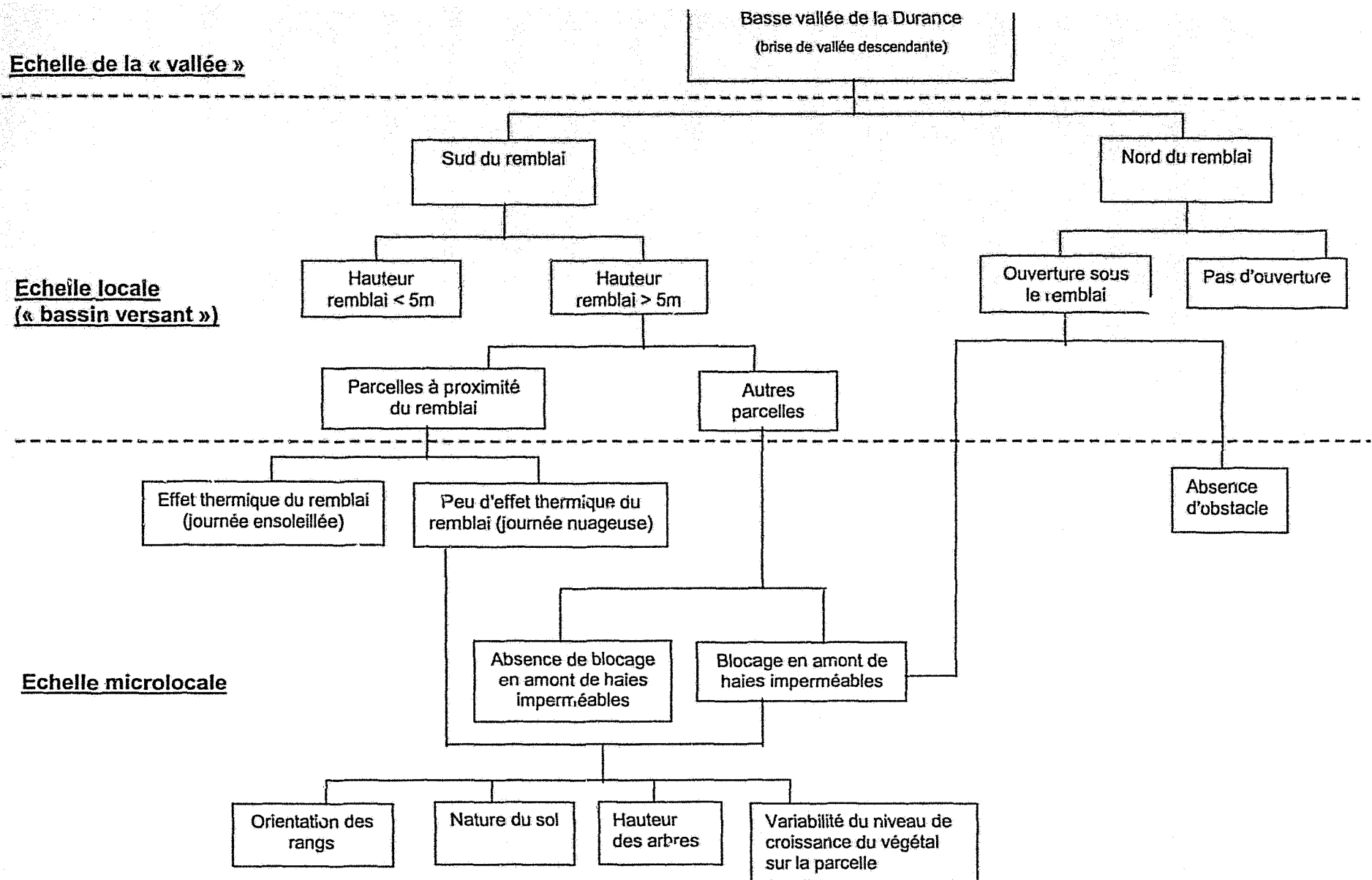


Fig 2.81: Hiérarchisation selon les niveaux d'échelles imbriquées des différents éléments du milieu influençant la répartition des basses températures en situations radiatives (journées nuageuses et ensoleillées) et par arrêt de mistral (quand le flux s'arrête en début de nuit) sur le terrain expérimental.

Cette hiérarchisation est également applicable aux situations de refroidissement nocturne après un arrêt de mistral précoce dans la nuit alors que le facteur radiatif est très important.

Par temps advectif et après un arrêt de mistral en fin de nuit, la variabilité spatiale des températures minimales est plus faible qu'en situation radiative. Le vent, en s'engouffrant dans l'emprise, homogénéise les températures et limite le risque gélif en brassant l'air froid qui se forme par déperdition énergétique. L'apport thermique est de 1 à 2°C sur les parcelles bordant la ligne nouvelle. A l'échelle microclimatique, les haies brise-vent imperméables génèrent un refroidissement supplémentaire d'environ 1,5°C en créant une zone abritée du vent immédiatement en aval de la haie (fig 2.82).

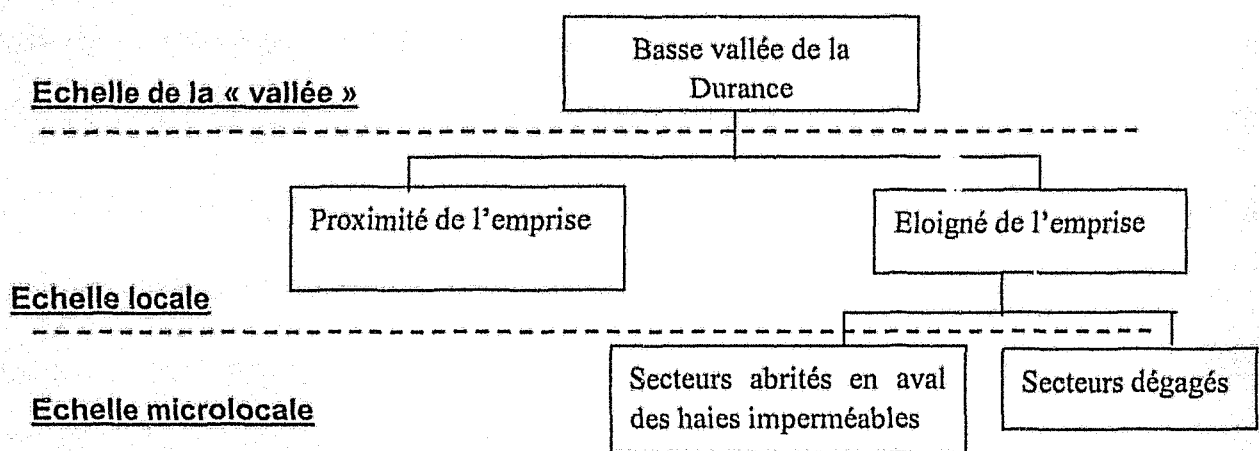


Fig 2.82 : Hiérarchisation selon les niveaux d'échelles imbriquées des différents éléments du milieu influençant la répartition des basses températures en situation advective et par arrêt de mistral (quand le flux s'arrête en fin de nuit).

### 3 IMPACT DE LA LIGNE FERROVIAIRE SUR LE MISTRAL

---

#### 3.1 Modification de l'écoulement du mistral après la destruction des haies brise-vent sur un large couloir

L'implantation du remblai ferroviaire nécessite la destruction des cultures et des haies brise-vent sur un couloir pouvant atteindre 90-100m de large. Ce couloir, parallèle au mistral, modifie son écoulement. Des mesures de vitesse et de direction de vent sont effectuées simultanément avec deux stations météorologiques portables dans l'emprise et sur des parcelles alentours.

Le 16 octobre 1996, les conditions atmosphériques sont favorables à un fort mistral. Dans l'emprise, le vent est puissant et il est canalisé. Les directions relevées avec une girouette manuelle et une boussole le confirment. Le vent, qui est de secteur nord-ouest (entre 290° et 310°) en secteur dégagé, est orienté entre 320° et 340° dans l'emprise. Les directions principales sont bien marquées, ce qui démontre la faiblesse des turbulences. Les vitesses observées sont comparables à celles relevées sur le poste témoin dégagé. Suivant le point de mesures dans l'emprise, la vitesse moyenne (sur 10 mn) oscille entre 8 et 12,5 m/s, avec un maximum de 19,1 m/s. Sur le poste témoin, la vitesse moyenne est de 14 m/s et le maximum 20 m/s. Sur les parcelles limitrophes, les relevés effectués simultanément montrent que le vent ne pénètre pas latéralement sur les parcelles et l'action de protection des haies brise-vent n'est donc pas amoindrie. La vitesse du vent est 4 fois inférieure à celle mesurée dans l'emprise. Par contre, les vitesses moyennes et maximales relevées sur une parcelle où la haie a été détruite sont comparables à celles obtenues dans l'emprise (fig 2.83).

Dans les étapes successives de la construction de la ligne LGV Méditerranée, la réalisation de l'emprise est la première phase de perturbation du mistral. Dans ce large couloir, l'absence de haie induit une forte vitesse du vent. Toutefois, l'écoulement est canalisé et ne « déborde » pas sur les parcelles où les brise-vent ont toujours une action de protection. Ce phénomène peut être comparé à un effet de canalisation en milieu urbain. D'après Candemer (1976, 1991), l'effet de canalisation correspond au passage du vent dans un couloir à ciel ouvert. Une canalisation n'est pas forcément une cause de turbulence sauf si elle est associée à une anomalie aérodynamique (resserrement du couloir, effet Venturi, ...). Les nombreux tests en soufflerie réalisés par le Centre Scientifique et Techniques du Bâtiment (CSTB) et par la soufflerie Eiffel, ont démontré que si le couloir est d'une largeur supérieure à 2 fois la hauteur des obstacles le bordant, l'air est peu compressé et par conséquent, l'accélération et la déviation du vent aux abords de l'obstacle est très faible (fig 2.84). Cette théorie, définie dans le milieu urbain, semble s'appliquer à notre terrain. La canalisation à ciel ouvert constituée par l'emprise bordée à intervalle régulier par les haies peut être comparée à un boulevard très large bordé de bâtiments. La hauteur des haies n'excédant pas 25m, la largeur de l'emprise est toujours supérieure à 2 fois la hauteur des haies.

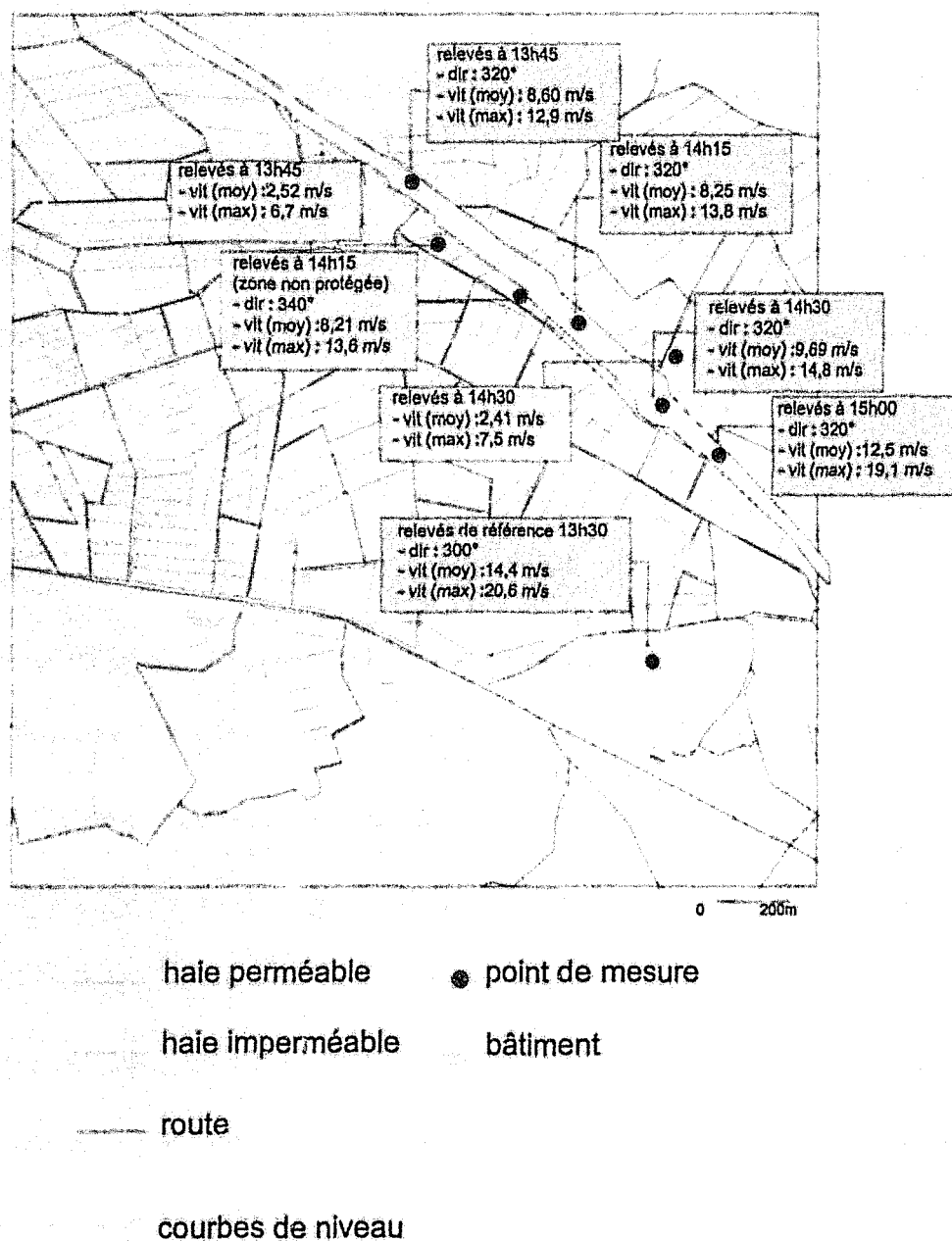


Fig 2.83 : Ecoulement du mistral aux abords de l'emprise de la LGV (mesures réalisées le 16 octobre 1996).



Après la construction du remblai et des merlons antibruit, deux couloirs de largeur beaucoup plus petite seront présents de chaque côté de l'obstacle ferroviaire. En réduisant la section de l'emprise, le rapport entre hauteur des obstacles (haies et remblai/merlons) et largeur du couloir devient négatif et l'écoulement risque d'être modifié.

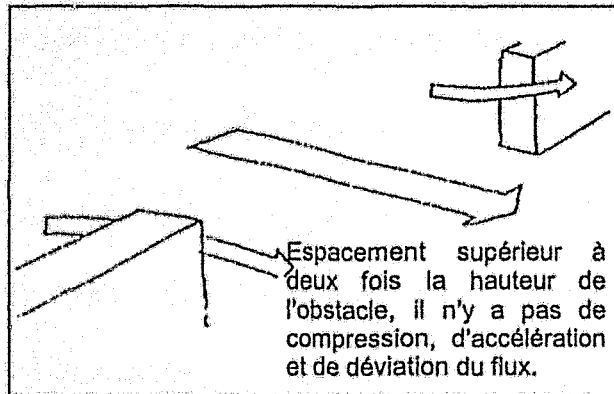


Fig 2.84 : Comportement du vent canalisé suivant la largeur du couloir : exemple d'un vent peu compressé (d'après Gandemer, 1991).

### 3.2 Modification de l'écoulement du mistral après la construction du remblai de la LGV

Le remblai et les merlons antibruit dépassent 15 m de haut et occupent l'ensemble de la largeur de l'emprise. Les deux couloirs, de part et d'autre des ouvrages ferroviaires, ont une largeur inférieure à 20 m. D'après la théorie exposée par Gandemer (1991), le vent canalisé sera compressé et turbulent. Des mesures sont réalisées sur une parcelle à proximité de la ligne ferroviaire afin d'observer les modifications de l'écoulement de l'air induites par le remblai.

Le 15 avril 1997, la force du vent est en moyenne de 13,5 m/s à Marignane. Des mesures ponctuelles de vitesse et de direction du vent (moyenne sur 5 mn) sont effectuées dans l'emprise et sur la parcelle n°3. Les relevés sont réalisés sur trois rangs (3<sup>ème</sup>, 8<sup>ème</sup> et 11<sup>ème</sup>) comprenant chacun quatre points de mesures allant du bord de l'emprise au milieu de la parcelle. Au niveau du 3<sup>ème</sup> rang, le vent est puissant ( $V_{\text{moy}} = 6-8 \text{ m/s}$  ;  $V_{\text{max}} = 20 \text{ m/s}$ ) et peu turbulent dans l'emprise. Sa direction nord-nord-ouest l'oriente vers la parcelle. Les données en bordure de parcelle, jusqu'à environ 8-10 m à l'intérieur, mettent en évidence un écoulement turbulent. D'ailleurs, les arbres fruitiers situés en début de rangée sont dépourvus de fruits et les feuilles sont déchiquetées. En milieu de rang, l'action de protection de la haie redevient prédominante ( $V_{\text{moy}} < 2 \text{ m/s}$  ;  $V_{\text{max}} = 4 \text{ m/s}$ ). Sur le 8<sup>ème</sup> rang, le vent est toujours fort dans l'emprise ( $V_{\text{moy}} = 7-8 \text{ m/s}$  ;  $V_{\text{max}} = 15 \text{ m/s}$ ). Les premiers arbres subissent un vent fort et turbulent. Par exemple, vers le 3<sup>ème</sup> et le 5<sup>ème</sup> arbres, la vitesse moyenne varie entre 6 et 7 m/s avec des rafales à plus de 15 m/s. Le poste de mesures situé en milieu de rangée subit quelques tourbillons dus à la fin de l'influence de la haie mais la vitesse du vent est assez faible ( $V_{\text{moy}} = 2-3 \text{ m/s}$ ). Au niveau du 11<sup>ème</sup> rang, le vent est fort et turbulent sur l'ensemble des points de mesures de la parcelle. Dans ce secteur, l'écoulement est perturbé par l'effet « venturi » entre la haie et le remblai ainsi que les retombées tourbillonnaires en aval de la haie (fig 2.85).

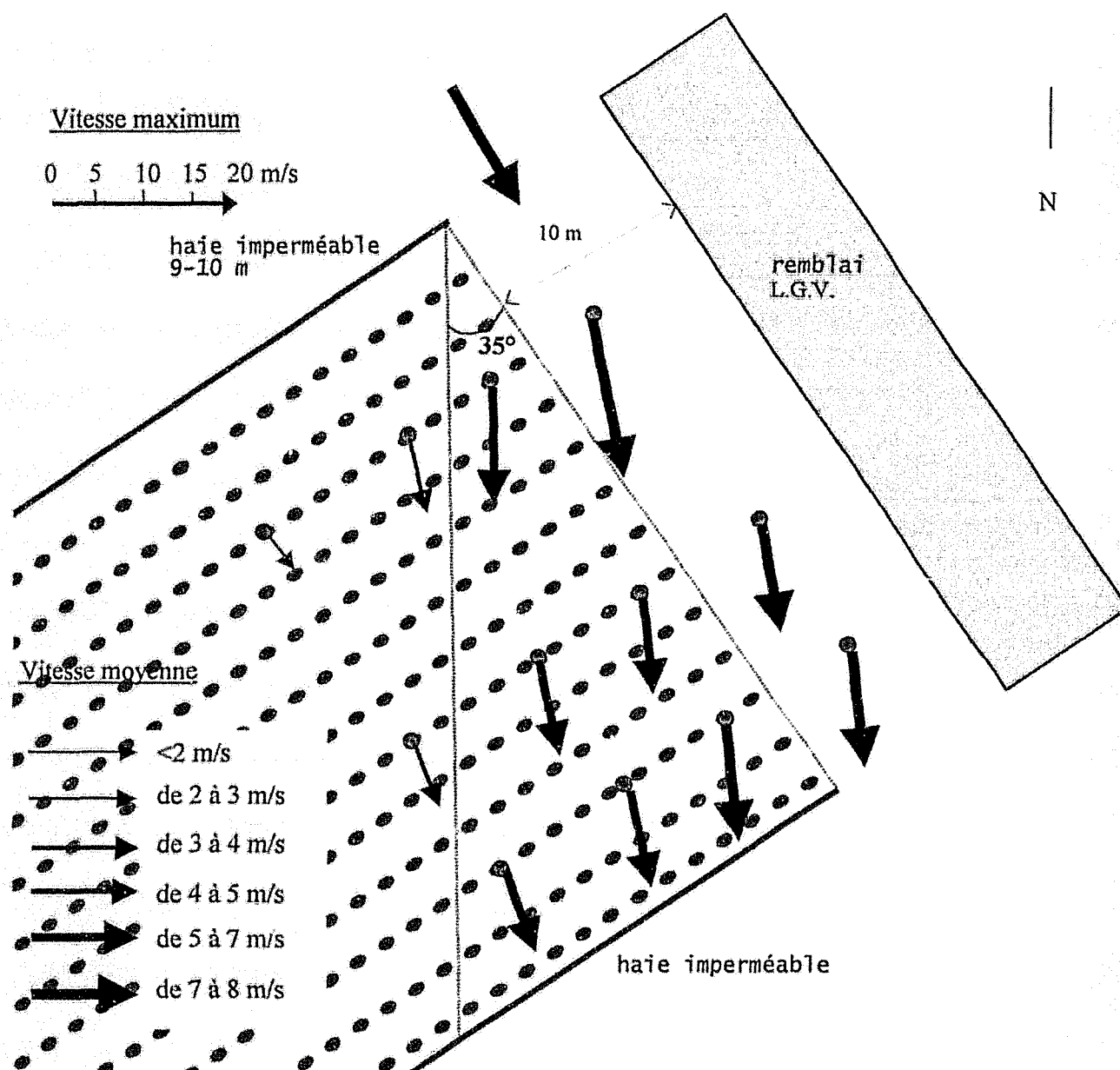


Fig 2.85: Ecoulement du mistral aux abords du remblai de la LGV  
(mesures réalisées le 15 avril 1997)

La journée du 28 mai 1997, six girouettes électroniques sont disposées dans l'emprise et sur la parcelle n°3. Dans l'emprise, les directions se situent dans le cadran ouest à nord-ouest. Elles sont similaires à celles relevées dans l'emprise sans remblai. Par conséquent, l'écoulement est toujours canalisé par l'emprise (couloir à ciel ouvert) même si sa largeur est fortement modifiée. En bordure de parcelle, les directions principales s'orientent entre nord-ouest et nord-nord-ouest. L'air comprimé entre la haie et le remblai se dirige vers la parcelle. Toutefois, il est assez surprenant que l'écoulement soit si peu turbulent sur ces deux postes de mesures. A l'intérieur de la parcelle, les turbulences sont beaucoup plus intenses. Il y a sûrement une conjonction de phénomènes correspondant à la zone tourbillonnaire liée au recollement du vent à l'aval de la haie imperméable et à la compression de l'air entre le remblai et la haie, mais nous ne pouvons pas le quantifier (fig 2.86).

Par rapport à l'expérimentation réaliste dans l'emprise avant l'implantation du remblai, le vent canalisé est dévié vers la parcelle. Entre le remblai et les parcelles limitrophes, le couloir est beaucoup plus étroit que la trouée initiale correspondant à l'emprise. Le resserrement entre les haies (plus ou moins imperméables) et le remblai provoque la compression de l'air. Par conséquent, le vent est accéléré et dévié vers la parcelle en aval du brise-vent. La déviation du vent n'est pas ressentie sur toute la parcelle parce qu'il y a encore un effet de protection de la haie additionné à l'action de rugosité des arbres fruitiers (Guyot, 1983). Sur les derniers rangs des parcelles, la fin de l'influence des haies et l'action du remblai engendrent un vent fort et très turbulent.

La compression de l'air s'explique par le rapport entre la hauteur des obstacles (haies, remblai) et la largeur du couloir qui est inférieur à  $2H$ . Cette situation est comparable à celle rencontrée dans les rues d'une ville : dans les zones bâties, le vent s'engouffre dans les ouvertures entre les bâtiments. L'imperméabilité des bâtiments génère des tourbillons dans les coins (fig 2.87 et 2.88). Ces phénomènes sont perceptibles dès que le vent canalisé dans l'emprise se heurte aux haies. Nous estimons que le vent est dévié vers la parcelle suivant un angle d'environ 35 degrés formant une zone triangulaire où l'écoulement turbulent est néfaste pour la qualité des fruits (boisage, coup, ...). Ce zonage empirique a également été vérifié sur une parcelle protégée par une haie perméable (parcelle n°4 cf annexe 5).



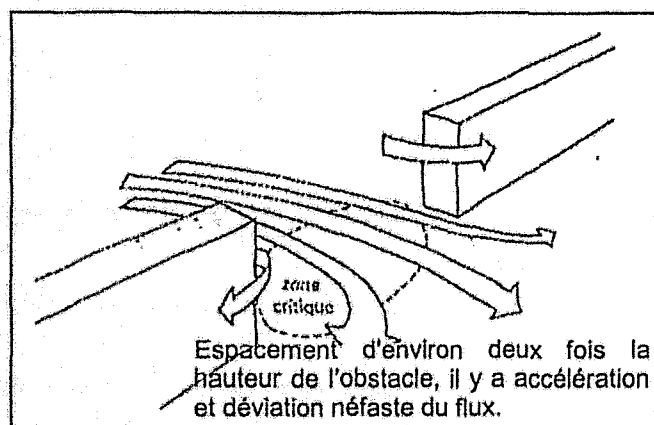


Fig 2.87 : Comportement du vent canalisé suivant la largeur du couloir : exemple d'un vent compressé (d'après Gandemer, 1991).

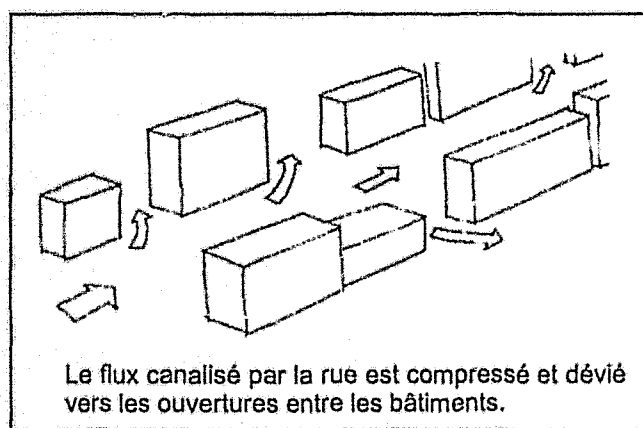


Fig 2.88 : Effet de canalisation et de déviation d'un vent (d'après Gandemer, 1991).

## Bilan

Les mesures météorologiques effectuées à différentes échelles suivant les phases de modification du milieu - *constructions successives de l'emprise et du remblai* - ont permis de comprendre et d'évaluer l'impact de la ligne ferroviaire sur le mistral.

Après avoir étudié l'écoulement du mistral en aval de différents types de haies, nous avons déterminé des surfaces théoriques où la vitesse et les turbulences sont amoindries par les haies brise-vent. Ces mesures étant réalisées soit avant le début des travaux de la LGV, soit sur des parcelles éloignées des infrastructures ferroviaires, les résultats obtenus permettent de définir le microclimat engendré par les haies brise-vent en situation de mistral.

Connaissant le comportement aérodynamique en aval d'un brise-vent, nous avons choisi des parcelles tests à proximité de la LGV, afin de mesurer l'impact des différentes phases de travaux sur l'écoulement du mistral. La compression de l'air entre les infrastructures ferroviaires et les haies brise-vent provoque une déviation du vent turbulent vers les parcelles bordant la LGV. Nous estimons que la surface parcellaire influencée par la ligne ferroviaire représente une zone triangulaire dont la pointe, partant de la haie, a un angle d'environ 35 degrés. A l'échelle microclimatique, le secteur le plus néfaste pour les cultures fruitières correspond à la partie de la parcelle qui n'est plus protégée par la haie brise-vent et qui est comprise dans ce triangle empirique.

## CONCLUSION DE LA PARTIE 2

---

La démarche adoptée dans cette étude a permis d'évaluer l'impact du remblai de la LGV sur la variabilité des températures nocturnes et du mistral aux échelles fines.

Les campagnes de mesures météorologiques réalisées en fonction de l'imbrication des échelles spatiales (de l'échelle topoclimatique à l'échelle microclimatique) ont permis d'estimer l'influence des différents éléments du milieu sur la variabilité spatiales des températures nocturnes en situations gélives (radiatif, advectif et arrêt de mistral) et d'en déduire l'influence du remblai.

Par temps radiatif, la basse vallée de la Durance est drainée par une brise de vallée descendante d'échelle topoclimatique. La vitesse de ce type d'écoulement, comparable à celle d'un vent synoptique, limite le refroidissement nocturne (déperditions énergétiques radiatives) par action de brassage de l'air dans les premiers mètres au-dessus du sol. A l'échelle mésolocale, le remblai ferroviaire modifie l'aérologie nocturne en détournant la brise de vallée et en créant une zone d'abri ; limitant ainsi son effet bénéfique dans un secteur topographiquement à risque (zone plane en aval d'un bassin versant) situé au sud-ouest de la LGV. Par conséquent, l'implantation du remblai génère deux secteurs distincts. Un premier, au nord-est de la LGV, est toujours sous l'influence de la brise de vallée et un second, au sud-ouest, où les écoulements gravitaires peuvent s'établir et accentuer le refroidissement nocturne. En effet, contrairement à la brise de vallée descendante, les écoulements gravitaires glissent lentement suivant les lignes de pente et provoquent la formation de « poches » d'air froid dès qu'ils sont ralentis ou bloqués par un obstacle. C'est le cas du remblai qui forme un barrage aux écoulements gravitaires provenant du secteur du Pas des Lanciers. La zone d'abri au sud-ouest du remblai est toutefois assez restreinte car dès que la hauteur du remblai est inférieure à 5 m, l'action de la brise de vallée redevient prépondérante. Au niveau microclimatique, les caractéristiques du remblai (nature des matériaux, exposition, inclinaison) influent sur l'évolution des températures nocturnes sur les parcelles limitrophes de la LGV. Après une journée ensoleillée, le remblai accumule une quantité importante d'énergie solaire. Grâce à ces réserves, le déficit nocturne est limité sur les parcelles à proximité de la LGV. Ce phénomène est très limité après une journée nuageuse. A cette échelle, les haies brise-vent sont les éléments qui engendrent la plus forte variabilité spatiale des températures nocturnes. Suivant le type de haie (perméable ou imperméable) et sa position par rapport aux écoulements gravitaires, les écarts de températures peuvent atteindre plusieurs degrés sur une distance de quelques mètres.

En situation advective (et d'arrêt de vent en fin de nuit), les phénomènes d'échelle topoclimatique ne génèrent pas autant de variations thermiques qu'en situation radiative. Le brassage de l'air par le vent limite la formation des écoulements de pente et homogénéise les températures sur l'ensemble du site. A proximité de la LGV, le mistral canalisé dans l'emprise ferroviaire homogénéise également les températures. A l'échelle microclimatique, les haies brise-vent provoquent (comme dans le cas des nuits radiatives) des différences thermiques importantes entre la partie de la parcelle protégée du vent (accentuation du refroidissement par déperditions radiatives) et l'autre où le vent est suffisamment fort pour limiter la formation d'air froid au niveau du sol.

Quant à l'impact du remblai sur l'écoulement du mistral, les campagnes de mesures réalisées pendant les phases successives de la construction de la LGV ont permis de faire un différentiel entre l'écoulement du mistral sur le site initial (non modifié) puis après l'implantation du remblai. La destruction des cultures et des haies sur la largeur de l'emprise a provoqué une canalisation et une accélération du vent. La largeur du couloir (environ 80-100 m) étant supérieure à deux fois la hauteur des obstacles le bordant (haies brise-vent d'une hauteur de 9 à 20 m), l'air est peu compressé. Mais après la construction du remblai, le resserrement entre les haies et l'obstacle ferroviaire (inférieur à 2H) a accentué la compression de l'air et a engendré une déviation du vent fort et turbulent sur les parcelles avoisinantes.

En définitive, après les nombreuses journées et nuits de mesures météorologiques (68 nuits gélives et 26 épisodes de mistral), nous pouvons donc faire quelques constatations sur l'impact microclimatique des infrastructures de la LGV Méditerranée :

- ◆ en situation de gel radiatif (et d'arrêt de mistral en début de nuit), le remblai ferroviaire modifie l'aérogologie locale et crée une zone d'abri au sud-ouest de la LGV où le refroidissement nocturne est accentué puisque l'écart thermique moyen de part et d'autre de la LGV est proche de 2°C ;
- ◆ en situation de gel advectif (et d'arrêt de mistral tardif), le vent canalisé par l'emprise ferroviaire limite le refroidissement nocturne par action de brassage. L'écart thermique moyen entre les parcelles proche de la LGV et les parcelles abritées du vent est également d'environ 2°C ;
- ◆ par temps de mistral, le vent canalisé par l'emprise, subit une forte accélération. La compression de l'air par des obstacles imperméables (remblai et merlons antibruit) et semi-perméables (haies brise-vent) provoque une déviation du vent puissant et turbulent sur les parcelles avoisinantes. La partie de la parcelle où l'écoulement du mistral est modifié par le remblai forme un triangle empirique avec un angle d'environ 35 degrés.

Mais ces résultats ne nous permettent pas de déterminer l'influence des infrastructures ferroviaires sur le risque climatique pour les cultures fruitières. En effet, en arboriculture, il faut tenir également compte de la capacité du végétal à résister aux phénomènes météorologiques. Pour cela, nous mettons en place une expérimentation agronomique : un contrôle sur fruits dont les objectifs sont d'analyser l'aspect du végétal après un épisode météorologique extrême (ex : forte nuit de gel) ou juste avant la récolte (ex : boisage du fruit après une succession d'épisodes de mistral), puis de valider les résultats des mesures météorologiques.



## **PARTIE 3 : VALIDATION DES MESURES METEOROLOGIQUES A PARTIR DE L'OBSERVATION DES CULTURES**

---

Les mesures météorologiques réalisées aux différentes échelles permettent d'étudier la variabilité spatiale des températures minimales (suivant plusieurs types de gel) et de l'écoulement du mistral. Grâce à ces résultats, nous évaluons l'impact de la LGV sur la répartition de ces variables météorologiques. Mais le risque en arboriculture se détermine d'après la combinaison de l'aléa météorologique (ou climatique) et de la sensibilité du végétal. Nous devons donc observer l'état du végétal après des épisodes de mistral violent et de forte gelée pour déterminer les secteurs où le risque est accentué par le remblai.

Les protocoles d'analyse du végétal ne sont pas les mêmes pour les deux variables météorologiques :

- ♦ Pour le mistral, l'expérimentation consiste à observer l'aspect qualitatif du fruit. En effet, les défauts de boisage ou de coups sur le fruit se produisent après une succession d'épisodes de vent violent. Les observations sont donc réalisées au moment de la récolte.
- ♦ Pour le gel, le protocole expérimental est plus complexe. Les dégâts provoqués par l'aléa météorologique peuvent être d'ordre quantitatif (destruction du fruit) et d'ordre qualitatif (défauts sur le fruit). Dans le premier cas, soit nous analysons les bourgeons ou les fleurs « grillés » juste après l'épisode gélif, soit nous attendons que les organes végétaux chutent et nous comptons le nombre de fruits restant après la fructification. Dans le second cas, nous observons la proportion de fruits abîmés (déformations, anneaux de gel) par arbre.

Déterminer les zones à risque gélif accentué par le remblai est compliqué. Sur les trois printemps d'observation (1998, 1999 et 2000), la majorité des nuits gélives n'a pas engendré de dégâts sur les parcelles, d'où la difficulté de réaliser des contrôles sur fruits. En mars 1999, plusieurs gelées importantes se sont succédées et ont provoqué des dégâts sur les variétés à floraison précoce. Mais, comme ces forts refroidissements sont de natures différentes (radiatif, arrêt de mistral), la répartition des dommages ne retranscrivent pas l'influence d'un type de gel précis.

## 1 LES VERGERS APRES LE GEL PRINTANIER

---

Nous présentons les résultats de trois expérimentations agronomiques réalisées après une nuit de gel intense ou après la succession d'épisodes gélifs. Le premier exemple concerne une parcelle de poiriers située au sud-est de la Costière de Nîmes dans le département du Gard. Cet exemple ne fait pas partie de l'espace d'étude de la LGV, mais il nous semble très intéressant pour montrer l'utilité de l'observation du végétal dans la détermination des secteurs à risques gélifs. Pour cette étude, nous ne disposons pas de données météorologiques locales mais l'observation des fruits fait très bien ressortir l'action de la topographie et des haies brise-vent sur le gel. Les autres exemples font suite aux mesures réalisées après plusieurs épisodes de gel dans la basse vallée de la Durance. Le premier traite d'une parcelle qui a subi une succession de nuits gélives de types différents. Nous montrons qu'en combinant l'analyse du végétal avec des données météorologiques, il est possible de définir les divers paramètres responsables des dégâts à certains endroits de la parcelle. Le second exemple fait l'analyse des bourgeons gelés sur des vergers situés aux environs du remblai L.G.V. L'objectif est de combiner les résultats des mesures météorologiques (répartition des températures) et les observations agronomiques afin de déterminer les secteurs où le risque gélif est accentué par la LGV.

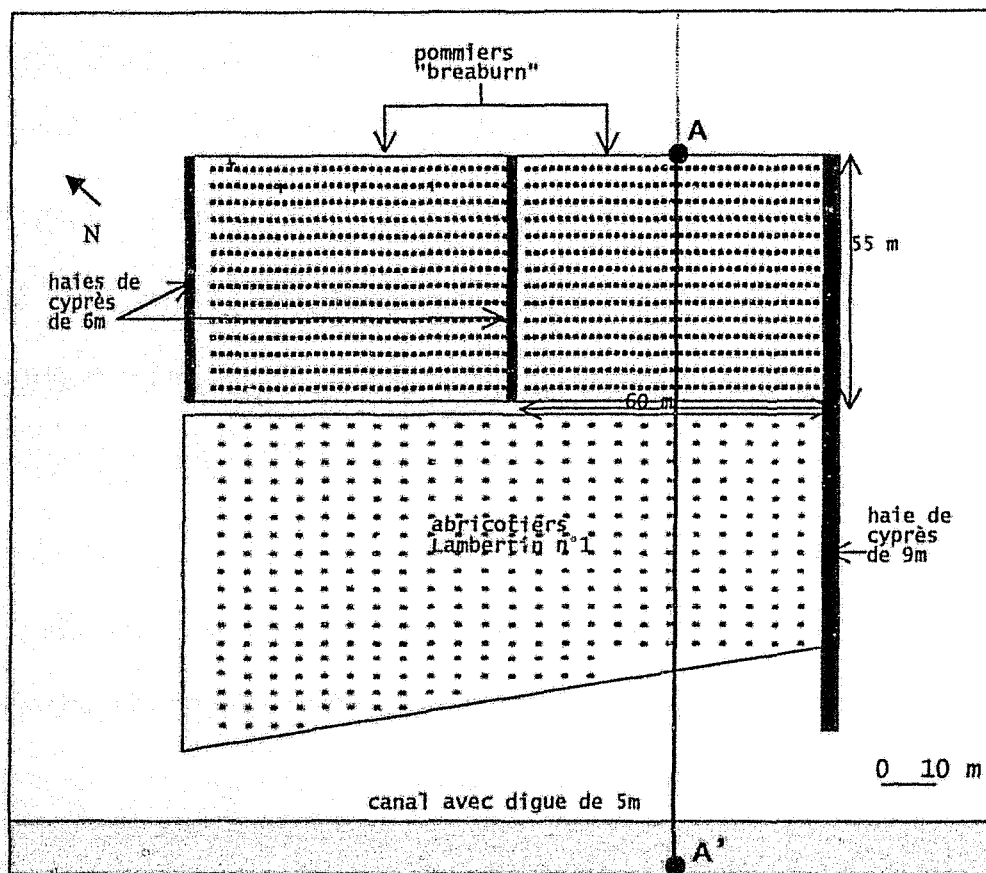
A terme, le contrôle sur fruits associé à des mesures climatiques ainsi qu'à des données liées à l'occupation du sol (relief, végétation, ...) doit permettre de comprendre les différents mécanismes du gel à diverses échelles (ex : mésolocale et microclimatique) et de définir, à une échelle très fine, les secteurs à risques gélifs.

### 1.1 Méthode d'observation de la répartition des fruits gelés sur une parcelle arboricole

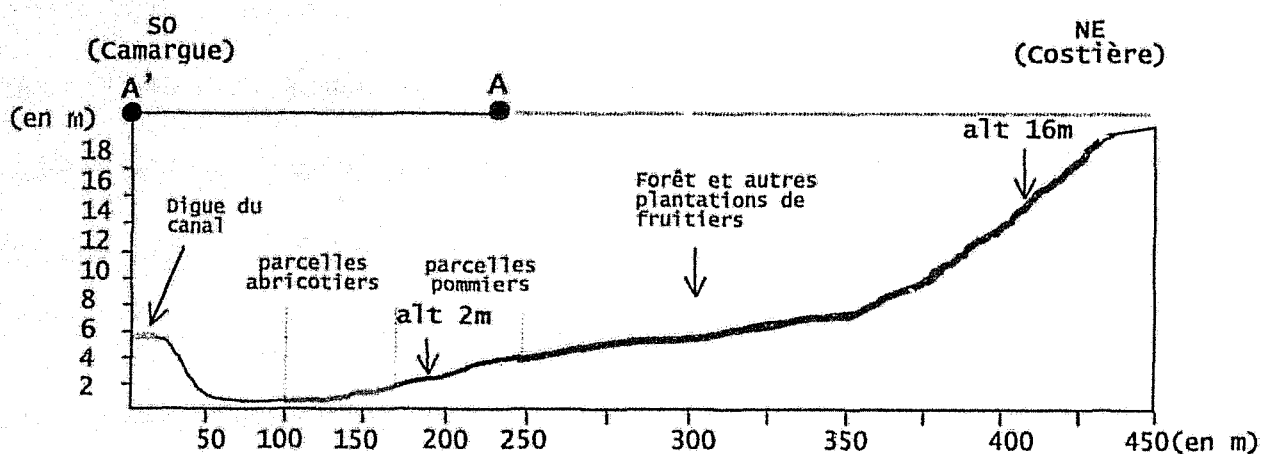
Dans la nuit du 13 au 14 avril 1998, une gelée de type radiatif (ciel clair, vent faible) cause de gros dégâts sur les cultures fruitières dans le département du Gard. Après une journée pluvieuse et fraîche, le ciel se dégage en début de nuit. Les pertes radiatives combinées avec le faible capital énergétique de la journée entraînent une forte baisse de la température nocturne. La température descend jusqu'à  $-4^{\circ}\text{C}$ , occasionnant des dommages considérables sur les plantations de pêchers, d'abricotiers et de pommiers.

L'expérimentation agronomique se situe sur une exploitation arboricole au sud-est de la Costière de Nîmes, sur la commune de Bellegarde (Gard). Les comptages de fruits s'effectuent au mois de juin, sur des parcelles de pommiers (variété Breaburn) et d'abricotiers (variété Lambertin n°1), bordées à l'ouest et à l'est de haies brise-vent de cyprès. Le terrain se situe en contrebas du versant sud de la costière de Nîmes. Le dénivelé est d'environ 20 m de haut sur une distance de 400 m. La topographie des parcelles accuse une très légère pente (entre 5m d'altitude pour le point le plus haut et 1m pour le point le plus bas). Un canal, constitué d'une digue d'environ 4-5m se situe en contrebas (fig 3.1a et b).

Sur les deux parcelles de pommiers tous les fruits sont comptés arbre par arbre. Quant aux abricotiers, ils sont (à l'exception de ceux proches de la haie) dépourvus de fruits.



a) croquis en plan



b) profil longitudinal

Fig 3.1 a et b : Localisation et topographie des parcelles expérimentales dans le secteur de Bellegarde (Gard).

Sur la parcelle d'abricotiers, la quasi-totalité des fruits est détruite. Du fait de sa floraison précoce - "*fleur ouverte*" à la mi-février pour la variété *Lambertin n°1* -, les jeunes organes végétaux sont très sensibles au gel, notamment au début du printemps. Au cours de la gelée du 14 avril 1998, la lutte antigel par aspersion sous frondaison se révèle inopérante. Le système est en effet efficace jusqu'à  $-2^{\circ}\text{C}$ , au-dessous, les calories dégagées par la prise en glace du sol sont insuffisantes pour entraîner la remontée des températures (Charton *et al*, 1998). Cependant, d'après l'arboriculteur de cette exploitation, quelques fruits ont pu être récoltés sur les arbres proches de la haie de cyprès.

Les deux parcelles de pommiers montrent une assez grande similitude dans la répartition du gel (fig 3.2). Dans l'axe de la largeur des parcelles (NNE-SSO), les arbres les plus touchés (0 fruits) se situent au milieu des premiers rangs. Les arbres proches des haies sont assez chargés en fruits (50-80 fruits) mais plus on se dirige vers le milieu du rang, moins il y en a. Cette répartition hétérogène sur le rang se retrouve à l'échelle de l'arbre. Les arbres en bout de rang ont une charge de fruits comparable sur toute leur hauteur, alors que les autres ont très peu de fruits sur la partie basse. Par exemple, au milieu du premier rang, les arbres n'ont pas de fruits sur les branches situées en-dessous de 1.50m (fig 3.3a). Dans l'axe de la longueur (ONO-ESE), les arbres situés vers l'amont de la parcelle ont plus de fruits, ce qui signifie une intensité moindre du gel. A partir des 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> rangs, tous les arbres ont des fruits. Sur les derniers rangs, la charge par arbre est supérieure à 50 fruits (fig 3.3b).

En fonction de ces observations, nous émettons des hypothèses pouvant expliquer la variabilité spatiale des dégâts. Tout d'abord, les conditions radiatives provoquent de fortes déperditions énergétiques et donc, la formation d'air froid au niveau du sol. La topographie du site génère un écoulement de cet air le long de la pente, puis un ralentissement dans les zones de replat. La digue, située en contrebas, bloque les écoulements, générant ainsi la formation d'un véritable lac « *d'air froid* » qui s'étend sur les parcelles tout au long de la nuit. La limite d'extension de cette masse d'air froid est, d'après les observations agronomiques, visible sur les parcelles en amont de la digue. Il semble que les abricotiers situés juste derrière la digue, ainsi que les premiers rangs de pommiers, aient été partiellement recouverts par la couche d'air froid sur une hauteur dépassant la moitié des arbres (ex : au premier rang des pommiers, peu de fruits ont été observés dans la partie basse de l'arbre). Plus on s'éloigne de la digue, plus l'épaisseur du « *lac d'air froid* » diminue. La topographie du site et la digue, responsables des phénomènes d'écoulement et de blocage de l'air, apparaissent comme la cause de la variation de gradient dans la direction ONO-ESE.

La disparité de gradient dans le sens NNE-SSO peut s'expliquer par la présence des haies. Les brise-vent, par leur position, ne bloquent pas l'air qui s'écoule de long de la pente. Bien au contraire, ils limitent les déperditions énergétiques en interceptant et en réémettant le rayonnement infrarouge émanant de la surface. D'après les résultats de l'expérimentation météorologique, la zone de réflexion du rayonnement infrarouge par la haie génère un gain thermique d'environ  $1^{\circ}\text{C}$  sur une distance de 0 à 2 fois la hauteur de la haie de part et d'autre de chaque brise-vent. Pour cet exemple, nous ne disposons pas de données de températures prouvant cette hypothèse. Cependant, le nombre de fruits par arbre est plus important à proximité des haies par rapport au centre de la parcelle. Même si le nombre de fruits moyen

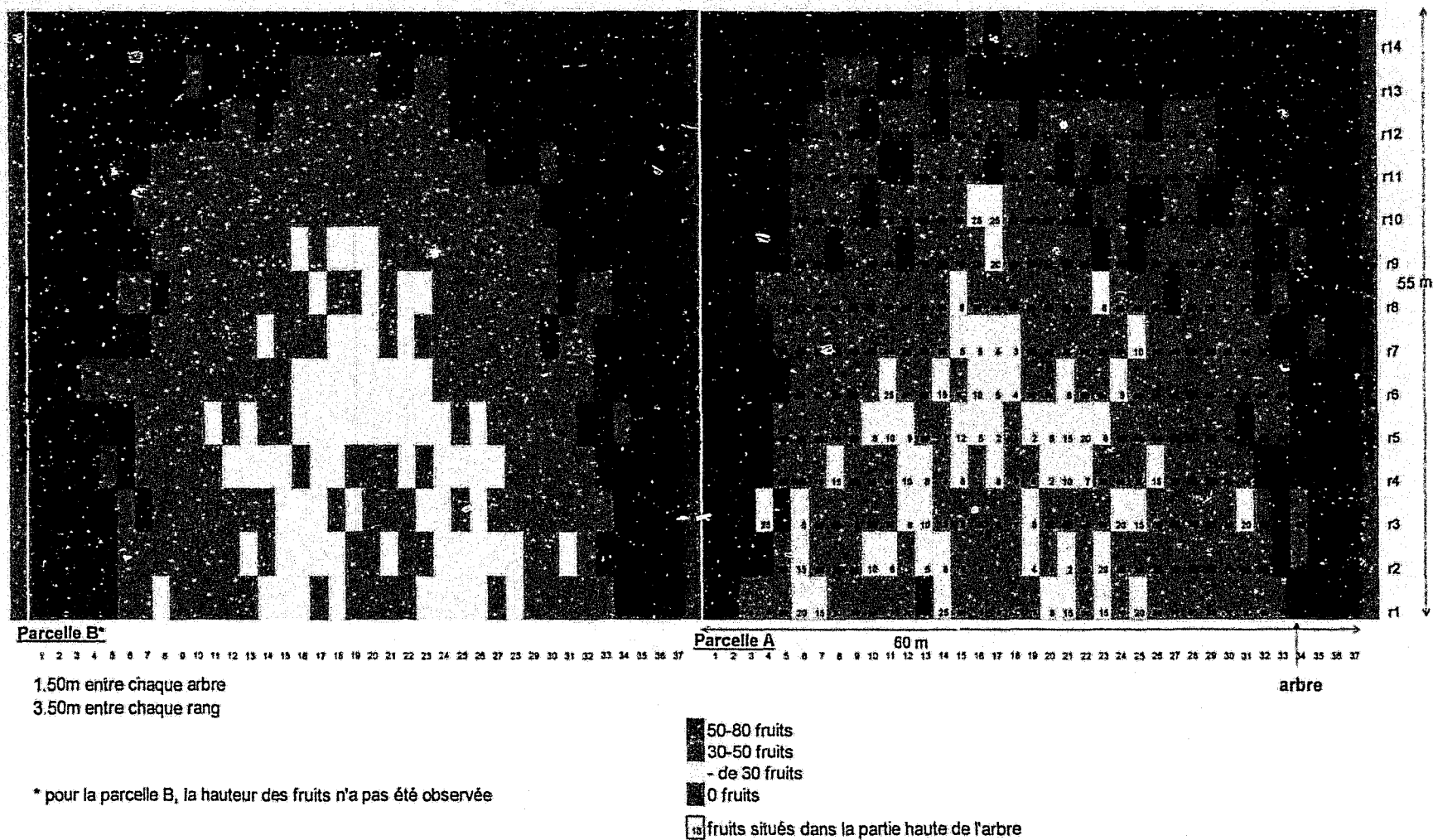


Fig 3.2 : Répartition des dégâts dus au gel sur deux parcelles de pommiers dans une exploitation arboricole de Bellegarde (Gard) (observation des fruits réalisée à la fin du printemps 1998).

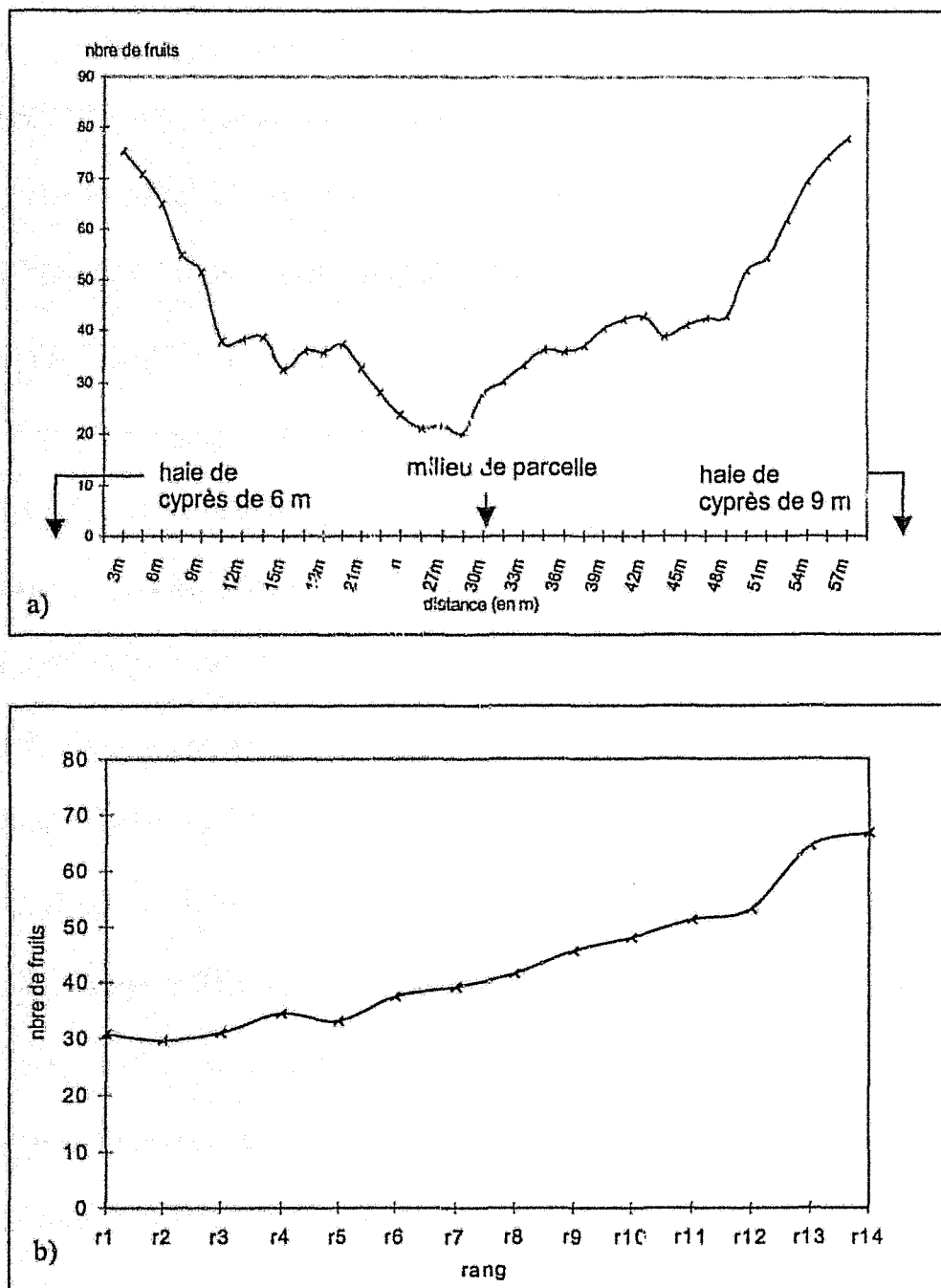


Fig 3.3 : Nombre moyen de fruits sur la parcelle B (contrôles réalisées les 28/29 août 1998)  
 : profil ONO-ESE  
 : profil NNE-SSO.

des arbres à proximité des haies est supérieur à 50 fruits, les arbres fruitiers ont quand même souffert du gel. Sans éclaircissage, la charge théorique devrait être aux alentours de 150-200 fruits (Ctifl, 1991).

L'observation des fruits est un très bon moyen pour évaluer l'intensité d'une gelée. Le végétal retranscrit très finement la variabilité spatiale du gel. Dans cet exemple, même si nous ne disposons pas de données météorologiques, la répartition des dégâts met en évidence l'action combinée de la digue (blocage des écoulements d'air froid) et des haies brise-vent (réflexion du rayonnement infrarouge).

## 1.2 Contrôle sur fruits combiné à des données météorologiques à l'échelle microclimatique

Au printemps 1999, peu de dégâts dus au gel sont constatés sur les cultures fruitières dans la basse vallée de la Durance. Les gelées se sont produites principalement au mois de mars (nuits du 23 au 24, du 29 au 30 et du 30 au 31 mars 1999). A cette période, le stade phénologique des poiriers et des pommiers entre à peine en phase de floraison et le végétal résiste encore à des températures négatives assez basses ( $-4^{\circ}\text{C}$  en moyenne). Toutefois, certaines plantations de variétés à floraison précoce ont subi des dommages.

Contrairement à l'exemple précédent, la difficulté de cette étude vient du fait que la parcelle a subi plusieurs épisodes gélifs de types distincts. De plus, certains rangs sont protégés par un système antigel (aspersion sous frondaison<sup>17</sup>). Ici, l'observation des fruits ne suffit pas pour définir les divers facteurs qui ont influencé la répartition du gel sur cette parcelle. Il est indispensable d'associer d'autres données (météorologiques, suivi agronomique avant le gel, ...).

L'objectif de cette étude est de démontrer que l'association entre des relevés météorologiques et une observation minutieuse des fruits permet de déterminer les secteurs à risque gélif à une échelle très fine.

### Protocole expérimental

Cette expérimentation se situe sur une parcelle de poiriers Harrow Sweet<sup>cov</sup> (n°12 annexe 5) au sud de la LGV sur la commune de Mallemort. Cette variété a la particularité d'avoir une floraison très précoce, ce qui la rend très vulnérable au gel dès le début du printemps.

- Situation géographique et agronomique

La parcelle, bordée au sud-est et au nord-ouest de deux haies brise-vent, est subhorizontale (pente environ 1%). Lors de situations atmosphériques propices, elle est

<sup>17</sup> Ce système antigel consiste à pulvériser de l'eau sur la sol. La prise en glace du substrat libère des calories qui limitent le refroidissement nocturne. Cette technique a l'avantage de ne pas recouvrir le végétal de glace mais son efficacité est assez limitée.



soumise à des arrivées d'air froid dues à la présence d'une pente plus forte au sud (collines du Pas des Lanciers). Les haies ne sont pas perpendiculaires aux écoulements gravitaires, mais elles peuvent toutefois les ralentir. Au printemps 1999, les risques de gel sont accentués par le voisinage immédiat d'un champ de blé en amont (fig 3.4). Cette masse végétal favorise le refroidissement par évaporation. Ces différentes caractéristiques définissent ce secteur comme étant très gélif en situation radiative et il est l'un des plus froids de l'aire d'étude.

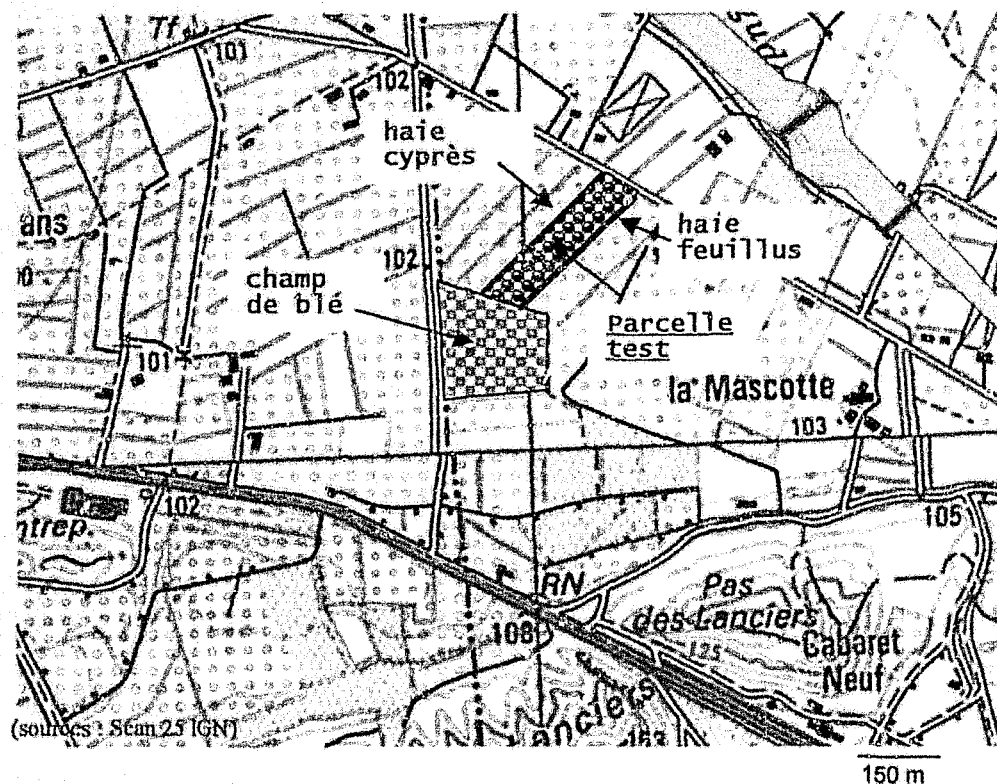


Fig 3.4: Environnement à proximité de la parcelle expérimentale.

Les poiriers Harrow Sweet cultivés ici ont une floraison précoce par rapport aux autres variétés. A la fin du mois de mars, le végétal est en fin de floraison, c'est-à-dire entre le stade de la chute des pétales et de la nouaison. Les seuils de sensibilité au gel relevés dans la bibliographie divergent en fonction des auteurs (Flekinger, 1948 ; Baggiolini, 1952) mais en moyenne la température à risque se situe en dessous de  $-2^{\circ}\text{C}$ . Le stade phénologique n'étant pas homogène sur toute la parcelle, il est donc important d'étudier ce facteur à une échelle très fine. En effet, « l'apport énergétique solaire est amoindri sur une partie de la parcelle parce que les haies limitent l'ensoleillement dans la zone d'ombre, par contre elles l'augmentent par réflexion dans la zone exposée au soleil » (Soltner, 1994). Dans le secteur ombragé, on peut remarquer un retard de 3 jours de la végétation. La période de floraison s'étalant sur 2-3 jours, les seuils de résistance au gel varient très fortement sur une petite période. Le 22 mars 1999, les arbres situés au sud-est de la parcelle sont en pleine floraison (100% fleurs ouvertes) alors que ceux à l'autre extrémité perdent leurs pétales depuis deux ou trois jours (fin de floraison). A ces deux stades phénologiques, les seuils critiques sont similaires (tab 3.1). Au cours de la gelée, dans la nuit du 30 au 31 mars 1999, une majeure partie des arbres est en début de

formation du fruit alors que quelques uns sont encore dans la phase "fin de chute des pétales". En début de nouaison, le seuil critique est de  $-1^{\circ}\text{C}$  tandis qu'au moment de la chute des pétales, il est de  $-1.5^{\circ}\text{C}$  (cf fig 1.9). Plus la croissance de l'organe floral avance, plus sa vulnérabilité au froid augmente rapidement. Dans le cas d'une gelée intense, ces variations peuvent avoir des conséquences diverses sur le végétal (chute ou déformation du fruit). Il ne faut pas négliger les éventuelles chutes de fruits dans le protocole de comptage car si une partie des fruits est tombée, les résultats peuvent être erronés. L'autre précaution à prendre concerne les stades phénologiques. La résistance au gel diffère selon les espèces fruitières mais aussi selon les variétés.

|                      | SE de la<br>parcelle | NO de la<br>parcelle | $T^{\circ}\text{C}$ critique<br>(d'après Ctifl) | 10% dégâts<br>(d'après Ctifl) | 90% dégâts<br>(d'après Ctifl) |
|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Début de floraison   | 16/03                | 14/03                | $-2^{\circ}\text{C}$                            | $-2,8^{\circ}\text{C}$        | $-5^{\circ}\text{C}$          |
| 100% fleurs ouvertes | 22/03                | 20/03                | $-2^{\circ}\text{C}$                            | $-2,2^{\circ}\text{C}$        | $-4,4^{\circ}\text{C}$        |
| Chute des pétales    | du 21/03<br>au 26/03 | du 19/03<br>au 24/04 | $-1,5^{\circ}\text{C}$                          | $-2,2^{\circ}\text{C}$        | $-4,4^{\circ}\text{C}$        |
| Début nouaison       | 02/04                | 29/03                | $-1^{\circ}\text{C}$                            | *                             | *                             |

Tab 3.1 : Variabilité spatiale des dates de floraison et des seuils de sensibilité au gel sur la parcelle Harrow Sweet<sup>cov</sup> aux cours des trois nuits analysées (23-24/03, 29-30/03 et 30-31/03).

#### • Protocole d'étude

Sur la parcelle, quatre capteurs de température sont installés aux extrémités des rangs 3 et 9 (fig 3.5). Ces points de mesures n'ont pas été choisis dans le cadre de cette étude mais dans celui d'une expérimentation sur l'utilisation de l'aspersion sous frondaison comme système de lutte contre le gel (ARDEPI, 1999). Nous verrons, aux vues des résultats, que deux capteurs de température supplémentaires auraient été nécessaires au milieu de la parcelle. Nous disposons également des mesures météorologiques réalisées à l'échelle *mésocale*.

Au cours de ces gelées, les températures, en descendant juste en dessous du seuil de sensibilité des poiriers Harrow Sweet, génèrent des dégradations visibles principalement à l'aspect du fruit. Généralement, en fin de floraison et même en début de nouaison, une forte gelée atteint le cœur du fruit et entraîne sa chute (exemple précédent sur la Costière de Nîmes). Mais ici, le gel n'atteint que superficiellement le végétal. Les fruits, en début de formation, subissent un dessèchement de l'épiderme caractérisé par des taches "liégeuses" sur la cuvette oculaire (cf photo 1a, b et c). Dans ce cas, ce n'est pas seulement le nombre total de poires arrivant à maturité qui nous intéresse mais le pourcentage de fruits abîmés par arbre. Sur les 11 rangs de la plantation, 9 sont contrôlés. Bien que les rangs 3 et 10 échappent à l'observation - ceux-ci ayant été éclaircis, nous courrions le risque de fausser les résultats - les fruits de la majorité des arbres (entre 40 et 60 par rang) sont comptés de manière exhaustive. Le nombre de poires endommagées variant considérablement d'un côté à l'autre

du rang, les résultats de l'observation du végétal sur la face sud-est (haie de feuillus) et sur la face nord-ouest (haie de cyprès) sont séparés.

Au cours des deux premières nuits de gel, les rangs 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 11 sont protégés par l'aspersion sous frondaison. Par contre, la nuit du 30 au 31 mars, le système de lutte antigel n'est pas déclenché (fig 3.5).

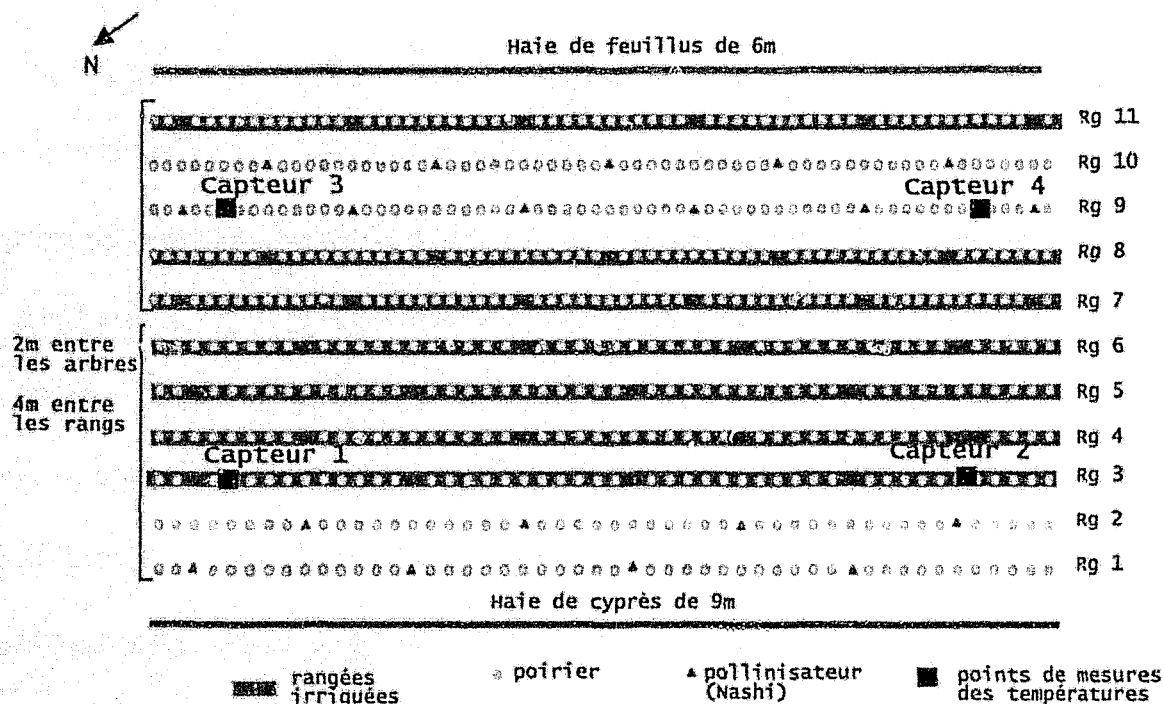


Fig 3.5 : Répartition des arbres fruitiers et des instruments de mesures sur la parcelle expérimentale.

### Résultats et hypothèses

- Cas d'un arrêt de mistral

Lors de la nuit du 23 au 24 mars 1999, le refroidissement responsable de la gelée est dû à un arrêt de mistral vers 00h00. En début de nuit, tant que le vent souffle, un brassage d'air restreint le rafraîchissement (cf fig 2.78). Entre 19h30 et 00h00, la température baisse de 3°C. Mais, aussitôt que le vent ralentit (après 00h00), la chute de la température est importante et rapide (baisse de 3°C en 1/2 heure) puis plus régulière (-8°C en 6h30). Dès l'arrêt du vent, la combinaison de l'air froid ambiant et des pertes radiatives entraîne une baisse considérable des températures, accentuée par une forte évaporation. A partir du moment où l'air est saturé en eau, le refroidissement d'origine radiatif est régulier jusqu'au lever du soleil. Nous constatons que certains points de mesures qui, lors d'un gel radiatif, font partie des plus froids, comptent ici parmi les plus chauds. C'est le cas, notamment, du capteur proche de la parcelle test (fig 2.79). En résumé, on peut affirmer que dans tous les secteurs où le mistral cesse tardivement (secteur peu abrité), la période de refroidissement purement radiatif qui s'étend de l'arrêt du vent au lever du jour est plus courte ; la chute de la température est donc restreinte.

### Partie 3 : Validation des mesures météorologiques à partir de l'observation des cultures

Sur la parcelle expérimentale, la température est descendue jusqu'à  $-2.7^{\circ}\text{C}$  sur le rang "témoin" (capteurs 3 et 4) et jusqu'à  $-2.2^{\circ}\text{C}$  sur le rang sous l'aspersion (capteurs 1 et 2). Les deux capteurs situés à chaque bout du rang témoin donnent le même profil de températures durant toute la nuit (fig 3.6a et tab 3.2). Ici, on peut regretter l'absence de capteur en milieu de rang, dans la zone protégée du vent où la température a été probablement plus basse que dans les secteurs non abrités.

Au cours de la nuit du 29 au 30 mars 1999, la situation atmosphérique est similaire. Il s'agit également d'un arrêt de mistral mais intervenant plus tôt (vers 22h30). Cet élément joue un rôle particulièrement important sur les variations de températures. Nous observons un écart thermique supérieur à  $1^{\circ}\text{C}$  entre la rangée protégée par l'aspersion et la rangée non protégée. Mais contrairement à l'exemple précédent, la température du point 3 est plus basse que celle du point 4, notamment en fin de nuit. Le mistral cessant de souffler assez tôt, les déperditions énergétiques génèrent au niveau du sol de l'air froid qui s'écoule par gravité le long de la pente et stagne surtout dans la partie basse de la parcelle (fig 3.6b). Les mesures de direction des écoulements montrent assez bien les arrivées d'air froid vers la plantation.

|                                                                       | Point 1                | Point 2                | Point 3                 | Point 4                |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Nuit 23-24/03/99 (arrêt de mistral)                                   | protégé                | protégé                | Non protégé             | Non protégé            |
| $T^{\circ}\text{C mini}$                                              | $-1,8^{\circ}\text{C}$ | $-1,8^{\circ}\text{C}$ | $-2,7^{\circ}\text{C}$  | $-2,7^{\circ}\text{C}$ |
| période de $T^{\circ}\text{C}$ négative                               | 4h                     | 4h                     | 4h30                    | 4h25                   |
| période de $T^{\circ}\text{C}$ critique ( $<-1,6^{\circ}\text{C}$ )   | 0h20                   | 0h20                   | 2h00                    | 1h50                   |
| période de $T^{\circ}\text{C}$ 10% dégâts ( $<-2,2^{\circ}\text{C}$ ) | 0h00                   | 0h00                   | 0h30                    | 0h30                   |
| Nuit 29-30/03/99 (arrêt de mistral)                                   | protégé                | protégé                | Non protégé             | Non protégé            |
| $T^{\circ}\text{C mini}$                                              | $-0,6^{\circ}\text{C}$ | $-0,6^{\circ}\text{C}$ | $-1,8^{\circ}\text{C}$  | $-1,4^{\circ}\text{C}$ |
| période de $T^{\circ}\text{C}$ négative                               | 4h                     | 3h                     | 4h50                    | 4h40                   |
| période de $T^{\circ}\text{C}$ critique ( $<-1,1^{\circ}\text{C}$ )   | 0h                     | 0h                     | 1h40                    | 1h30                   |
| Nuit 30-31/03/99 (radiatif)                                           | Non protégé            | Non protégé            | Non protégé             | Non protégé            |
| $T^{\circ}\text{C mini}$                                              | $-1,8^{\circ}\text{C}$ | $-1,4^{\circ}\text{C}$ | $-2, .^{\circ}\text{C}$ | $-1,8^{\circ}\text{C}$ |
| période de $T^{\circ}\text{C}$ négative                               | 4h40                   | 4h                     | 5h00                    | 4h50                   |
| période de $T^{\circ}\text{C}$ critique ( $<-1^{\circ}\text{C}$ )     | 1h30                   | 0h30                   | 3h10                    | 2h10                   |

Tab 3.2 : Période durant laquelle la température critique pour les organes végétaux a été atteinte et dépassée lors des trois épisodes gélifs.

La nuit du 23 au 24 mars, le seuil critique ( $T < -1.6^{\circ}\text{C}$ ) est atteint aux points de mesures 3 et 4 (non protégés), pendant près de deux heures. On se situe pendant 30 minutes au-dessous de la valeur théorique  $-2.2^{\circ}\text{C}$  qui suggère une dégradation de 10% des fleurs ou fruits. Le 30 mars, le seuil critique ( $T < -1^{\circ}\text{C}$  pour stade nouaison) est franchi pendant 1h30 sur les deux points mais la limite "10% de dégâts" n'est pas atteinte. En résumé, on peut supposer que s'il y a eu des dégâts, ils se sont produits principalement la première nuit et sur les rangs non protégés. Mais, il faut aussi prendre en compte l'absence de capteur disposé dans les secteurs de la parcelle en principe les plus froids. Dans les zones protégées du vent, les températures sont sûrement descendues plus bas, d'où un risque accentué pour le végétal.

Partie 3 : Validation des mesures météorologiques à partir de l'observation des cultures

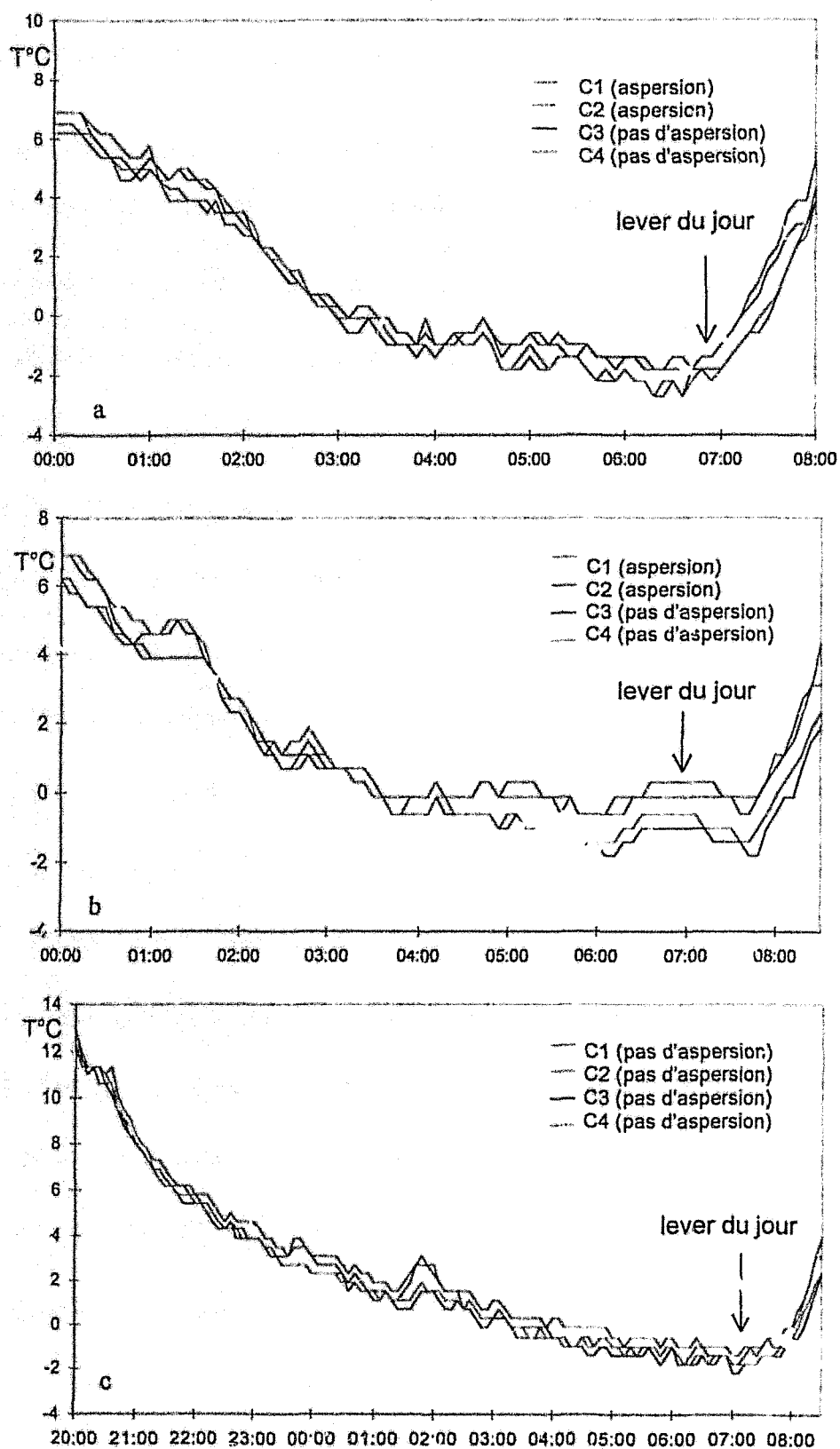


Fig 3.6 : Evolution des températures nocturnes sur la parcelle expérimentale au cours des nuits gélives du 23-24/03/1999 (a), du 29-30/03/1999 (b) et du 30-31/03/1999 ; mesures toutes les 6 mn.

- Cas d'une nuit anticyclonique

Au cours de la nuit du 30 au 31 mars 1999, le refroidissement est d'origine radiative. Au début de la nuit, comme l'air n'est pas saturé, la phase d'évaporation provoque une chute rapide des températures (baisse de 4°C entre 20h30 et 21h30). Ensuite, le refroidissement est plus progressif jusqu'au matin (-8°C en 9h). La répartition des températures en cas de refroidissement par rayonnement s'établit en fonction du déplacement de l'air. Ainsi, les températures relevées sur un replat ou derrière un obstacle sont plus basses que celles en zone dégagée ou en pente. La situation géographique de la parcelle test la définit comme un des secteurs les plus froids (cf fig 2.61). Durant cette nuit, l'aspersion n'est pas déclenchée, ce qui permet d'avoir des conditions assez similaires sur tout le terrain. Dans l'axe nord-ouest/sud-est, les températures du rang 3 sont moins froides que celles du rang 9 (fig 3.5). La durée de gel est aussi nettement moins importante sur le rang 3 (fig 3.6c et tab 3.2). L'hypothèse d'un blocage de l'air froid par la haie de cyprès n'est pas vérifiée puisqu'il fait plus chaud sur le rang proche du brise-vent. Cela peut être expliqué par les hypothèses suivantes :

- tout d'abord, la haie de cyprès n'étant pas perpendiculaire aux écoulements gravitaires, l'air froid peut continuer à glisser ;
- sous les rangs ayant subi la protection par aspersion la nuit précédente, la terre est mouillée sur une profondeur de plus de 10cm. La chaleur disponible dans le sol est restituée plus facilement lorsqu'il est humide que lorsqu'il est sec. C'est la couverture du sol et l'état de la structure superficielle qui induisent la variabilité spatiale de la restitution de chaleur ;
- la haie de cyprès, de par sa position par rapport au soleil, génère des conditions énergétiques favorables pour les premiers rangs. D'ailleurs, on constate des différences de stade phénologique du végétal sur la parcelle. D'une part, le capital énergétique emmagasiné de ce côté de la parcelle par le sol et les végétaux et d'autre part, la réémission du rayonnement infrarouge induisent les différences de températures entre les deux rangs.

Les mesures de directions d'écoulement démontrent que les écoulements gravitaires se dirigent vers la haie de cyprès. Même si celle-ci n'est pas disposée face aux arrivées d'air froid, un ralentissement des écoulements semble probable en amont de la haie. Cependant, les relevés de température ne l'indiquent pas. Même s'il y a une disparité dans l'état du sol (sol humide et sec), l'air froid descendant le long de la pente s'est formé en amont et les quelques rangs plus humides ne peuvent pas faire varier autant la température. Dans cette situation, soit l'important apport énergétique dû à la position de la haie par rapport au soleil est un facteur primordial limitant le refroidissement nocturne devant le brise-vent, soit la disposition des capteurs (en bordure de rang) ne reflète pas correctement le comportement des températures sur la totalité de la parcelle, notamment en milieu de rangée. Dans ce cas, l'observation des fruits gelés est un excellent moyen de contrôle.

Dans l'axe nord-est/sud-ouest, la situation est comparable à celle observée au cours de la nuit du 29 au 30 mars 1999. La température est plus faible dans la partie basse de la parcelle (fig. 3.6c et tab. 3.2 ).

Le seuil de résistance au gel du végétal ( $T < -1^{\circ}\text{C}$  pour stade nouaison) est atteint et dépassé sur tous les points de mesures. Mais les capteurs du rang 9 laissent apparaître une période de danger beaucoup plus importante (entre 02h10 et 03h10 pour le rang 9 et entre

30mn et 01h30 pour le 3). Le risque de dégradation semble être une nouvelle fois supérieur sur le rang 9. Cependant, la température n'est pas le seul paramètre qui entre en jeu car il y a aussi l'état de croissance du végétal.

#### • Contrôle sur fruits

Les observations agronomiques ont eu lieu au début du mois de mai, période où les anneaux liégeux sont visibles sur les poires. Sur la parcelle, l'ensemble des arbres ont des fruits abîmés. La floraison très précoce de la variété Harrow Sweet implique une sensibilité au gel dès la mi-mars alors que la plupart des poiriers et des pommiers ne sont sensibles aux basses températures qu'à partir du mois d'avril. D'ailleurs, le verger voisin, pourtant situé en zone de blocage d'air froid, n'a subi aucun dégât. Il s'agit de pommiers Granny Smith dont la période de floraison est plus tardive (vers le 8 avril, cette année-là).

En moyenne, 15% des fruits par arbre sont abîmés. Comme on pouvait s'en douter, le pourcentage de poires gelées est plus important sur les rangées non protégées par l'aspersion. La part de fruits détériorés varie radicalement d'un arbre à l'autre (tab 3.3). Certains arbres ont moins de 5% de pertes, alors que d'autres en ont plus de 40%. La répartition des zones les plus froides est compliquée à évaluer du fait des rangs tests, protégés par le système antigel. Il apparaît malgré tout que les endroits les plus gelés se trouvent en milieu de rang et qu'ils ne forment pas pour autant une zone homogène sur toute la parcelle : celle-ci s'accroît plus on se rapproche de la haie de cyprès. Par exemple, les arbres les plus touchés du rang 9 (entre 20 et 40% de fruits abîmés) sont concentrés sur un secteur d'une vingtaine de mètres (arbre n°37 au n°49), tandis que ceux du rang 1, s'étendent sur plus de 60m (fig 3.7a). Les bords de parcelle sont les mieux préservés. A l'exception de quelques cas particuliers, les dégâts des 5 premiers arbres de chaque extrémité du rang sont, en général, inférieurs à 15%. Plus on s'avance vers le centre du rang, plus les dégâts sont considérables. Ces constatations semblent être valables pour tous les rangs. Ainsi, sur ceux protégés par l'aspersion, même si c'est moins flagrant, les dommages les plus importants sont également en milieu de rangée.

|                      | moyenne<br>de fruits/arbre | moyenne<br>de fruits gelés/arbre |    |    | % de fruits gelés/arbres |    |    | Ecart<br>type |
|----------------------|----------------------------|----------------------------------|----|----|--------------------------|----|----|---------------|
|                      |                            | Tt                               | NW | SE | Tt                       | NW | SE |               |
| Rang 1               | 151                        | 30                               | 8  | 22 | 20                       | 14 | 22 | 15            |
| Rang 2               | 169                        | 30                               | 11 | 19 | 18                       | 15 | 19 | 15            |
| Rang 4               | 170                        | 25                               | 11 | 14 | 15                       | 13 | 16 | 14            |
| Rang 5               | 170                        | 22                               | 9  | 14 | 13                       | 11 | 14 | 15            |
| Rang 6               | 163                        | 21                               | 8  | 13 | 12                       | 11 | 13 | 11            |
| Rang 7               | 144                        | 21                               | 8  | 13 | 14                       | 12 | 16 | 11            |
| Rang 8               | 136                        | 15                               | 7  | 9  | 10                       | 10 | 13 | 10            |
| Rang 9               | 165                        | 34                               | 14 | 19 | 20                       | 17 | 23 | 17            |
| Rang 11              | 144                        | 22                               | 8  | 14 | 15                       | 12 | 19 | 10            |
| Ensemble<br>parcelle | 157                        | 24                               | 9  | 15 | 15                       | 13 | 17 | 13            |

Tt = total ; NW = fruits exposés au nord-ouest ; SE = fruits exposés au sud-est

Tab 3.3 : Statistiques sur la proportion de fruits gelés de la parcelle Harrow Sweet après les gelées printanières de 1999 (mai-juin 1999).



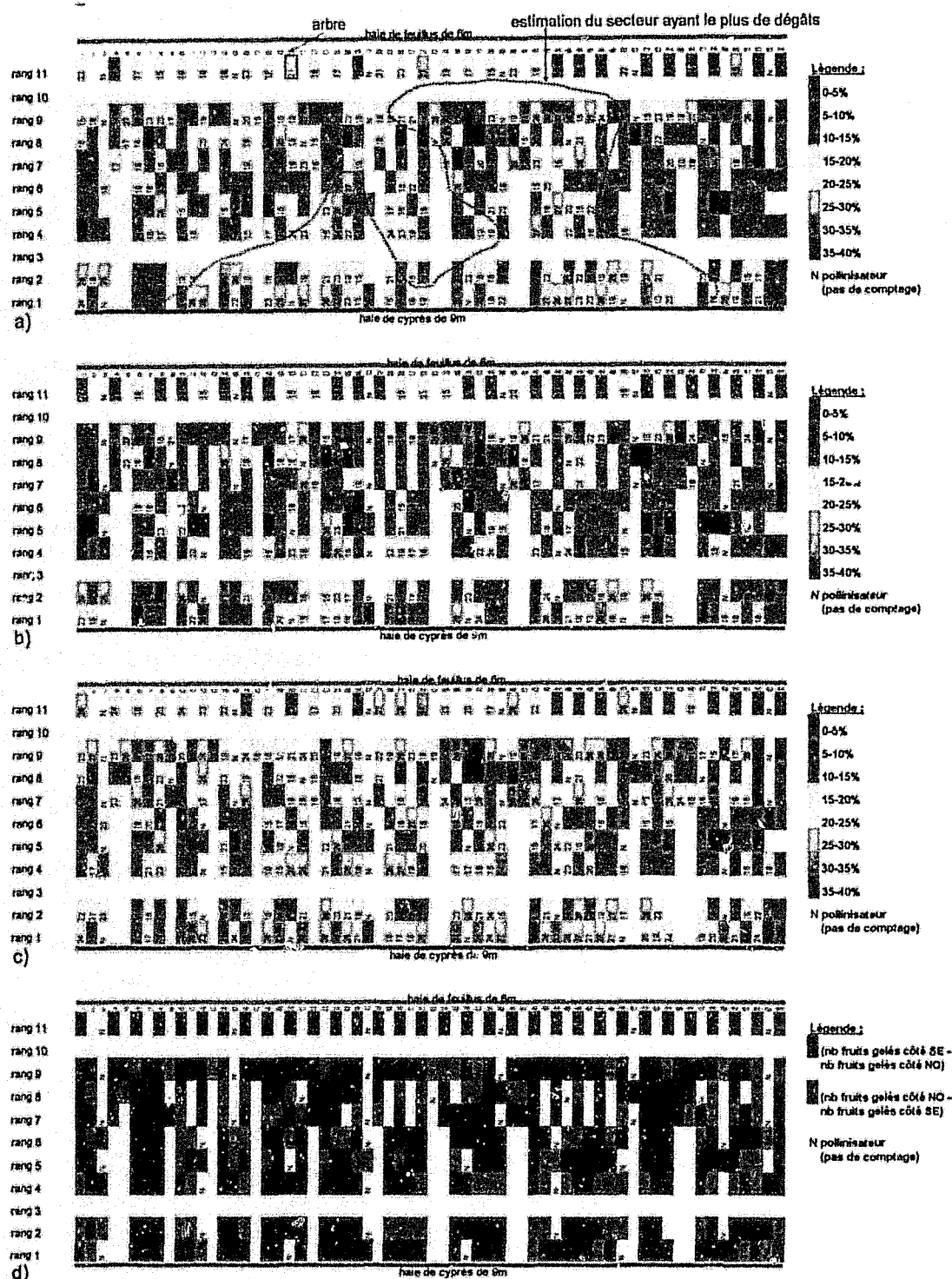


Fig 3.7 : Répartition des dégâts provoqués par le gel sur la parcelle expérimentale de Harrow (analyse réalisée en mai 1999).

a : pourcentage de fruits gelés par arbre.

b : pourcentage de fruits gelés par arbre observé du côté nord-ouest du rang.

c : pourcentage de fruits gelés par arbre observé du côté sud-est du rang

d : différence de pourcentage de fruits gelés entre la partie sud-est et la partie nord-ouest du rang.



### Partie 3 : Validation des mesures météorologiques à partir de l'observation des cultures

Au cours du contrôle sur fruits, les résultats obtenus de chaque côté des rangs sont traités séparément parce que les branches orientées vers le sud-est ont proportionnellement beaucoup plus souffert que celles orientées vers le nord-ouest (fig 3.7b, c et d).

En résumé, les caractéristiques de la répartition des fruits gelés sur cette parcelle sont les suivantes :

- c'est au milieu des rangs que la proportion d'arbres ayant subi d'importants dégâts est la plus grande et en bordure qu'elle est la plus faible. Les dommages sont d'autant plus importants que la rangée est proche de la haie de cyprès ;
- les rangées protégées par l'aspersion sous frondaison sont un peu moins touchées que les autres ;
- le pourcentage de fruits abîmés est plus fort sur les côtés sud-est que sur le côté nord-ouest de l'arbre.

On remarque aussi quelques cas particuliers de certains poiriers très endommagés en côtoyant d'autres peu gelés pour des raisons inexpliquées.

La répartition des dégâts est issue de la combinaison de plusieurs épisodes gélifs de types différents. Tout d'abord, au cours des gelées avec arrêt de mistral, on relève les températures les plus froides dans les endroits protégés du vent par la haie de cyprès. C'est le cas, en dehors des bordures de rang, de la majeure partie de la parcelle. Dans le cas du gel de rayonnement, l'air froid en provenance des collines situées au sud et au sud-sud-est de la plantation s'écoule le long de la pente et pénètre sur la parcelle. Il est difficile de dire quel épisode gélif a été le plus néfaste pour le végétal, mais nous remarquons qu'à chaque fois, c'est dans le milieu des rangs qu'il a fait le plus froid (zone protégée du vent et secteur de ralentissement des écoulements d'air froid). Les arbres plantés en bordures de rangs ont bénéficié de l'arrêt tardif du mistral, donc d'une chute de la température atténuée et peut-être d'une durée d'exposition à l'air froid plus courte. Au nord-est de la parcelle, le refroidissement a été plus intense qu'au sud-ouest. Les écoulements gravitaires n'ont pas été freinés par des obstacles lorsqu'ils atteignent le sud-ouest de la parcelle, mais l'air froid, en s'engouffrant, est progressivement ralenti par les arbres fruitiers et la haie de cyprès (fig 3.8).

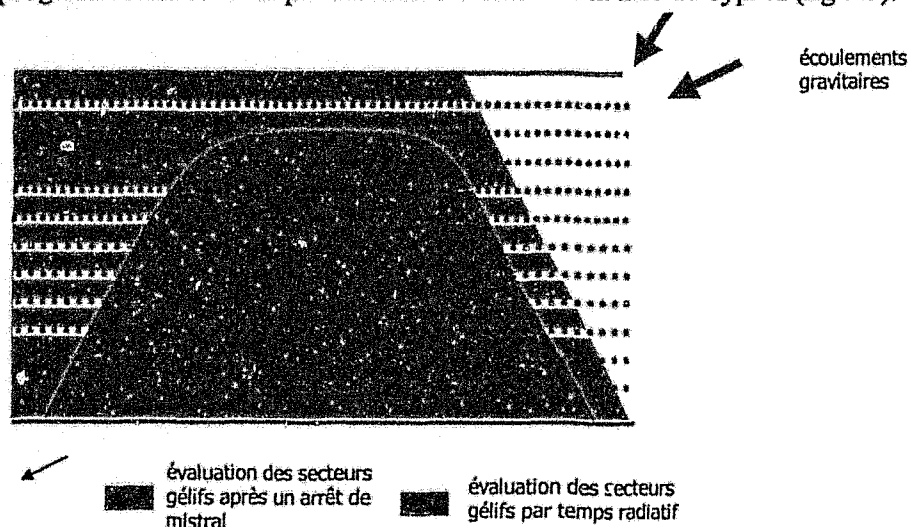


Fig 3.8 : Secteurs les plus gélifs de la parcelle Harrow Sweet en situations de gel radiatif et d'arrêt de mistral.

Pour les rangées protégées par l'aspersion sous frondaison, les résultats varient selon les secteurs de la parcelle. Certes, le pourcentage de fruits abîmés est moins important sur les rangs protégés. Mais certains arbres, notamment en milieu de rang, ont plus de 30% de dommages. Il est probable que dans les secteurs les plus gélifs, les températures à risque pour le végétal aient été atteintes pendant une longue durée et que la protection antigel se soit avérée insuffisante.

A une échelle plus fine, on remarque que l'état physiologique de l'arbre a probablement une influence. Par exemple, certains arbres très peu endommagés se trouvent dans un secteur très touché (arbre n°37 sur le rang 9).

Sur cette parcelle, comme sur celle de la Costière de Nîmes, les fruits gelés sont répartis de façon hétérogène. Mais cette disparité ne s'observe pas au même niveau ; dans l'exemple précédent, elle se situait entre le haut et le bas de l'arbre, ici, c'est entre ses côtés sud-est et nord-ouest (fig 3.7d). On remarque en effet une proportion plus grande de fruits gelés du côté sud-est du poirier que l'on retrouve sur 304 des 407 arbres. Apparemment, les fruits orientés sud-est sont les premiers exposés au lever du soleil. Il est probable qu'aux premiers rayons du soleil, un refroidissement par évaporation se caractérise par une baisse très rapide de la température, généralement fatale au végétal sensible et humide. L'interprétation la plus courante fait part *"d'une perturbation apportée par le lever du soleil qui peut favoriser des transferts convectifs de l'air amenant de l'air plus sec au contact des végétaux mouillés"* (Guyot, 1997). Après les mesures météorologiques à l'échelle microclimatique, nous posons la question de ce qui était le plus nuisible au végétal : une remontée rapide des températures impliquant une phase d'évaporation ou bien un réchauffement beaucoup plus lent supposant une période plus longue en dessous de 0°C? Cette expérimentation agronomique montre que l'action des premiers rayons du soleil sur le végétal humide et froid peut causer d'importants dommages. D'ailleurs, selon Lefèvre (1953) et Winterhalder (1978), *« l'exposition à l'ouest est considérée préférable à celle de l'est, car la brutale variation thermique causée par l'intense rayonnement solaire le matin peut produire des dégâts considérables sur les plantes gelées »*.

L'analyse du végétal, après un épisode gélif, est un moyen concret de visualiser l'influence des divers facteurs qui interviennent dans la baisse des températures. C'est aussi surtout une façon de valider les résultats obtenus grâce aux données météorologiques. L'étude agronomique permet, dans certains cas, d'apporter un complément d'informations sur des phénomènes que les mesures seules ne peuvent expliquer. Même si on définit des températures critiques sous lesquelles le végétal peut subir des dommages, il est impossible de savoir si un facteur interne à l'arbre fruitier ne va pas accentuer ou limiter le risque. L'exemple de l'influence du lever du soleil sur le gel des fruits démontre le rôle indispensable de l'analyse agronomique pour confirmer certaines hypothèses. Sachant qu'un réchauffement rapide après une nuit de gel est néfaste pour le végétal, on peut dès lors établir un protocole de mesures spécifiques en vue d'étudier plus en détail l'action des premiers rayons solaires puis de définir les secteurs à risque en fonction de ce facteur.

- Mesures sur le comportement des températures au lever du jour

En arboriculture, l'ombre générée par les haies brise-vent et par les arbres fruitiers eux-mêmes influe sur le comportement des organes fruitiers. Dans la partie la plus à l'ombre de la parcelle, les végétaux ont une croissance ralentie. En période gélive, les premiers arbres exposés au soleil font l'objet de dommages dus à une phase d'évaporation subite, d'où la nécessité de définir, sur la parcelle des poiriers Harrow Sweet (n°12), les secteurs ombragés au lever du jour afin de mettre en évidence les zones touchées en premier par les rayons du soleil. On constate qu'ici "l'effet de masque" est d'origine et d'échelles diverses. Tout d'abord, l'ombre de la haie de feuillus s'étend sur une grande partie de la parcelle. Puis, à une échelle plus fine, l'arbre fruitier fait lui-même écran aux premiers rayons du soleil. Le protocole de mesures a donc été mis en place dans le but d'étudier ces deux paramètres.

Etant donné les résultats du contrôle sur fruits, des capteurs de température sont disposés de chaque côté des rangs 1, 3, 5, 7, 9 et 11. Les points de mesures sont alignés sur un axe sud-est (haie de feuillus) – nord-ouest (haie de cyprès) et le pas de temps est de 10 secondes. L'objectif est d'observer le comportement des températures en fonction de l'arrivée des premiers rayons du soleil sur la parcelle et d'évaluer ainsi l'influence de la haie de feuillus et des poiriers eux-mêmes. Dès le crépuscule, un contrôle visuel de l'ensoleillement est réalisé sur les rangs toutes les dix minutes. Les premiers rayons du soleil visibles sur la parcelle apparaissent vers 06h40, c'est-à-dire plus de 30 minutes après le lever du jour (06h05). Dès les premières minutes, les rangs 1 à 7 sont ensoleillés et au bout de 20 minutes, les 10 premiers rangs sont soumis au rayonnement solaire direct. Par contre, le dernier rang (n°11) reste dans l'ombre pendant plus d'une heure et demi. Les températures augmentent au fur et à mesure que l'ombre portée de la haie diminue. Les relevés de chaque côté des rangs confirment également les différences thermiques entre la partie ensoleillée et la partie ombragée (fig 3.9).

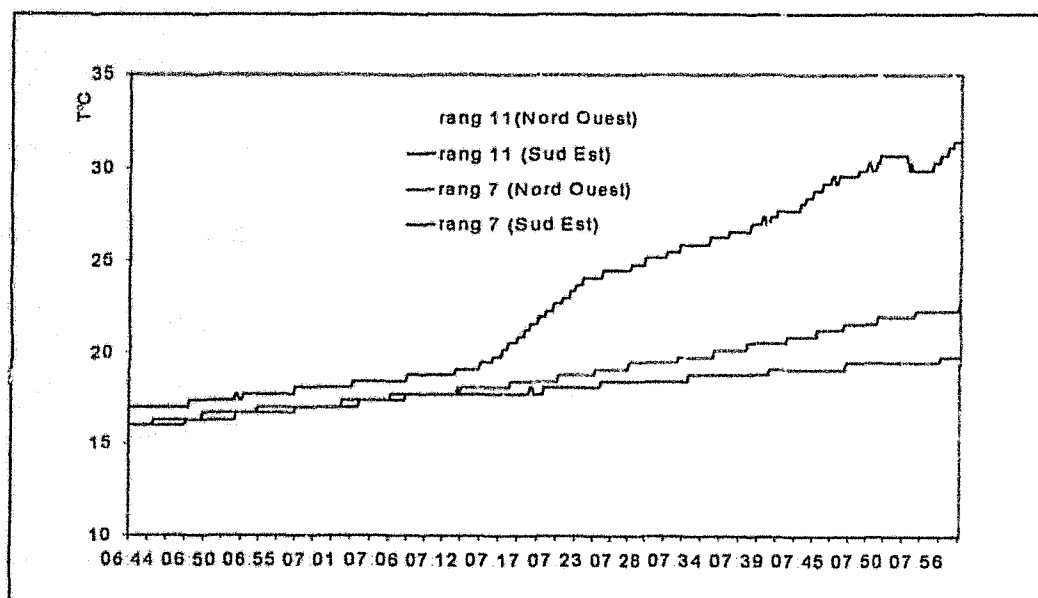


Fig 3.9 : Evolution des températures en fonction de la position du capteur météorologique par rapport au rayonnement solaire sur la parcelle expérimentale : données toutes les 10 s (04/07/99).

Au cours des gelées de mars 1999, la haie de feuillus n'avait pas encore de feuille ; son rôle d'écran était donc très faible. Nous le constatons avec l'analyse agronomique où le rang n°11 (derrière la haie) a subi plus de dégâts côté sud-est (fig 3.7d). Les arbres situés au nord-ouest des rangs ont évité le choc thermique provoqué par les premiers rayons du soleil grâce à l'ombre générée par les poiriers du rang voisin.

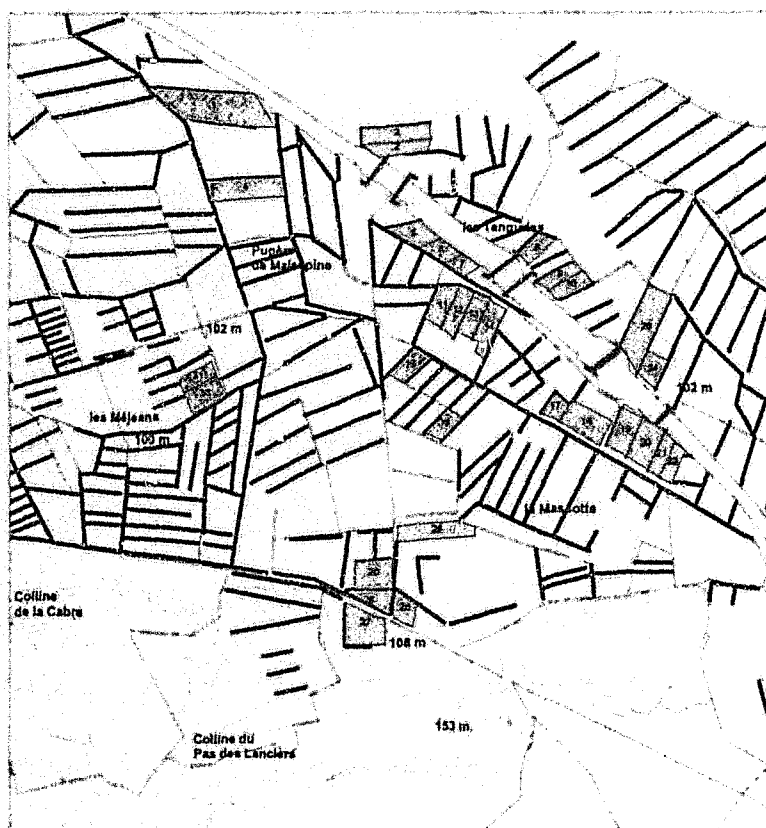
Dans cet exemple, l'expérimentation agronomique a permis de définir clairement les secteurs les plus gelés d'une parcelle. La validation des résultats des mesures météorologiques par les observations agronomiques est assez compliquée du fait des différents types de gel et des conditions de surface hétérogènes sur la parcelle (plusieurs rangées protégées par l'aspersion). Toutefois, le secteur ayant subi le plus de dommages -*milieu de parcelle*- correspond, assez bien, aux zones les plus froides définies lors des mesures météorologiques.

### 1.3 Contrôles sur fruits à l'échelle mésolocale et microclimatique : validation des mesures météorologiques et localisation du risque gélif

Durant le printemps 1998, nous avons assisté, dans le Sud Est de la France, à plusieurs gelées néfastes aux cultures fruitières. Au cours de la nuit du 22 au 23 mars 1998, un refroidissement de type radiatif induit une forte baisse des températures. Dans la basse vallée de la Durance, les plantations de pommiers et de poiriers, pourtant à un stade de développement peu sensible au gel, essuient d'importants dommages. Immédiatement après cet épisode, un contrôle des bourgeons et des fleurs est réalisé sur plusieurs parcelles du site (secteur défini pour l'étude d'impact climatique de la LGV). L'objectif est d'étudier la variabilité spatiale du gel dommageable (et non plus seulement des températures minimales) aux échelles *mésolocale* et *microclimatique* afin d'évaluer l'influence des divers éléments du milieu (ex : remblai et haies brise-vent).

#### L'expérimentation

Les points de mesures météorologiques utilisés sont ceux mis en place pour déterminer l'influence de l'ouvrage en remblai sur les températures en situation de gel de printemps. Après la nuit du 22 au 23 mars (gel radiatif particulièrement intense), un protocole d'observation du végétal est défini sur plus de trente parcelles représentatives du site afin de mesurer l'étendue des dégâts (fig. 3.10a). Cette nuit-là, suivant une journée ensoleillée, la température a fortement chuté pour atteindre à certains endroits jusqu'à  $-5.5^{\circ}\text{C}$  (fig 3.10b et 3.11). Les conditions atmosphériques (ciel clair et absence de vent) sont favorables aux fortes déperditions énergétiques et à la formation de brises de pente. La répartition des températures minimales correspond aux conclusions tirées de l'expérimentation météorologique à l'échelle *mésolocale*. Sur le côté sud du remblai de la LGV, l'air froid venant des collines du "Pas des Lanciers" s'écoule lentement le long de la pente, s'accumule dans les secteurs en replat ou derrière des obstacles comme les haies brise-vent ou même le remblai. Au nord de la LGV, les parcelles sont soumises à la brise de vallée descendante qui modèrent le refroidissement par brassage de l'air dans les premiers mètres de la couche limite. A proximité du remblai, le



X numéro de parcelle

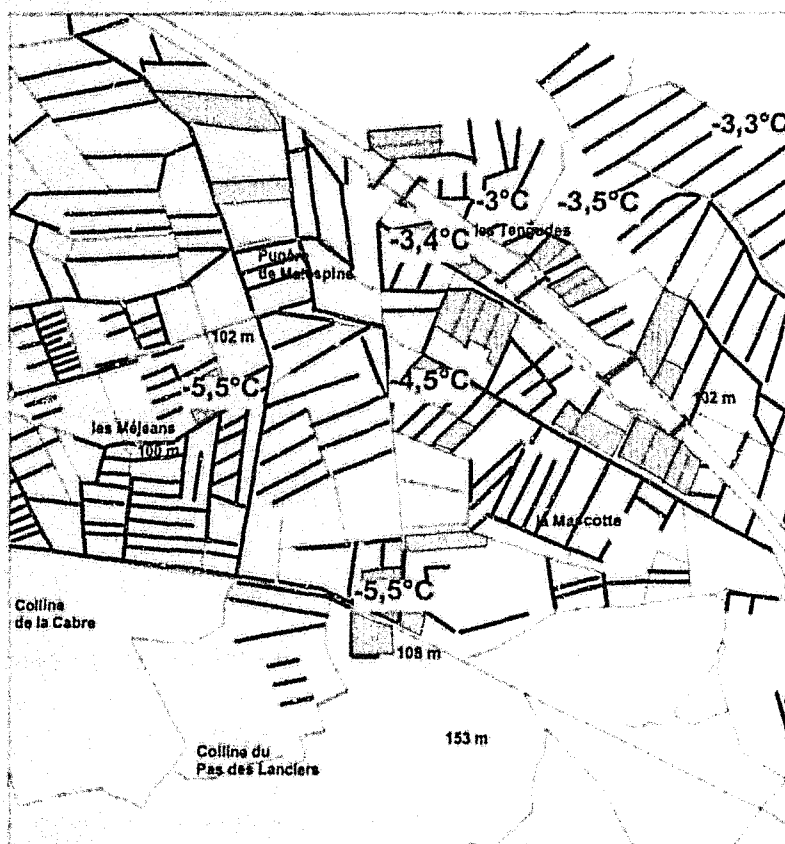


Fig 3.10 : Localisation des parcelles expérimentales de part et d'autre de la LGV (a) et températures minimales (b) au centre de 7 parcelles réparties sur l'aire d'étude : 22 -23/03/1998.

### Partie 3 : Validation des mesures météorologiques à partir de l'observation des cultures

refroidissement nocturne est limité très certainement grâce à l'énergie solaire que l'obstacle ferroviaire a accumulé durant la journée et qu'il restitue durant la nuit. Les données les plus froides, situées au niveau des Méjeans (point n°13) atteignent  $-5,5^{\circ}\text{C}$ , alors que de l'autre côté de la ligne ferroviaire, la température minimale est de  $-3,5^{\circ}\text{C}$  (point n°2). Aux abords du remblai, les températures sont plus élevées ( $-3,4^{\circ}\text{C}$  sur le point n°9 et  $-3^{\circ}\text{C}$  sur le point n°5). Nous remarquons également que la température minimale, relevée en amont d'une haie (point n°12) bloquant l'air froid provenant du Pas des Lanciers, correspond à celle du secteur subhorizontal des Méjeans (fig 3.10b).

Au cours de ce gel, ce n'est pas tellement la forte baisse des températures qui a provoqué des dégâts mais plutôt sa durée. En effet, le niveau de croissance (début floraison) des pommiers et des poiriers permet encore au végétal de résister à ces températures pendant plusieurs dizaines de minutes. Mais, la température la plus basse est atteinte vers 04h00 et se maintient pendant plus de 3 heures (fig. 3.11).

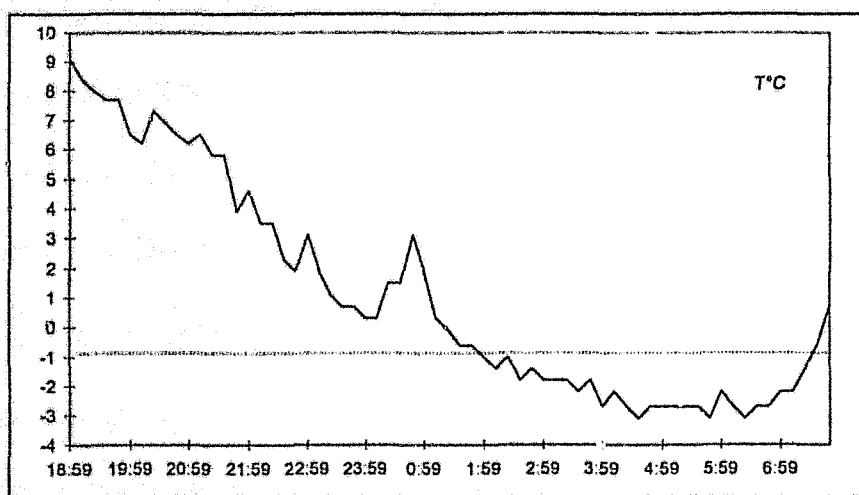


Fig 3.11 : Evolution de la température en situation de gel radiatif sur le poste expérimental n°11 : données mesurées toutes les 10 mn (22-23/03/1998).

Contrairement aux situations étudiées précédemment, le végétal observé n'est pas sous la forme d'un fruit mais d'une fleur en début de formation. Nous avons donc observé, sur plusieurs parcelles de part et d'autre de la LGV, des échantillons de corymbes d'arbres fruitiers de différentes espèces et variétés.

#### Résultats et hypothèses

A partir des résultats, deux cartes sont élaborées, l'une d'après les "*taux de corymbes avec au moins une fleur gelée*", l'autre d'après les "*taux de fleurs gelées par corymbes truchés*". Alors que la première met en évidence la présence de gel sur les parcelles, la seconde en montre l'intensité. En analysant simultanément ces deux cartes, nous pouvons déterminer l'influence du gel sur le végétal et la répartition des dégâts qui en découle. En effet, des parcelles peuvent avoir un pourcentage important de corymbes endommagés sans que toutes les fleurs soient gelées. Et inversement, des arbres très localisés peuvent avoir toutes les fleurs gelées alors que sur une majeure partie de la parcelle, les corymbes sont sains. Dans le premier cas, il s'agit généralement des plantations situées dans les zones les

"moins froides" où seulement les fleurs les plus avancées du corymbes ont été abîmées. Dans le second cas, ce sont les parcelles où des facteurs micro-locaux accentuent fortement l'action du gel à un endroit précis.

La compréhension des différents phénomènes ayant favorisé le gel de ces exploitations, passe par l'observation à plusieurs niveaux des végétaux gelés. L'analyse est, dans un premier temps, globale et détermine les secteurs sin. strés, puis dans un deuxième temps, elle se fait plus précise et renseigne sur le rôle joué par les éléments micro-locaux.

- A l'échelle méso-locale : une répartition aléatoire du gel

D'après la première carte, on remarque une répartition aléatoire du gel sur le site. Des parcelles totalisant entre 90 et 100% de dégâts sont proches de parcelles non touchées (exemple des parcelles n° 28 et 26). Cependant, la majorité de celles gelées entre 70 et 100%, à l'exception toutefois de deux parcelles (n°2 et 3) situées au nord-est du remblai, sont localisées dans les secteurs considérés comme les plus froids (ex : Méjeans). Pour les autres plantations de ce secteur et aux alentours de la LGV, les résultats varient de 0 à 70% (fig 3.12a).

Sur la deuxième carte (fig 3.12b), on retrouve la même localisation pour les parcelles comptant entre 50 et 100% de dégâts. Le gel qu'elles ont enduré a donc été particulièrement intense. La parcelle n°28 a, par exemple, 100% des corymbes touchés et 90% de fleurs gelées. Par contre, dans les deux autres secteurs, les résultats sont plus homogènes que sur la première carte. En moyenne, ces parcelles ont des taux inférieurs à 30% et les pourcentages n'excèdent pas 50%. Cela justifie ce qui avait été avancé auparavant, à savoir que dans les zones les moins froides, les températures sont suffisamment descendues pour qu'une grande partie des corymbes soit atteint, mais le gel n'a pas été assez fort pour endommager toutes les fleurs (fig 3.12b).

Si un secteur très touché (50 à 90% de fleurs gelées avec possibilité de pertes à la récolte) est localisé au sud-ouest du remblai où les températures les plus froides ont été relevées, cette corrélation n'est toutefois pas vérifiée partout. On remarque en effet des parcelles indemnes à proximité des points de mesure les plus froids. L'inverse est également constaté (exemple des parcelles n°2 et 3). Bref, ce facteur ne peut pas à lui seul expliquer la répartition du gel ; d'autres éléments sont bien sûr à prendre en compte.

Intéressons-nous par exemple au stade phénologique de la végétation au moment de la nuit de gel. Sachant que plus l'état de croissance du végétal est avancé, plus le risque au gel est grand, il est intéressant de savoir jusqu'à quel point ces deux aspects sont liés. Les stades observés vont du gonflement apparent des boutons floraux (stade C) à l'apparition des premières fleurs (stade F). Notons que les seuils de sensibilité ne varient pas seulement suivant les phases de croissance, mais aussi suivant les espèces fruitières. A des stades phénologiques similaires, les poiriers résistent à des températures plus basses que les pommiers. Par exemple, la température critique au moment du débourrement du bouton floral est d'environ -4°C pour le pommier et de -6°C pour le poirier. Néanmoins, plus on se rapproche de la floraison plus les différences s'estompent (-2°C pour les deux au début de la floraison).

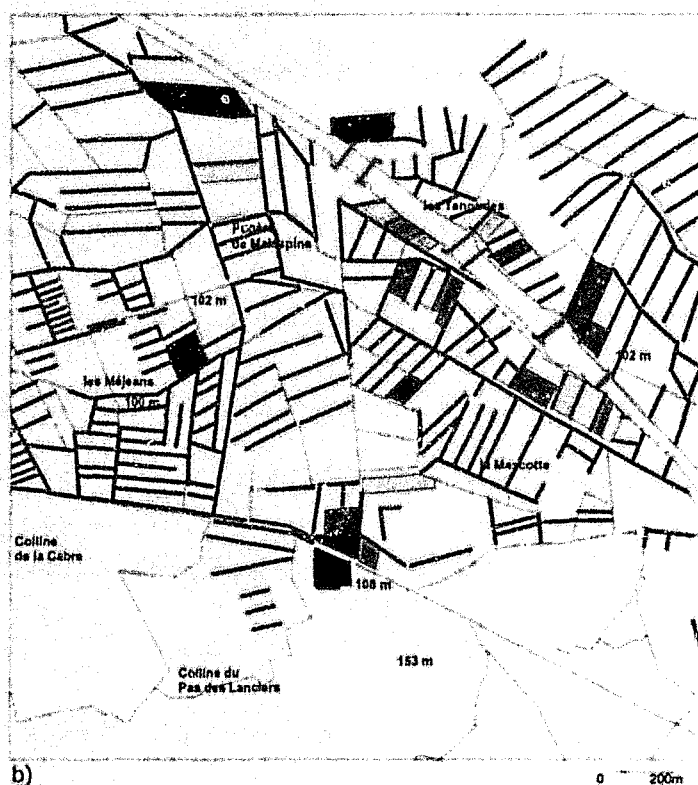
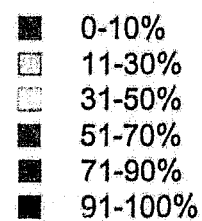
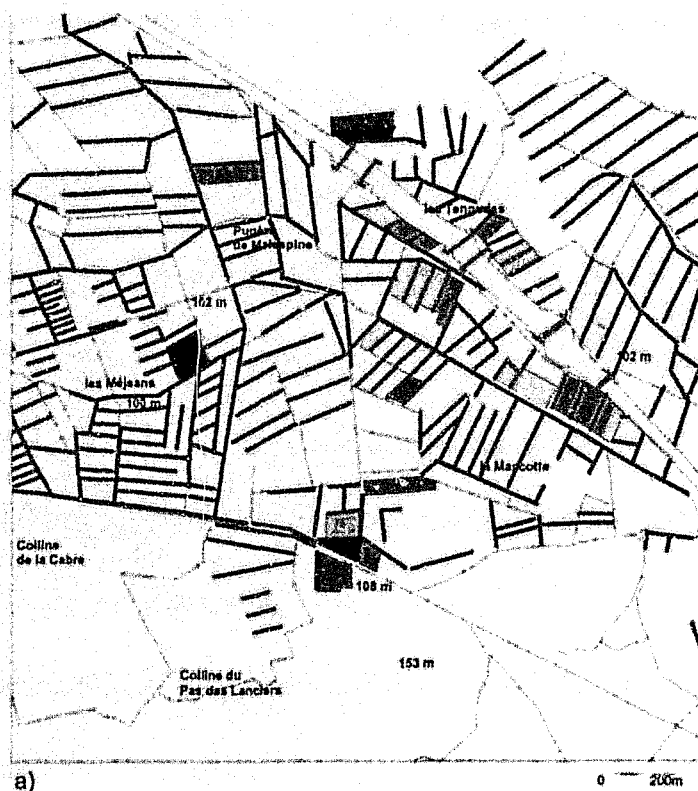


Fig 3.12 : Répartition du gel de part et d'autre de la LGV.  
 a) Taux de fleurs gelées par corymbes touchés.  
 b) Taux de corymbes avec au moins une fleur gelée.  
 (comptage effectué après la nuit du 22 au 23 mars 1998).



Si l'on ne considère que les espèces et les variétés de fruitiers sur le terrain, on ne trouve aucune relation concrète entre elles et le niveau de dégâts (fig. 3.13a). Les pommiers ne sont pas plus abîmés que les poiriers. Toutefois, d'après des études agronomiques réalisées par le Ctifl et l'INRA (1998), certaines variétés telles que Harrow Sweet et Pink Lady sont plus sensibles au gel, non pas à cause de leur nature mais du fait de leur floraison précoce. Au cours de la nuit gélive, ces végétaux sont en début de floraison. Leur seuil de sensibilité tourne autour de  $-2^{\circ}\text{C}$  alors que celui de la pomme Chanteclaire, par exemple, n'est qu'à  $-4^{\circ}\text{C}$ . Le stade phénologique semble être, pour certaines plantations, le facteur principal expliquant un fort taux de dommages. C'est le cas, notamment, pour celles avoisinant le remblai et ayant un taux de "corymbes avec au moins une fleur gelée" supérieur à 50%. Elles sont pour la plupart (mis à part la parcelle n°11) en début de floraison. De même, dans le secteur le plus froid, les parcelles (n°25 et 26) avec très peu de fleurs abîmées ont des variétés très tardives. Au moment du gel, leur niveau de croissance est à peine en fin de débourrement d'où une résistance du végétal allant jusqu'à  $-4/-5^{\circ}\text{C}$  (fig 3.13b). Cependant, on ne retrouve pas partout cette concordance entre les phases de développement des arbres et le taux de dégâts. Ainsi des plantations (ex : n°14) dont les arbres étaient en pleine floraison n'ont pas gelé. Ces résultats montrent les problèmes posés par la présentation des stades phénologiques selon le critère de l'espèce (ex : pommiers, pêchers, ...) et non celui de la variété. Or, comme on l'a constaté ici, les seuils de résistance au gel ne dépendent pas seulement de l'espèce mais aussi de la variété, de la vigueur, de l'âge de l'arbre et d'autres critères internes au végétal.

Nous retiendrons que la répartition des dégâts est assez hétérogène sur l'ensemble du terrain expérimental. Toutefois, les secteurs où les températures sont les plus froides ont subi les plus gros dommages et pour l'ensemble des parcelles à proximité de la LGV, les dégâts sont peu importants. L'atténuation du refroidissement nocturne grâce à la restitution de chaleur par le remblai peut être une des explication

- A l'échelle microclimatique

Grâce aux températures minimales et aux stades phénologiques du site d'étude, on a pu émettre quelques hypothèses sur les causes du gel de certaines parcelles. Mais il reste des cas que l'on ne peut pas expliquer sans réaliser une étude détaillée des bourgeons gelés.

Le premier exemple comprend deux plantations de pommiers Granny Smith (n°29) et de poiriers William's Rouge (n°28) situées dans le secteur le plus froid (fig 3.10a). On déplore un taux de dommages nettement moins important sur les pommiers, pourtant ils ont une croissance plus avancée et sont donc plus sensibles aux faibles températures. Si on observe la répartition des végétaux gelés sur cette parcelle, on s'aperçoit que les points de contrôle immédiatement en aval de la haie brise-vent sont très peu touchés par rapport aux autres (fig 3.14). Sachant, d'après la carte des brises de pente, que l'air froid s'écoule en direction de ces parcelles, on peut supposer qu'il est bloqué derrière la haie imperméable et stagne sur les parcelles de poiriers. Les Granny Smith sont protégées, tout au moins celles des premiers arbres, derrière le brise-vent. Ensuite, l'air froid continue à descendre lentement le long de la pente et cause localement des dégâts dans la partie basse de la parcelle (fig 3.14). Ici, le facteur dominant est donc la haie brise-vent qui crée une sorte de microclimat pour les premiers arbres en aval.

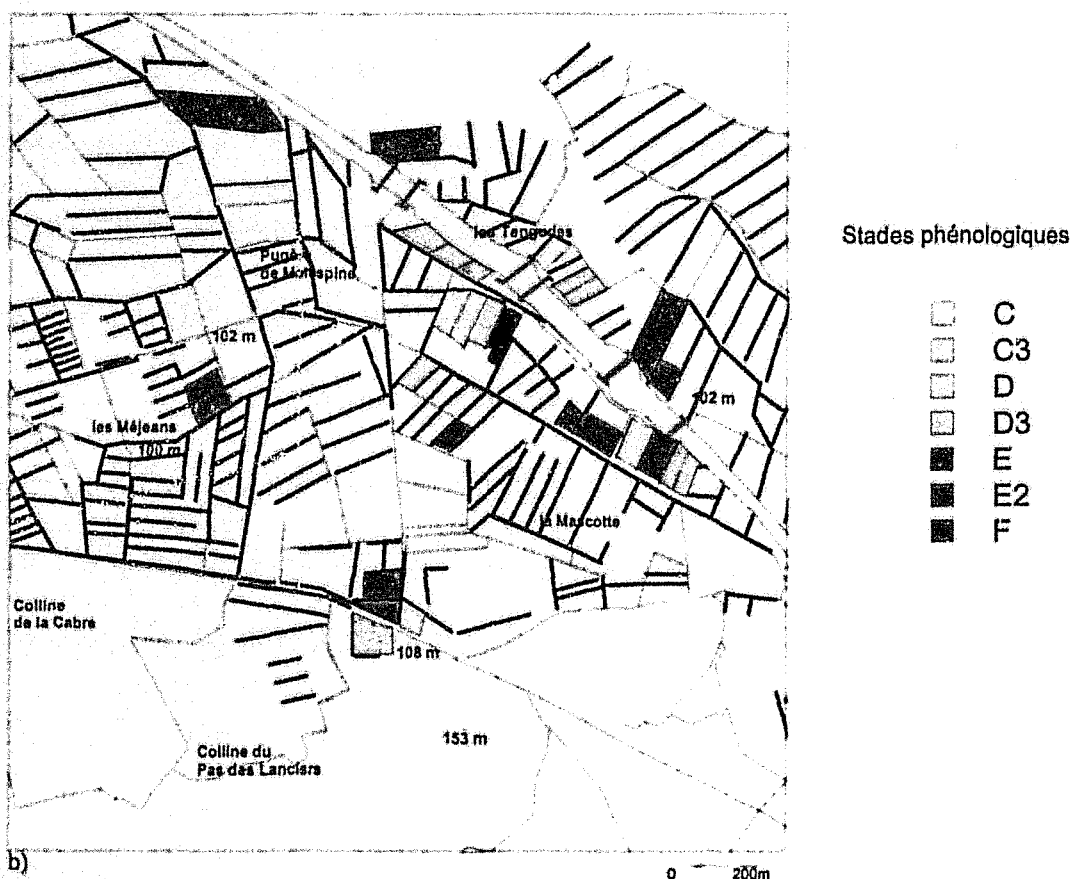
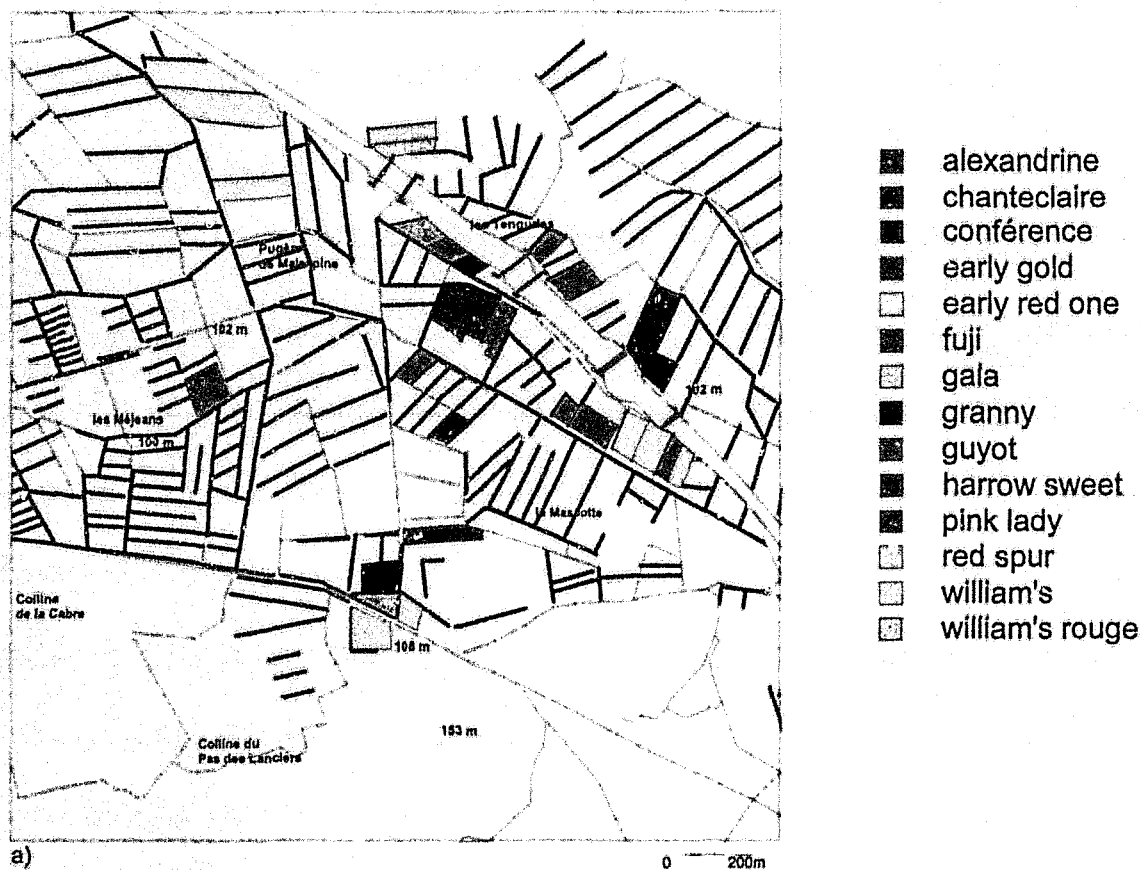


Fig 3.13 : Variétés de poiriers et de pommiers (a) et stades phénologiques (b) des parcelles expérimentales de part et d'autre de la LGV lors de la gelée du 22 au 23 mars 1998.

Ces observations confirment les résultats des mesures météorologiques, démontrant que l'écart de température entre l'amont et l'aval d'une haie imperméable en situation de blocage d'air froid, peut atteindre plusieurs degrés.

Le second exemple traite d'une parcelle qui a subi des dommages sur un point précis (n°22). Il s'agit d'une variété de pommes qui semble être assez sensible aux basses températures. On remarque, principalement sur un des points de contrôle des bourgeons, que la majorité des végétaux abîmés sont proches du remblai. L'observation de l'ensoleillement au lever du jour fait apparaître que les points les plus gelés sont les premiers atteints par les rayons du soleil. En effet, la haie brise-vent est partiellement détruite à cet endroit, son rôle d'écran est donc limité (fig 3.15).

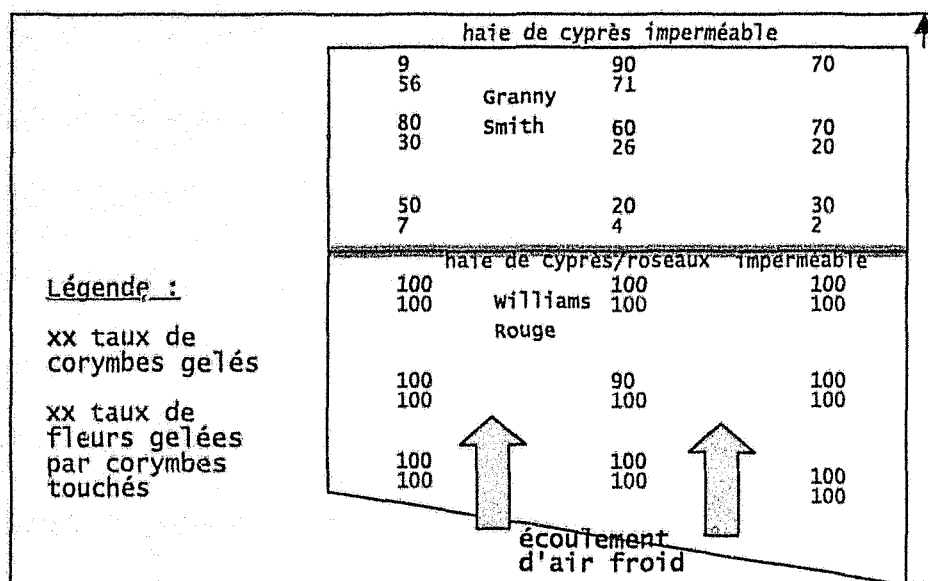


Fig 3.14 : Contrôles sur fruits en amont d'une haie imperméable en situation de blocage d'air froid.

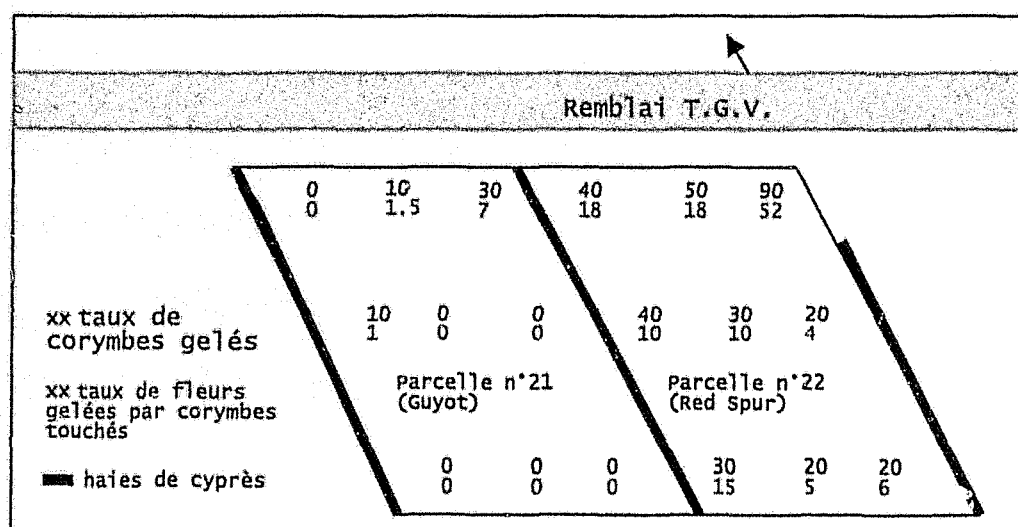


Fig 3.15 : Variabilité spatiale des dégâts sur deux parcelles fruitières à proximité de la LGV.

### Partie 3 : Validation des mesures météorologiques à partir de l'observation des cultures

- Imbrication des échelles : méthode essentielle pour l'étude de la répartition des zones gélives

Jusqu'ici, nous avons défini les causes des dommages sur les parcelles à l'échelle *mésolocale* ainsi qu'à celle *microclimatique*, mais nous n'avons pas montré les relations entre ces différents niveaux d'observation. D'une manière similaire à l'expérimentation météorologique, les observations agronomiques doivent être réalisées en fonctions des échelles spatiales imbriquées.

Dans le secteur au nord du remblai de la LGV, deux parcelles (n°2 et 3) sont anormalement touchées par rapport aux plantations environnantes. Certes, la croissance des végétaux est assez avancée mais il n'y a pas de raison pour que ces arbres atteignent un taux de dégâts proche de 90%. La mise en relation des pourcentages de dommages et des températures dans ce secteur ainsi que l'observation des bourgeons en divers points de la parcelle n'ont pas permis d'émettre d'hypothèses sur le caractère excessif du gel sur ces parcelles. En analysant chronologiquement et selon l'imbrication des échelles spatiales, l'influence de chaque élément du milieu sur la répartition du gel (cf fig 1.13), nous essayons de comprendre les raisons du gel de ces deux parcelles :

- **le relief** : l'air froid s'écoule le long de la pente et se bloque dans les parties basses. Nous avons défini deux types d'écoulement sur le terrain expérimental. Les écoulements gravitaires, issus des déperditions énergétiques du sol et de la végétation, peuvent engendrer un fort refroidissement lorsqu'ils sont ralentis ou bloqués. Une brise de vallée descendante dont la vitesse, comparable à un vent synoptique (plus de 3m/s), provoque un brassage d'air et limite le refroidissement nocturne ;
- **le remblai** : l'ouvrage ferroviaire, qui atteint à certains endroits plus de 15m de haut, fait barrage aux divers écoulements. Deux secteurs apparaissent : l'un au sud de l'obstacle où l'air froid est bloqué et s'étale sur les parcelles ; l'autre, au nord, où le refroidissement est moins intense en raison de l'influence des écoulements de "Durance". Ici, les deux parcelles étudiées sont dans le secteur théoriquement le moins froid ;
- **les brise-vent** : les haies, de par leur position et leur nature, peuvent provoquer un blocage d'air très localisé sur la parcelle. D'après leur disposition, il semble que les brise-vent, pourtant imperméables, ne font pas obstacle aux écoulements ;
- **la nature de la parcelle et le stade phénologique** : comme cela vient d'être étudié, ces deux éléments sont internes à la parcelle et déterminent fortement l'intensité des dégâts. Le stade phénologique des pommiers correspond à l'apparition des premiers pétales (E). D'après les seuils critiques, la température à risque se situe aux alentours de  $-2.5^{\circ}\text{C}$ . Une prévision de 90% de dégâts est émise à une température inférieure à  $-4.5^{\circ}\text{C}$ , or, dans ce secteur, les données relevées sont proches de  $-3,5/-3^{\circ}\text{C}$  ;
- **autres éléments propres à la parcelle** : l'observation du végétal sur divers points de la parcelle n'a pas permis de déterminer l'influence d'un facteur très localisé. Même si, par exemple, la croissance des arbres situés le long de la haie brise-vent (partie ensoleillée) est un peu plus avancée (stade E2 « couleur des pétales visibles »).

### Partie 3 : Validation des mesures météorologiques à partir de l'observation des cultures

La mise en relation de ces composants est nécessaire pour comprendre le gel de ces parcelles, parce que jusqu'ici, nous sommes dans l'incapacité d'y apporter une explication. En situation de refroidissement par rayonnement, l'air froid qui vient des collines du Pas des Lanciers s'écoule en direction de ces deux parcelles. Mais le remblai empêche cet air de passer. Or, juste en amont de ces plantations, une ouverture dans l'ouvrage laisse passer l'air froid qui atteint les pommiers. Les haies brise-vent forment une sorte de "barrière" qui ralentit et fait stagner l'air froid. La variété ainsi que l'état de croissance proche de la floraison induit une forte sensibilité au gel du végétal. Cela peut être un élément de réponse aux importants dégâts des parcelles n°2 et 3 (fig 3.12a et b).

### Bilan

Ces trois exemples démontrent que l'analyse du végétal est un moyen intéressant pour valider les mesures météorologiques et pour délimiter les zones gélives. Le bourgeon et la fleur gelés sont le résultat d'une multitude de facteurs imbriqués et agissant à des échelles différentes. La seule observation des arbres touchés permet d'évaluer les phénomènes qui se sont produits, l'exemple des parcelles de pommiers dans le Gard en témoigne. Si on accompagne le contrôle sur fruits de données sur les conditions météorologiques du refroidissement, l'état du végétal (stades phénologiques, ...) et l'occupation du sol (relief, végétation, ouvrages humains, ...) du site, il est possible d'étudier en détails le comportement de la plupart des facteurs influençant le gel.

Après la gelée du 22 au 23 mars 1998, les mesures météorologiques et les observations agronomiques ont permis d'estimer l'influence du remblai sur la répartition du gel (peu de dégâts sur les parcelles proches de la LGV). **La localisation des portions de parcelles ayant des dommages correspond à celles où nous avons enregistré les basses températures : les parcelles situées dans les secteurs subhorizontaux au sud de la LGV ont subi d'importants dégâts et celles, proches de la LGV, sont peu touchées.**

Cependant, nous ne pouvons pas montrer, avec ces résultats, qu'après un gel radiatif avec présence d'un couvert nuageux la veille, les parcelles situées immédiatement au sud du remblai (accumulation d'air froid) subiraient d'importants dégâts. Pour valider ce type de gel, il aurait fallu que cette situation gélive provoque des dégâts sur les cultures. Or, malheureusement (heureusement pour les arboriculteurs), cela n'est pas arrivé et nous n'avons pas pu vérifier s'il y a concordance avec les résultats des mesures météorologiques.

## 2 OBSERVATION DE LA VEGETATION APRES DES EPISODES DE VENTS FORTS

---

Les expérimentations agronomiques sont réalisées, à l'échelle parcellaire, afin de déterminer la surface parcellaire protégée en aval d'une haie brise-vent (perméable et imperméable) puis pour définir les secteurs où le risque lié aux effets mécaniques du mistral (ex : boisage des fruits) est accentué par la LGV. Sur chaque parcelle, nous avons choisi des arbres tests sur lesquels des échantillons ou la totalité des fruits ont été analysés juste avant la récolte.

### 2.1 Méthode d'observation de la répartition des fruits abîmés par les effets mécaniques du mistral sur une parcelle arboricole

Le centre expérimental agronomique de Balandran (à proximité de Nîmes) est soumis à une forte fréquence du mistral (37% des vents totaux que rencontre la région ; Météo France, 1998). Les arbres fruitiers, protégés par des haies brise-vent plus ou moins perméables, subissent néanmoins des dommages (boisages, coups, ...) issus des effets mécaniques du vent. Avec la collaboration de V. Mathieu (ingénieur en arboriculture), nous avons mis en place un protocole d'observation des pommes sur une parcelle protégée par un brise-vent de cyprès de 7m de haut. L'objectif est d'observer la proportion de pommes abîmées par le vent en fonction de la position et de la distance à la haie. La parcelle expérimentale est composée de rangs perpendiculaires à la haie brise-vent située dans l'axe du mistral. Deux ensembles de 9 rangs composés de pommiers Fuji (3<sup>ème</sup> feuille) et d'une variété expérimentale (TNR42-60 X6398, 2<sup>ème</sup> feuille) ont été choisis. Aucune de ces rangées n'est disposée aux extrémités de la parcelle. Lors de la récolte, les fruits sont ramassés par ensembles de 7 arbres (4 blocs pour les Fuji et 5 blocs pour l'autre variété) et contrôlés un à un. Le bloc 1 est le plus proche de la haie (fig 3.16).

Pour la variété expérimentale (plus de 5000 fruits sont analysés), la proportion de fruits abîmés varie de 10 à 80% suivant le bloc observé. Au total, 40% des fruits ont des marques de boisage ou de coups. Cette variété est particulièrement sensible aux effets mécaniques du vent. La répartition des fruits abîmés en fonction de la distance à la haie est hétérogène en fonction des rangs. Le pourcentage varie de 10 (rang 32) à 45% (rang 29) pour le bloc 1 et de 30 (rang 32) à 80 % (rang 30) pour le bloc 4. La variabilité de proportion de fruits endommagés suivant les rangs est, en partie, due à la présence de trous (arbres morts) dans la haie où le vent turbulent peut s'engouffrer. Cela explique la forte proportion de fruits abîmés quelques mètres en aval de la haie dans le secteur *a priori* calme et protégé. Toutefois, en analysant la part de fruits détériorés par ensemble de blocs, la moyenne la moins élevée (23%) correspond au secteur le plus proche de la haie (bloc 1: jusqu'à 15m de la haie). Puis, plus on s'éloigne de la haie, plus la proportion de fruits abîmés est forte (bloc2=34% ; bloc3=41% ; bloc4=50% ; bloc5=51%). Le fort taux de dégâts sur l'ensemble des blocs ne permet pas de déterminer une zone protégée, mais le secteur où l'action du vent est la moins néfaste s'étend sur une distance de deux à trois fois la hauteur de la haie. Dans cet exemple, nous ne disposons pas de mesures météorologiques mais la forte proportion de fruits abîmés





### Partie 3 : Validation des mesures météorologiques à partir de l'observation des cultures

au delà du bloc 1 montre que le vent est sans doute plus puissant et plus turbulent. Le secteur où les fruits sont les plus abîmés correspond aux blocs 4 et 5 s'étendant sur une distance de 6 à 10 fois la hauteur de la haie (fig 3.16).

Pour les rangées de pommes Fuji (9464 fruits observés), la part de fruits abîmés est beaucoup moins importante. Quel que soit le rang, aucun bloc n'a plus de 25% de pommes endommagées. Au total, 16% des fruits portent des meurtrissures (boisage, coup, griffures). Les blocs 1, situés à proximité de la haie, ont les taux les plus faibles (moybloc1=11%) par rapport aux autres blocs (bloc2=16% ; bloc3=18% ; bloc4=17%) mais la variation est peu importante.

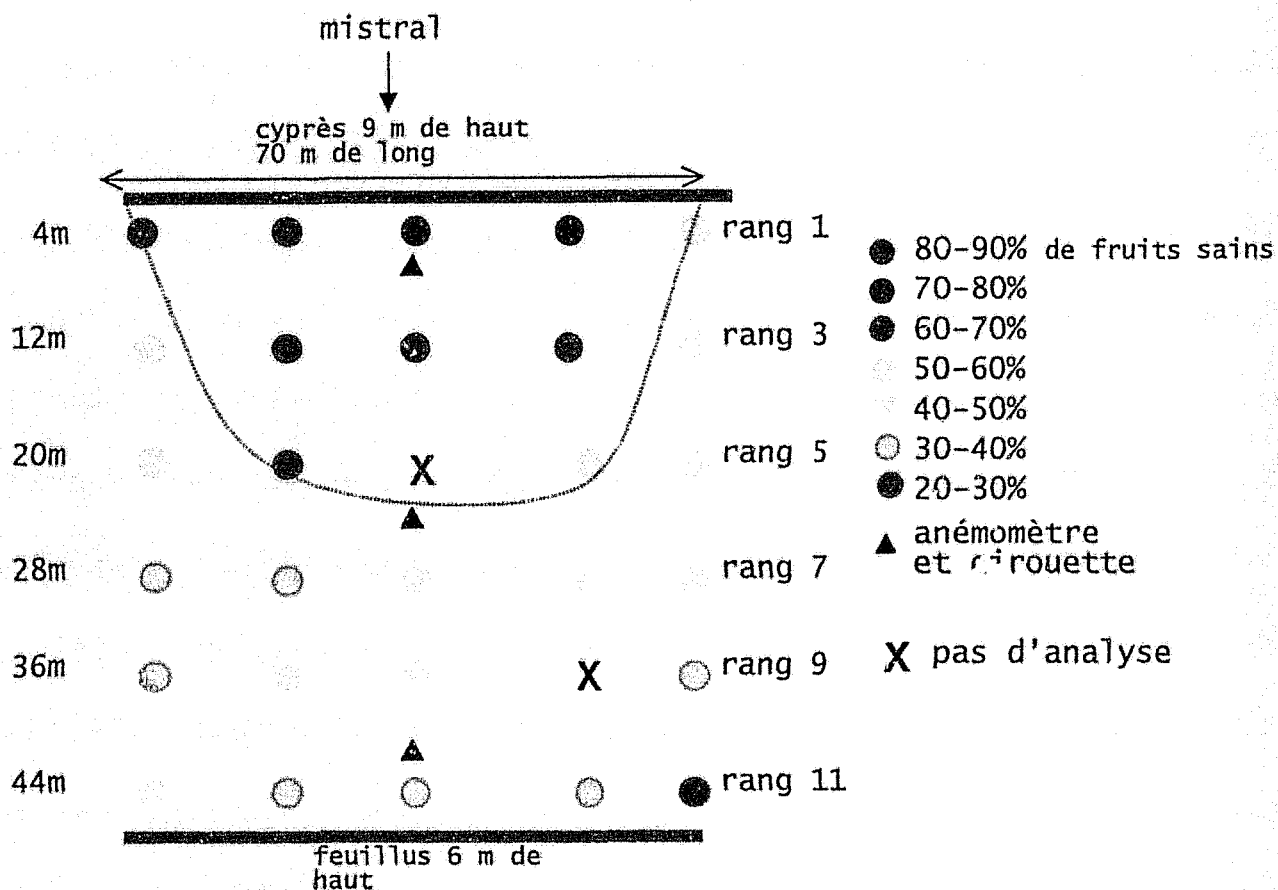
Cet exemple met en évidence, d'une part, l'influence d'une haie imperméable compacte mais hétérogène sur le comportement du mistral et des répercussions sur la qualité des fruits - *secteur plus ou moins bien abrité immédiatement en aval de la haie puis fortes turbulences quand le vent est rabattu sur la parcelle*- et d'autre part, les variétés qui ont une sensibilité différente aux effets mécaniques du vent.

## 2.2 Validation de la distance de protection d'une haie imperméable et d'une haie perméable

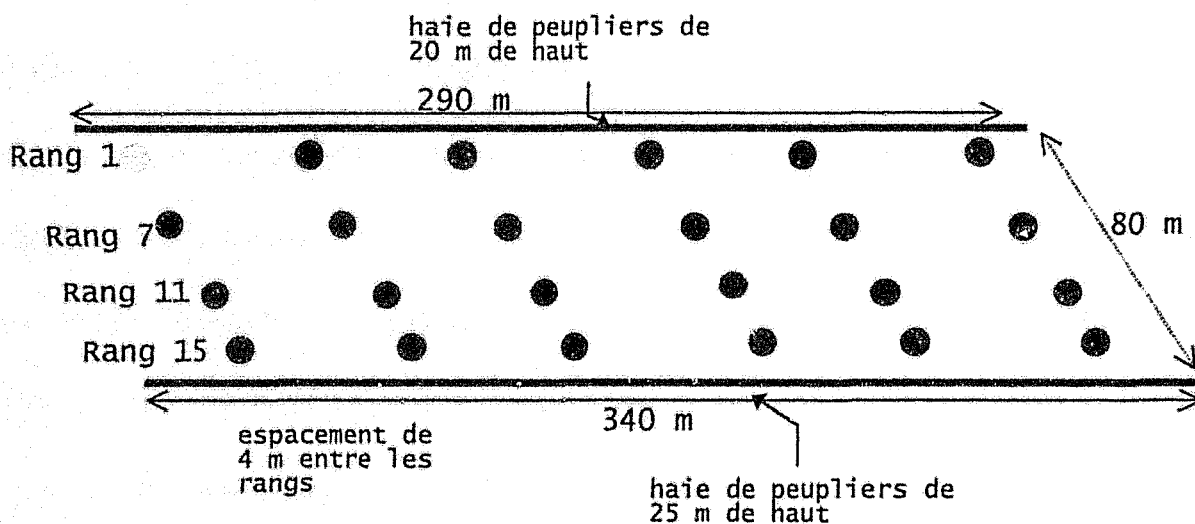
Sur une parcelle de poire "Harrow Sweet"(parcelle n°12), variété dont l'épiderme est très sensible au boisage, nous avons procédé à des mesures de vitesse et de direction du vent ainsi qu'à l'analyse des fruits après la récolte (juillet 1999). Cette expérimentation, réalisée sur le site expérimental de Mallemort, confirme la surface de protection en aval d'une haie imperméable (distance d'environ 2 à 3 fois la hauteur de la haie) définie par les mesures météorologiques, c'est-à-dire une zone abritée par la haie où la part de fruits abîmés est peu importante et un secteur où le rabattement du vent sur les arbres génère une forte proportion de fruits endommagés. La haie imperméable et compacte est composée de cyprès et mesure 9m de haut.

La totalité des fruits de 28 arbres, choisis de façon à quadriller l'ensemble de la parcelle, est contrôlée après la récolte. Le rapport entre le nombre de poires "saines" ou "marquées" met en évidence le pourcentage de fruits abîmés par arbre suivant sa position et sa distance par rapport à la haie. La proportion de fruits abîmés par rangée s'accroît à mesure qu'on s'éloigne de la haie. A proximité du brise-vent, la part de fruits boisés est proche de 30% (rang1=32% ; rang3=35%). Elle dépasse 50% à partir d'une distance de 2.5 à 3H (rang5=48% ; rang7=58% ; rang9=61% ; moyrang11=64%). Ces valeurs sont également hétérogènes suivant la position de l'arbre fruitier sur le rang. Les poiriers situés aux extrémités des rangs subissent plus de dégâts. Par exemple, sur le troisième rang, les premiers et derniers arbres ont environ 50% de fruits sains, alors que les autres en ont 70 à 85%. Au contact de la haie, l'air est compressé, accéléré et dévié soit en hauteur dans l'axe vertical, soit aux extrémités du brise-vent dans l'axe horizontal. Les premiers arbres en bout de rangs subissent de fortes turbulences et un vent plus puissant. C'est le cas, notamment, des arbres situés sur le côté droit de la parcelle où le chemin entre deux haie imperméables crée un effet venturi (fig 3.17a).





a) parcelle de poires Harrow Sweet<sup>cov</sup>  
(observations réalisées en juillet 1999)



b) parcelle de pommes Golden  
(observations réalisées en août 1999)

Fig 3.17: Proportion de fruits abîmés par le vent en aval d'une haie imperméable (a) et d'une haie perméable (b).

Trois anémomètres à coupelles, installés à une hauteur de 2m et à une distance de la haie de 6m (rang 2), 24m (rang 6) et 40m (rang 10), enregistrent la vitesse du vent au cours du 7 juillet 1999. Ces capteurs sont disposés en milieu de rangée pour éviter l'effet latéral des bordures de la haie sur le vent. Des girouettes électroniques sont également disposées de façon à quadriller la parcelle. Les relevés de vitesse du vent mettent en évidence un secteur protégé immédiatement en aval du brise-vent où la fréquence des rafales est peu importante. Sur le deuxième rang, l'axe de la girouette se cale longuement sur une direction car les rafales sont rares. Au niveau du sixième et onzième rang, les rose des vent sont en forme d'étoile car le vent turbulent entraîne l'axe de la girouette sur l'ensemble des directions (cf fig 2.45).

Une expérimentation similaire est réalisée, en août 1999, sur une parcelle de pommes Golden (variété sensible au boisage) protégée par une haie perméable de peupliers de 20 m de haut (n°13). Sur 24 arbres tests, nous observons un échantillon de 50 fruits par arbre. D'après les observations, nous constatons que quel que soit l'emplacement de l'arbre sur la parcelle, la part de fruits abîmés est très faible par rapport à la parcelle protégée par la haie imperméable. Le pourcentage maximum de fruits abîmés ne dépasse pas 40% (fig 3.17b). Du fait de la trop petite surface de la parcelle (environ 4H), ce contrôle sur fruits n'a pas permis de valider la distance de protection d'une haie perméable définie lors de l'expérimentation météorologique (8-10H).

Cependant, cette analyse fournit des informations importantes sur les caractéristiques d'un vent à risque pour les cultures fruitières. La parcelle protégée par la haie perméable subit des vitesses de vent plus importantes que celle située en aval de la haie imperméable et pourtant, les dégâts sont moins importants. Le boisage semble être provoqué principalement par les turbulences. Il paraît donc impossible de donner une vitesse de vent fixe à partir de laquelle les fruits risquent de subir des dommages.

Au cours de l'année 1999, nous avons mis en place un dispositif de mesures météorologiques et agronomiques permettant d'observer l'aspect qualitatif d'un échantillon de fruit (du stade phénologique «formation du fruit» à la maturité) en fonction de chaque épisode de mistral. Des anémomètres et des girouettes sont disposés à proximité de chaque arbre test afin de déterminer la vitesse et le niveau de turbulence à partir desquels on observe des dégâts sur les fruits (photo 4a et b). Etant donné la difficulté à quantifier les turbulences, - la girouette informe seulement de leur présence-, les résultats sont peu concluants.

L'analyse agronomique effectuée sur une parcelle en aval d'une haie imperméable permet de valider la surface de protection définie lors de l'expérimentation météorologique. Nous procédons à la même expérimentation sur une parcelle protégée par une haie imperméable ayant les mêmes caractéristiques que la précédente (même hauteur, même orientation par rapport au mistral) mais à proximité de la LGV.

### 2.3 Validation du secteur influencé par la ligne ferroviaire

La méthode d'analyse exposée dans l'exemple précédent est appliquée sur une parcelle limitrophe de l'emprise ferroviaire. La totalité des fruits (pommes Early Gold<sup>cov</sup> de 113 arbres), répartis sur l'ensemble de la parcelle (rangs 2, 5, 9 et 12), est contrôlée. On distingue plusieurs secteurs où le pourcentage de dommages est différent :

- La part de fruits abîmés par arbre la plus importante est localisée sur le côté nord-est de la parcelle, c'est-à-dire le long de l'emprise. Les arbres à proximité de l'emprise ont entre 40 et 65% de fruits abîmés. Par exemple, sur 107 fruits observés sur le premier arbre du rang 5, 67 ont des meurtrissures dues soit à des frottements avec les feuilles (boisage), soit à des coups contre les branches (photo 5 a et b). Au niveau du deuxième rang, les premiers arbres subissent les turbulences dues à la compression du vent sur le côté de la haie. A partir du troisième ou quatrième arbre, les végétaux sont dans la zone abritée par la haie. Au cinquième rang, huit à dix arbres sont sous l'influence du vent turbulent dévié vers la parcelle. Les arbres observés dans ce secteur ont entre 45 et 60% de fruits abîmés. Ce constat est également valable sur les rangs 9 et 12 (12 arbres ont entre 40 et 60% de fruits endommagés) où les arbres sont soumis d'une part à une augmentation des turbulences et de la vitesse du vent imputable au remblai et d'autre part à la fin de la zone de protection de la haie imperméable.
- En milieu de rang, le deuxième et le cinquième rang ont subi peu de dommages (moins de 25%) parce qu'ils se situent dans la zone d'abri en aval de la haie imperméable. Sur le douzième rang, la protection de la haie imperméable est limitée (plus de 30% de fruits endommagés par arbre), même si la haie perméable de peuplier située 150 m en aval est encore influente.
- Sur le côté sud-ouest de la parcelle, les arbres proches de l'extrémité de la haie sont soumis aux turbulences issues de la compression du vent contre le brise-vent. On remarque entre 40 et 50% de dégâts sur les arbres du deuxième rang. Sur le cinquième et le douzième rang, le vent est moins turbulent et les fruits moins abîmés (fig 3.18).

Sur l'ensemble de la parcelle, le secteur où le pourcentage de fruits abîmés est le plus important correspond aux résultats des mesures météorologiques (cf fig 2.85 et 2.86). Premièrement, l'influence de la haie imperméable définit un secteur abrité correspondant aux rangées immédiatement en aval, sur une distance d'environ 2,5H (rang 2 et 5) ainsi qu'un secteur turbulent aux marges de la haie et après le secteur abrité. Deuxièmement, l'emprise et le talus ferroviaire compressent et dévient le vent vers la parcelle. On estime ce secteur à un triangle dont l'angle, correspondant à l'extrémité de la haie, est d'environ 35° (cf fig 2.85 et 2.86).



a) frottements contre une branche



b) frottements contre le palissage

Photo 5 a et b: Pommes abîmées par le vent observées pendant les analyses agronomiques.

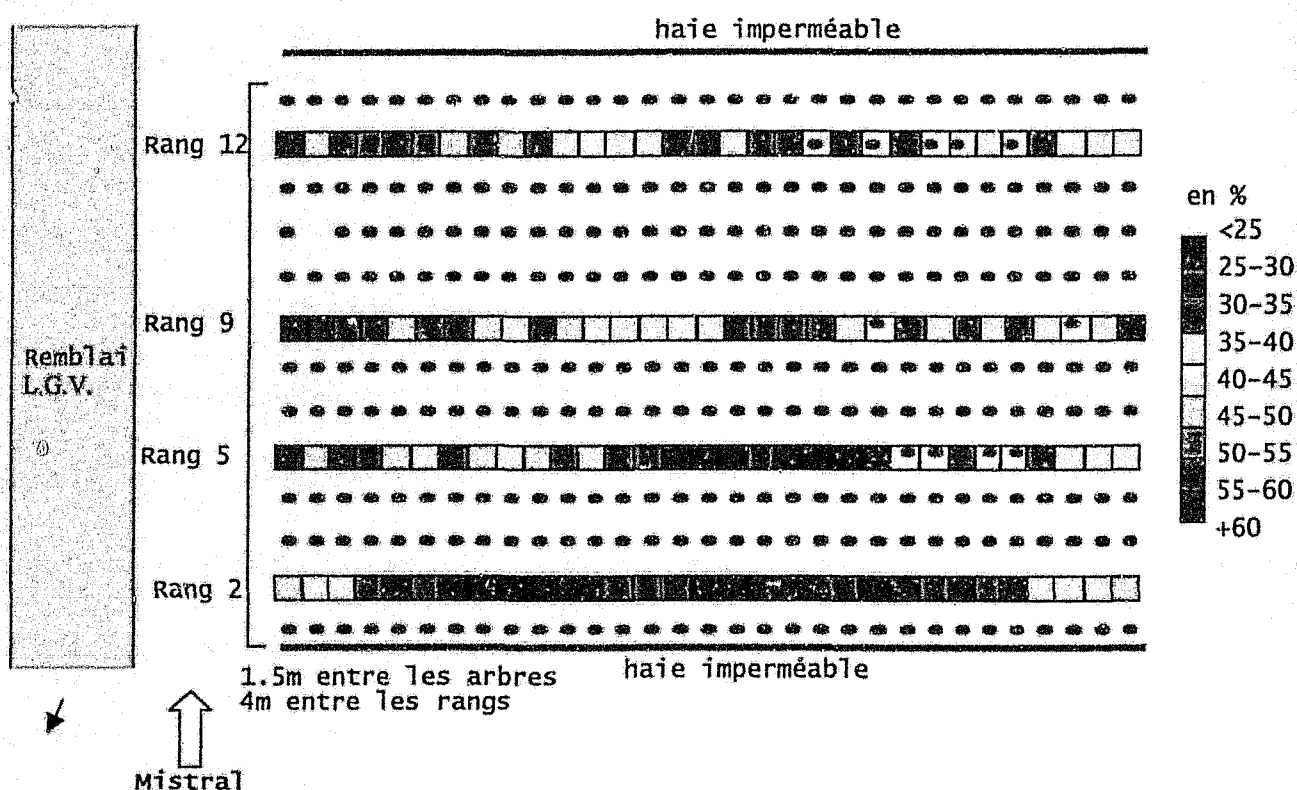


Fig 3.18 : Répartition des dommages issus des effets mécaniques du mistral sur une parcelle de pommiers Early Gold à proximité de la LGV.

## Bilan

Contrairement au gel printanier, les dommages agronomiques provoqués par les effets mécaniques du vent se produisent après la succession des épisodes de mistral durant toute la période de croissance du fruit. Le contrôle agronomique permet d'observer la répartition spatiale des fruits les plus abîmés à l'échelle climatique et non plus à l'échelle de l'événement météorologique (ex : forte nuit gélive). Par conséquent, les résultats de cette expérimentation peuvent être utilisés pour valider les estimations météorologiques (ex : secteur protégé en aval des haies perméables et imperméables) et surtout pour déterminer les secteurs arboricoles où le risque est accentué par la LGV.

## CONCLUSION DE LA PARTIE 3

---

Les « contrôles sur fruits » permettent de valider les résultats des mesures météorologiques mais également d'améliorer la précision de l'information spatiale. En effet, malgré une densité assez élevée de postes de mesures météorologiques, le maillage des points de mesures agronomiques est beaucoup plus fin (échelle de l'arbre). Cela apporte des informations plus précises sur la variabilité spatiale du mistral et du gel printanier :

- ◆ par temps de mistral, les mesures météorologiques (direction et vitesse du vent) indiquent que le vent est puissant et turbulent à proximité de la LGV, mais rien ne permet d'affirmer des conséquences néfastes pour les cultures. L'observation des fruits de chaque arbre sur une parcelle en bordure d'emprise montre clairement l'impact de la LGV sur l'écoulement du mistral et des répercussions sur la qualité des fruits. La part de fruits les plus abîmés correspond au secteur triangulaire déterminé par les mesures météorologiques ;
- ◆ par temps gélif d'origine radiatif après une journée ensoleillée, l'analyse des bourgeons ou des fruits met également en évidence l'action de la LGV. Les dégâts les plus importants sont observés au sud-ouest de la LGV (hormis les abords du remblai probablement soumis à un gain thermique). A une échelle spatiale plus fine, l'analyse agronomique confirme le blocage de l'air en amont des haies imperméables soumises aux écoulements d'air froid.

Après l'acquisition des données météorologiques (aléa) et des observations agronomiques (vulnérabilité), nous pouvons donc envisager une estimation de la localisation du risque climatique. Les données (météorologiques et agronomiques) recueillies ponctuellement apportent une information pertinente sur l'impact microclimatique de la LGV, mais elles ne permettent pas d'estimer la surface arboricole où le risque est accentué. La dernière étape de cette thèse consiste à spatialiser ces données (obtenues sur divers points) à l'ensemble du terrain expérimental de manière à obtenir une cartographie exhaustive des modifications microclimatiques engendrées par la LGV.

## PARTIE 4 : MODELISATION SPATIALE DES RISQUES CLIMATIQUES INDUITS PAR LE REMBLAI

---

*« S'inscrire dans une démarche géographique, c'est s'imposer de recourir, à une étape donnée, à un outil de traitement de l'information » (Gumuchian et al, 2000).*

Après avoir acquis les données sur le terrain par l'intermédiaire de mesures météorologiques et d'observations du végétal, la troisième phase de cette étude consiste à réaliser une modélisation sur l'ensemble du site afin d'obtenir un document cartographique représentant de façon exhaustive les différents secteurs où le risque météorologique ou climatique est accentué par l'ouvrage en remblai. La modélisation est un moyen d'explicitier une représentation de la réalité. Le passage du « terrain » à la modélisation nécessite l'utilisation d'un outil s'inscrivant dans la démarche scientifique suivie depuis le début de l'étude, c'est-à-dire, étudier l'influence de chaque éléments du milieu pouvant modifier la répartition du gel et de l'écoulement du mistral en fonction de l'imbrication des échelles spatiales. Par conséquent, sur le choix de la méthode de modélisation, plusieurs interrogations se posent : Comment spatialiser les variables météorologiques obtenues aux différentes échelles ? Comment mettre en relation des informations d'origines diverses (photographies aériennes, mesures, MNT, ...)? L'utilisation d'un Système d'Information Géographique (S.I.G.) est un moyen approprié pour ce type de modélisation. Le S.I.G. est « *un système multicouches permettant de mettre en relation les différentes informations nécessaires à la modélisation du risque* ». Avant de pouvoir associer chaque type d'information à une couche informatique, plusieurs étapes intermédiaires sont nécessaires, comme l'interpolation spatiale des températures et la conception d'un système gérant des formats de données différents (raster et vecteur).

## 1 ESTIMATION DU RISQUE DE GEL AUX ECHELLES FINES

---

Le risque gélif se définit comme une confrontation entre deux facteurs : l'aléa météorologique et la sensibilité du végétal. Comme la variabilité spatiale du premier diffère selon les conditions atmosphériques et que le second varie suivant l'espèce, la variété, le niveau de croissance (et donc la date), nous devons définir une technique de modélisation permettant de représenter l'ensemble de ces éléments afin de déterminer les secteurs à risques, notamment ceux où le risque est accentué par la LGV.

- **Durant les situations radiatives**, les écoulements gravitaires peuvent s'accumuler en amont d'obstacles artificiels (remblai) ou naturel (haies) et favoriser ainsi la mise en place de secteurs localement plus froids. Pour estimer ce risque, nous devons connaître la valeur des températures aux différentes échelles (mésolocale et microclimatique), la répartition des pentes calculées par rapport au MNT ainsi que l'implantation des haies et du remblai. La combinaison des obstacles et des pentes permet de localiser les secteurs les plus froids. En confrontant la localisation de ces secteurs avec les seuils de sensibilité du végétal, il est possible de cartographier les zones à risques.

- **Durant les situations advectives**, les haies provoquent, suivant leur nature, le ralentissement du mistral et engendrent une baisse locale des températures. Par contre, l'emprise favorise un brassage plus actif des couches proches du sol à l'intérieur des parcelles qui la bordent et limite ainsi le refroidissement dû au ralentissement du vent. Pour estimer le risque de gel en situation advective, il est nécessaire de connaître la direction du vent, l'implantation des haies, leur nature et la sensibilité du végétal.

La combinaison de tous ces éléments ne peut être réalisée que dans un SIG capable d'associer des informations en mode raster (relief, champs de températures interpolés) et en mode vectoriel (haie, remblai, cultures).

### 1.1 Construction d'un S.I.G : un ensemble de logiciels spécifiques mis en relation par une « passerelle informatique »

*« Reconstituer un champ de précipitation à partir de valeurs ponctuelles relevées en un certain nombre de postes pluviométriques n'est pas chose aisée, des générations de climatologues en ont fait et en font encore l'expérience. Les problèmes qui se posent sont malgré tout bien connus (variabilité spatiale et temporelle de la pluie, insuffisance du réseau, problème de la mesure au pluviomètre ...) sans que les solutions apportées soient vraiment satisfaisantes ».* Les difficultés de la modélisation spatiale des précipitations auxquelles fait référence P. Bénichou (1987) sont également rencontrées dans l'interpolation des températures nocturnes. La répartition et l'espacement des postes de mesures, l'environnement du capteur (relief, végétation, structure du sol, ...), les problèmes d'imbrication d'échelles sont autant d'éléments qui rendent complexe la modélisation d'un



champ thermique aux échelles fines. En situation radiative, notamment, la variabilité spatiale des températures minimales est beaucoup plus importante qu'en situation advective. La connaissance d'une variable météorologique ou climatique ne se heurte pas seulement, comme le précise M.F. de Saintignon (1995), au fait qu'elle est spatialement ponctuelle (poste de mesures) mais aussi au fait qu'elle requiert, dans le cas de variable climatique, des séries de mesures fiables sur une longue durée. *« La fourniture de couches d'informations climatiques passe donc nécessairement par l'élaboration de méthodes de spatialisation intégrant les contraintes et les incertitudes liées à cette variabilité à la fois spatiale et temporelle ».*

Plusieurs méthodes pour interpoler les variables météorologiques sous la forme cartographique sont développées. Plusieurs d'entre elles sont basées sur la position des points d'observation dans l'espace. Ces modèles, à base géostatistique, *« consistent à ne s'appuyer que sur les valeurs ponctuelles issues des mesures et à postuler que la valeur du descripteur en tout point du domaine d'étude ne « dépend » que des valeurs rencontrées dans les postes environnants et de la distance à ces mêmes postes »* (de Saintignon, 1995). Les interpolations optimales (Emsalem, 1986) et le Krigeage (Delfiner, 1973 ; Chauvet, 1976 ; Carrega, 1986, 1994) constituent les principales méthodes à base géostatistique. L'avantage est d'utiliser au mieux la structure spatiale du champ à traiter. Cependant, cette méthode ne tient pas compte des paramètres liés à la fluctuation de la variable météorologique comme, par exemple, l'environnement des stations (Joly, 1994 ; Bénichou, 1987, 1986). Or, dans le cas des températures aux échelles fines, la variabilité spatiale dépend beaucoup plus de l'environnement de la station (présence d'obstacles, type de végétation, sol, ...) que de la position géographique du point de mesures.

D'autres techniques permettent de combiner plusieurs paramètres et de réaliser une spatialisation « multicritères ». Ces méthodes, plus complexes, demandent des moyens informatiques et statistiques très performants. C'est le cas de la méthode Aurelhy *« qui permet d'interpoler fréquences et moyennes de précipitations mensuelles ou annuelles sur l'ensemble du territoire français carroyé à maille de 5km »* (Bénichou, 1987). La méthode Aurelhy utilise, en partie, un « krigeage amélioré » pour mettre en relation la variable météorologique « précipitation » avec la topographie. Cette technique présente l'inconvénient de n'être applicable qu'à petite échelle (résolution spatiale de 5km et temporelle du mois). A une plus grande échelle (résolution de quelques centaines de mètres), mais pas encore suffisante pour une étude à l'échelle d'une parcelle agricole, le modèle Méso-Nh<sup>18</sup> de Météo-France permet de combiner l'information météorologique avec le relief et l'occupation du sol (Kastendeuch, 1996). Le modèle d'interpolation spatiale Aurelhy et le modèle physique Méso-Nh ne permettent pas de prendre en compte les variations de températures aux échelles mésolocales et microlocales. En effet, les mesures sur le terrain ont mis en évidence des variations de températures de plusieurs degrés sur une distance de quelques dizaines de mètres.

L'utilisation du Système d'Information Géographique (S.I.G.) semble être le moyen approprié pour la modélisation des températures aux échelles fines. Il offre la possibilité de mettre en relation des informations de nature (ex : occupation du sol, relief, variables

<sup>18</sup> Précisons que Méso-Nh n'est pas un modèle d'interpolation spatiale spécifique mais un modèle physique dont la spatialisation n'est qu'un produit.

météorologiques ou climatiques, ...) et d'échelles spatiales différentes. D. Joly et R. Fury (1994) considèrent qu'il « existe une convergence scalaire saisissante entre température et S.I.G. ». Leur méthode consiste à expliquer les variations spatiales de la température en combinant les paramètres appartenant à l'environnement des stations. Ce modèle matriciel aide à reconstituer des champs thermiques avec une résolution de 100 m de côté. L'environnement des stations météorologiques est analysé suivant les paramètres liés au relief (altitude, pente, ...) et à l'occupation du sol (nature du sol, végétation, ...). Ces diverses informations sont ensuite traitées statistiquement et incluses dans le S.I.G. raster. « Les modèles d'interpolation décomposent la variance globale en une variance régionale, qui prend en compte la position des stations dans l'espace Comtois et une variance d'échelle locale expliquée par huit éléments (topographie, nature de la surface du sol, ...). Ces modèles sont ensuite appliqués à un pixel privilégié (dont on connaît la température) afin d'envisager leur validation » (Fury et Joly, 1995). Cette technique présente l'intérêt d'expliquer les variations spatiales de la température à des niveaux d'échelles hiérarchiquement emboîtés (Joly et al., 1994).

L'interpolation des températures nocturnes à une échelle encore plus grande (microclimatique) nécessite l'utilisation d'un modèle ayant une résolution inférieure à 10 m. Or, le format raster n'apporte pas une précision suffisante. Pour toutes les opérations d'interpolation entre les différents postes de mesures, le format matriciel est nécessaire (réalisation des champs thermiques à l'échelle mésolocale). Mais pour la modélisation des effets microclimatiques - *blocage de l'air froid en amont des haies imperméables en situation radiative, secteur d'abri en aval des haies imperméables en situation advective*-, l'utilisation du format vectoriel semble plus adapté. La méthode de modélisation doit donc prendre en compte les deux modes. Malheureusement, peu de logiciels gèrent convenablement les traitements de formats vectoriels et matriciels (sauf Arc Info et Grass). Hormis l'affichage d'un fond raster dans un S.I.G. vectoriel ou la vectorisation automatique de données raster (Vidal et al., 1994), peu de S.I.G. fonctionnant sur un ordinateur PC contiennent toutes les fonctionnalités de l'un ou de l'autre mode. Cette question d'intégrer le raster et le vectoriel dans un S.I.G. unique est une préoccupation importante des géographes. D'ailleurs, lors du colloque Géopoint des 25 et 26 mai 1994 en Avignon, L. Sanders, P. Dumolard, F. Guarniéri et A. Ruas débattaient sur ce thème. Chacun a convenu que le S.I.G. ne devait pas être considéré comme un logiciel unique mais comme un ensemble de logiciels qu'il faut mettre en relation. « L'intérêt de ces différents outils est qu'ils ne sont pas conçus séparément pour répondre à un problème précis. L'utilisateur doit développer sa propre démarche, ses modèles. Le problème est ensuite technique : comment passer d'un outil à un autre. C'est la différence entre les S.I.G. développés dans une finalité précise et les S.I.G. « généralistes » » (Sanders et al., 1994). La mise en œuvre de ces diverses méthodes de spatialisation demande, au niveau informatique, la réalisation d'une « passerelle » entre les logiciels et les formats.

La modélisation des températures nocturnes et des risques de gel sur le site de Mallemort/Senas requiert la construction d'un S.I.G. qui gère les modes vectoriel et matriciel. Or, nous ne disposons que d'un logiciel vectoriel (Mapinfo). La notion de S.I.G. correspond ici à l'utilisation de deux logiciels (Mapinfo et Surfer) assurant les fonctions de traitement vectoriel et raster. La construction d'une « matrice vectorielle » (Bridier et al., 2002) permet

d'assurer une liaison entre les logiciels et les deux formats de données. Certaines couches d'informations, comme l'occupation du sol, sont directement intégrées dans le S.I.G. alors que d'autres nécessitent un traitement statistique préalable. C'est le cas des températures relevées sur divers points du site et des altitudes, dont l'interpolation spatiale réalisée sous une forme matricielle permet de reconstituer des champs de données (ex : Modèle Numérique de Terrain). En revanche, la modélisation des données météorologiques d'échelle microclimatique est représentée sous une forme vectorielle. Après divers traitements informatiques et statistiques, les variables, qui étaient de formats et d'échelles différents, sont intégrées à Mapinfo sous forme de couches qui peuvent être superposées et interrogées par des requêtes.

**Pour modéliser la répartition du gel en situation radiative**, on combine, au moyen du SIG, les données relatives à la température, au relief et à l'occupation du sol. Le traitement des températures s'effectue en format raster (mesures à l'échelle mésolocale) et en format vectoriel (mesures à l'échelle microclimatique). Les données relatives au relief sont traitées en format raster (MNT, calcul de pente, ...). Pour l'occupation du sol, la photographie aérienne et les observations de terrain permettent de construire une base de données vectorielles (localisation et caractérisation des haies, des cultures, ...). Puis, une « passerelle informatique » est utilisée pour combiner les couches d'informations rasters et les couches d'informations vectorielles. Les cartes résultantes de l'interpolation des températures (raster) peuvent être insérées dans le logiciel vectoriel (Mapinfo). La combinaison des données de relief raster et des données d'occupation du sol vecteur permet de construire les secteurs d'accumulation d'air froid en amont des haies imperméables, suivant la direction de la pente. Enfin, en confrontant la spatialisation des températures « *multi-échelles* » et la sensibilité du végétal dépendant de ses caractéristiques propres (espèces, variétés, niveau de croissance, ...), il est possible de cartographier le risque en situation radiative (fig 4.1).

**Pour estimer la répartition du gel en situation advective**, le S.I.G. est utilisé pour combiner les données relatives à la température, à la direction du vent et à l'occupation du sol. Les températures et l'occupation du sol sont traitées de la même manière que pour les situations radiatives. La méthode de la « passerelle informatique » est reprise pour les températures. Elle permet, dans le cas du gel advectif, de déterminer les zones d'abri en aval des haies imperméables en fonction de la direction du vent, puis de combiner les températures interpolées (mésolocales) avec le refroidissement supplémentaire susceptible de se manifester dans les zones d'abri. De la même manière que précédemment, la spatialisation des températures « *multi-échelles* » est combinée à la sensibilité du végétal pour cartographier le risque en situation advective (fig 4.2).

**Le risque de gel consécutif à un arrêt de mistral**, résulte de la combinaison des deux types de gel (radiatif et advectif). La modélisation de la répartition de ce type de gel dépend de la distribution temporelle de la phase advective, de l'arrêt et de la phase radiative. Il est donc nécessaire de prendre en compte la tranche horaire durant laquelle le vent commence à ralentir pour estimer correctement la spatialisation des risques :

## Données

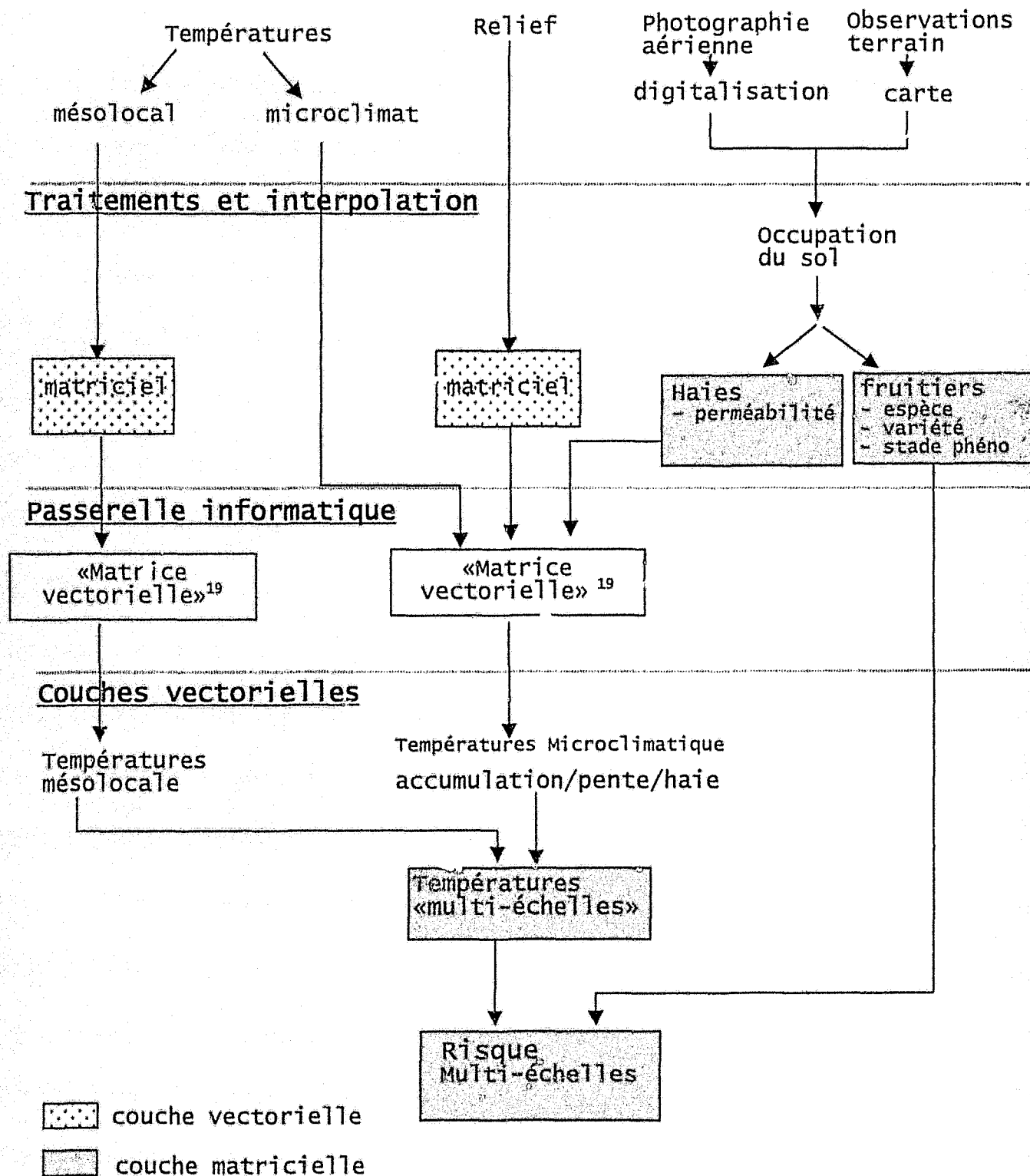


Fig 4.1 : Utilisation du SIG pour modéliser le risque de gel radiatif

<sup>19</sup> le terme de « matrice vectorielle » peut paraître ambigu, mais cette matrice est composée d'un ensemble d'objets vectoriels (carrés) formant une grille continue dans l'espace.

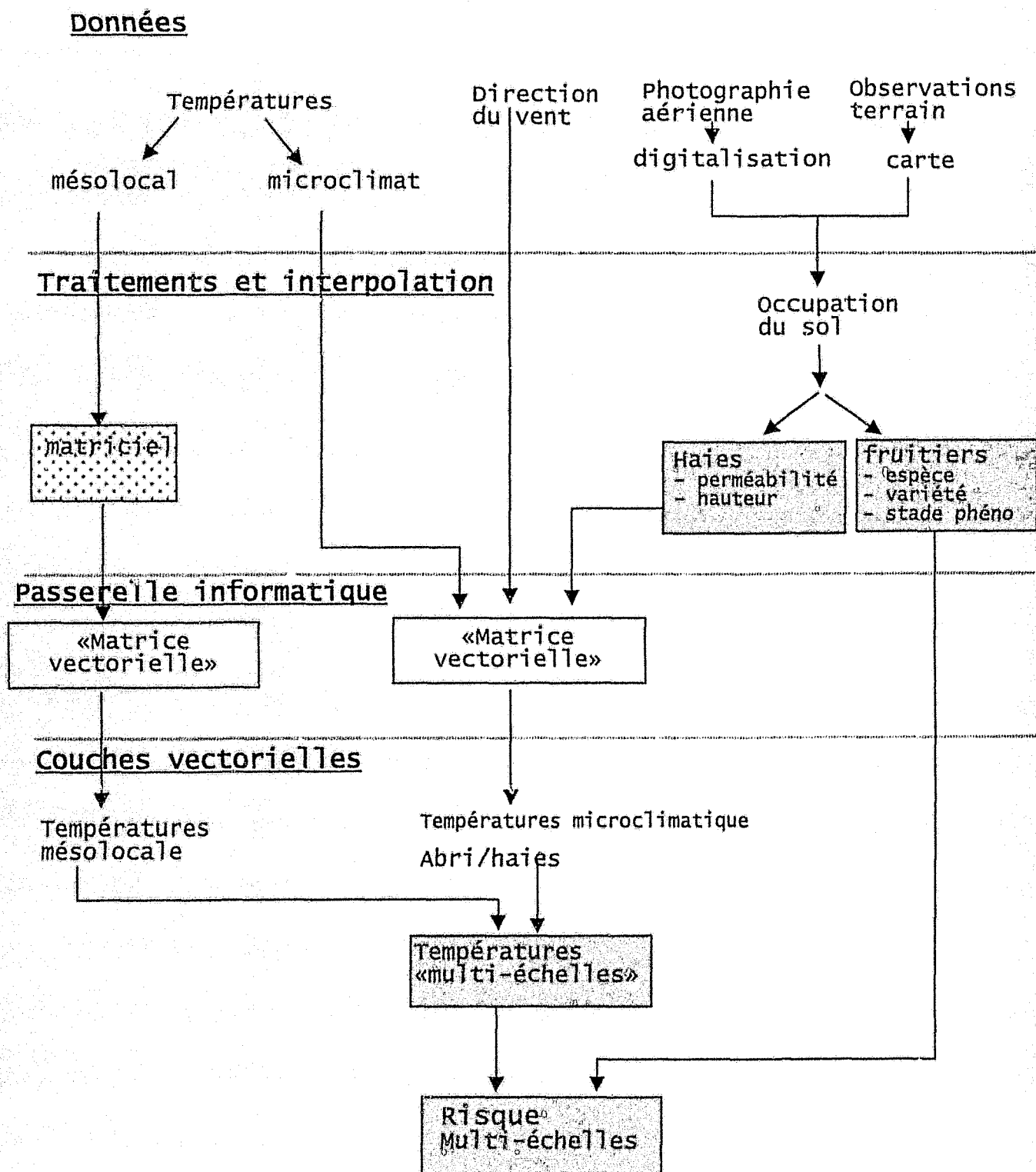


Fig 4.2 : Utilisation du SIG pour modéliser le risque de gel advectif

- ♦ si le vent s'arrête en début de nuit, la situation s'apparente rapidement au gel de type radiatif et sera traité comme tel ;
- ♦ si le vent s'arrête en fin de nuit, la situation correspond au gel de type advectif.

Les paragraphes suivant présentent, d'une part, les traitements en mode raster des températures (chap 1.2.1) et du MNT (chap. 1.2.2), en s'interrogeant particulièrement sur la méthode du krigeage et d'autre part, les traitements en mode vectoriel (chap 1.3). La méthode de la « matrice vectorielle » servant de passerelle informatique est présentée à la suite (chap 1.4).

## 1.2 Traitements des données en mode raster : le Krigeage ?

L'interpolation spatiale des données relevées sur des points répartis dans l'espace (mesures ponctuelles de températures ou fichiers d'altitudes) consiste à calculer par des méthodes statistiques les valeurs estimées entre les points réels. Le logiciel Surfer propose plusieurs méthodes de spatialisation à base géostatistique (*Triangulation de Delaunay, Nearest Neighbour, Inverse Distance to a Power, Krigeage, ...*). Le Krigeage semble être la méthode la « moins mauvaise » généralement utilisée pour traiter les températures et le relief. *Le Krigeage n'est régulièrement pas utilisé pour l'interpolation du relief car il devrait être soumis à certaines contraintes de façon à considérer les points remarquables du relief* (Arnaud et Emery, 2000). Toutefois, d'après Carrega, la méthode du Krigeage peut être utilisée pour l'interpolation des altitudes si le terrain est relativement plat.

Le principe de base du Krigeage est qu'à l'échelle de l'échantillon, chaque point est lié à ses voisins, sa structure spatiale est caractérisée par une fonction appelée variogramme et estimée à partir des couples de valeurs expérimentales obtenues aux points de mesures. « *Le krigeage permet d'évaluer en tout point d'une grille la valeur de la variable à partir de la pondération des valeurs mesurées autour de ce point, connaissant la structure spatiale de cette variable* » (Obledch, 1987 ; Carrega, 1994 et 1986).

$$Y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{j=1}^{N(h)} [Z_j(t) - Z_j(t+h)]^2$$

où  $N(h)$  est le nombre de couples de mesure de distance  $h$ ,

$Z_j(t)$  et  $Z_j(t+h)$  est le couple de points expérimentaux séparés de  $h$  (d'après Feyt *et al.*, 1995).

Le Krigeage parvient à utiliser au mieux la structure spatiale du champ à analyser, mais il ne faut pas oublier que quel que soit le procédé utilisé, la couche obtenue n'est qu'une estimation de la variable traitée. Il faut néanmoins limiter au mieux les erreurs qui peuvent accentuer les imprécisions dans cette estimation. « *Le Krigeage fonctionne bien quand les points sont bien répartis ; s'il y a des vides importants, la marge d'erreur est grande, c'est le cas notamment sur les marges du réseau utilisé pour l'interpolation ou dans les zones à faible densité* » (Bénichou *et al.*, 1987 ; Feyt *et al.*, 1995). Les incertitudes liées à la validité des postes de mesures ont été prises en compte, notamment dans le protocole de mesures où le choix des postes en fonction des échelles spatiales a été défini pour atténuer les effets microclimatiques (rayonnement de la haie, type de sol, ...). D'ailleurs, c'est l'avantage de

pouvoir déterminer soi-même l'emplacement du poste de mesures et de ne pas être tributaire des données. Toutefois, les points de mesures à l'échelle méso-locale ne sont pas répartis de façon homogène. La majorité des postes se situe à proximité du remblai. Par conséquent, les risques d'erreur pour l'interpolation sont plus importants dans les secteurs éloignés de la LGV. L'interpolation des températures par Krigeage est inadaptée dès que la topographie est tourmentée, elle est donc employée ici dans la zone plane (de plus aucun point de mesure n'est disposé sur les collines). Pour l'interpolation des altitudes, ce type d'imprécisions est limité car nous disposons de données régulièrement réparties (résolution de 75m). En conclusion, nous choisissons la méthode du Krigeage car elle est préconisée par certains auteurs (Carrega, 1994) pour ce type d'interpolation, mais la méthode d'interpolation n'a pas été définie en détails. Nous avons seulement utilisé la fonction « presse-bouton » du logiciel Surfer (Laborde, 2001).

### 1.2.1 Les champs de températures

Pour modéliser la répartition des températures à l'échelle mésolocale suivant les types de gel radiatif et advectif, nous avons utilisé les températures minimales (thermomètres à indice actinothermique) recueillies sur 15 points de mesures répartis sur l'ensemble du site. L'objectif est de modéliser le champ de températures et de représenter les modifications dues au remblai. Chaque point a été implanté de manière à limiter, le plus possible, les effets microclimatiques connus, notamment les blocages d'air froid en amont des haies. Le point n°12 (cf fig 2.57) est volontairement retiré lors de l'interpolation du fait de sa situation dans une zone d'accumulation d'air froid en amont d'une haie imperméable. L'interpolation des températures est représentée que dans le secteur « plat » correspondant à la surface agricole sensible (la zone des collines est exclue de la représentation cartographique). Les effets microclimatiques ne sont pas pris en compte dans l'interpolation par Krigeage. Ils sont modélisés par des objets vectoriels afin d'obtenir une précision à quelques mètres.

L'interpolation des températures est présentée pour trois dates (12-13 avril 1998 ; 19-20 avril 1998 ; 23-24 mars 1999) correspondant respectivement à une situation radiative, à une situation advective et à un arrêt de mistral en début de nuit.

#### Par nuit radiative :

L'interpolation des températures minimales de la nuit du 12 au 13 avril 1998 permet de calculer un champ de températures à l'échelle mésolocale. La carte montre une répartition distincte des températures de part et d'autre d'un axe nord-ouest/sud-est correspondant au remblai ferroviaire. Les effets de lissage dus aux calculs attribuent en certains endroits des températures plus élevées que celles qui ont été observées (fig 4.3a). L'imprécision sur l'estimation spatiale est liée à la répartition des postes de mesures. Le degré d'imprécision n'est pas « équiréparti » sur l'ensemble du site : il est plus important dans les zones à faible densité de postes (nord et sud-est du site) alors que l'interpolation peut approcher la réalité de façon plus satisfaisante dans les secteurs où l'on a disposé plus de postes (aux abords du remblai).

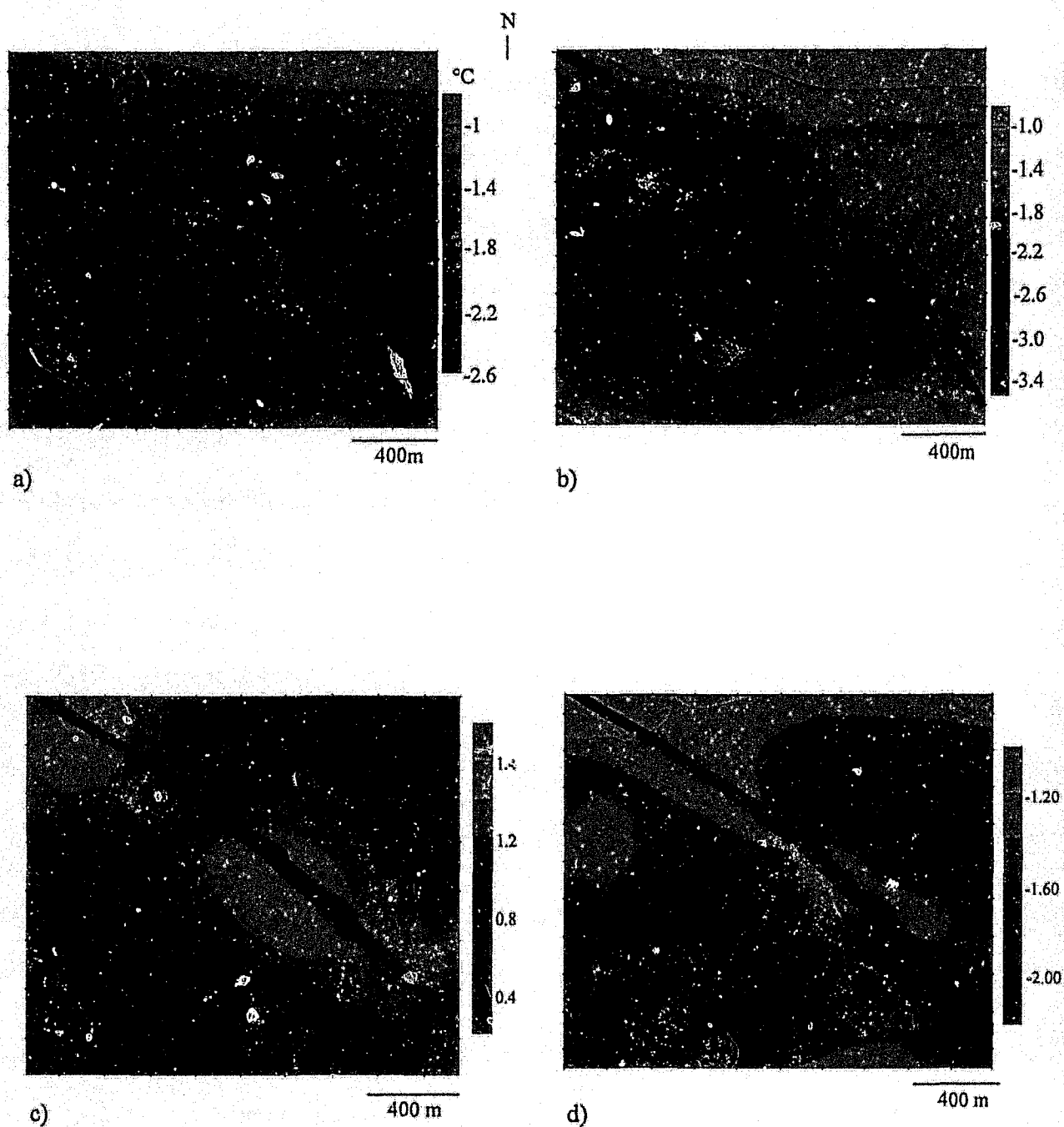


Fig 4.3 : Interpolation spatiale des températures minimales à l'échelle méso-locale (de part et d'autre de la LGV) :

- a) lors de la situation radiative du 12 au 13 avril 1998 (sans effet microclimatique)
- b) lors de la situation radiative du 12 au 13 avril 1998 (avec effet microclimatique)
- c) lors de la situation advective du 19 au 20 avril 1998
- d) lors de l'arrêt de mistral du 23 au 24 mars 1998.



Il est bien évident que l'interpolation représente une modélisation du champ de températures qui n'est pas totalement fidèle à la réalité. Cet outil mathématique est utilisé pour traduire les tendances dans la répartition des températures et mettre en évidence le rôle du remblai dans la sectorisation des zones « plus chaudes » et « plus froides » résultant d'une modification de l'aérologie.

Si on ajoute le point n°12, on constate qu'il présente des températures anormalement basses par rapport à celles enregistrées aux points de mesures les plus proches (fig 2.66). Sur l'exemple de la figure, on voit que le point 12 crée, à cause du calcul, un pôle froid qui s'étend dans un rayon de plusieurs dizaines de mètres, alors que dans la réalité, il s'agit d'un effet microlocal qui ne concerne qu'un secteur de quelques mètres carrés en amont d'une haie imperméable (fig 4.3b). L'utilisation de l'interpolation avec la méthode de Krigeage sur un nombre de points relativement restreint (15) nécessite donc de choisir avec soin l'implantation des points de mesures en fonction de leur environnement pour limiter les effets microclimatiques dans un calcul qui cherche à mettre en évidence les effets locaux.

#### Par nuit advective et arrêt de mistral

La modélisation du champ de températures en situation advective suit la même démarche que précédemment. L'exemple présenté est basé sur les températures minimales de la nuit du 19 au 20 avril 1998 durant laquelle le vent a chuté au lever du jour. De ce fait, on peut considérer que la nuit a présenté une situation advective. La répartition spatiale des températures est plus homogène qu'en situation radiative et conforme aux mesures météorologiques qui ont montré, à cette échelle, l'homogénéisation spatiale des températures par le vent. On distingue toutefois une large bande où les températures sont plus élevées et correspondant à l'implantation du remblai (fig 4.3c).

La nuit du 23 au 24 mars 1999, le mistral s'est arrêté vers 00h00, laissant place à un fort refroidissement de type radiatif. La répartition spatiale des températures est conforme aux résultats des mesures météorologiques. On distingue le secteur le plus froid au sud de la LGV vers les Méjeans. Le secteur le moins froid correspond à l'implantation du remblai (fig 4.3d).

Cette première étape permet de spatialiser le champ de températures à l'échelle mésolocale, en se soustrayant aux effets microclimatiques par le choix de l'implantation des capteurs. Cette cartographie représente une estimation destinée à comprendre la répartition des températures minimales à l'échelle mésolocale et non le moyen de calculer précisément une valeur réelle en un lieu donné.

### 1.2.2 Le Modèle Numérique de Terrain

Lors des situations radiatives nocturnes, la répartition du gel est en étroite relation avec les caractéristiques des écoulements gravitaires (Mahrt, 1986). Ces écoulements sont eux-mêmes conditionnés par les caractéristiques du relief (systèmes de dépression et de crête, direction et intensité de la pente). Ceux-ci peuvent être calculés à partir d'un MNT et d'un ensemble de traitements réalisés avec les fonctions « *Slope Angle*, *Aspect Ratio* » de Surfer.

Les altitudes proviennent du logiciel Visual Explorer (données Visual Dem) qui fournit ces données avec une résolution horizontale de 75 m et une résolution verticale de 1 m<sup>20</sup>. Le résultat des différents traitements est une table de données comportant la localisation X, Y (en mètres) dans un système de projection (Lambert 2), et l'orientation de la pente (en degrés). Les diverses opérations nécessaires à la réalisation du MNT sont décrites dans la thèse de Bridier S. (2001).

Sur le Modèle Numérique de Terrain, on distingue, au nord, le secteur subhorizontal correspondant au lit de la Durance où l'altitude varie de 100 à 105 m et au sud, les collines du Pas des Lanciers correspondant aux altitudes les plus élevées c'est-à-dire plus de 130 m (fig 4.4). Le champ des altitudes réparties régulièrement tous les 25 m permet de déterminer la direction des pentes.

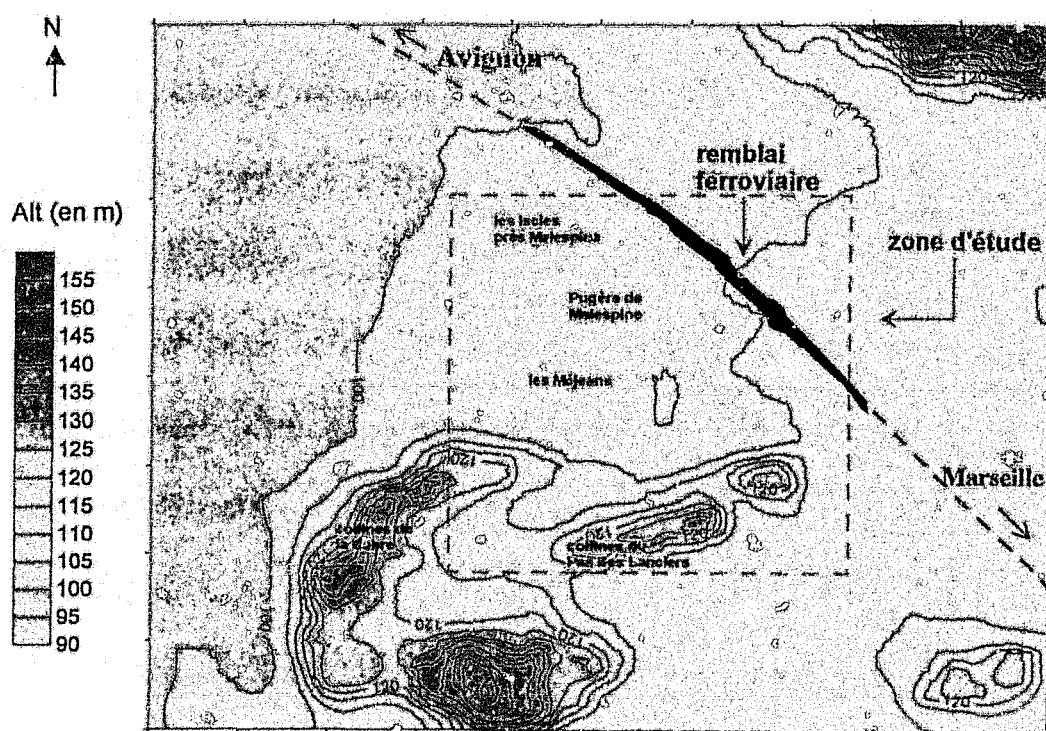


Fig 4.4 : Modèle Numérique de Terrain 2D du terrain expérimental de Mallemort/Senas à l'échelle méso-locale : (source : Visual Dem 75x75m résolution horizontale et 1 m de résolution verticale).

<sup>20</sup> Données d'altitudes Visual Dem validées par les courbes de niveaux de la carte IGN 1/25 000 (Scan 25).

### 1.3 Traitement des données relatives à l'occupation du sol en mode vectoriel

L'intégration de l'occupation du sol dans le S.I.G. passe par un traitement préalable de données en deux phases : tout d'abord, les objets sont représentés à partir de documents géoréférencés (photographie aérienne, cartes topographiques, plan de masse, fichiers numériques, ...) puis des informations complémentaires leur sont attribuées par l'intermédiaire d'une observation sur le terrain.

L'occupation du sol a été cartographiée à partir de cartes IGN 1/25 000, des plans du cadastre au 1/1000 des communes de Mallemort et de Sénas ainsi que d'une photographie aérienne orthorectifiée en couleur prise en avril 1998 après la construction de la ligne ferroviaire. La photographie aérienne est utilisée comme document d'appui pour répertorier les éléments du milieu. Les traitements propres à la télédétection pour reconnaître les objets n'ont pas été utilisés.

A l'aide de ces documents géoréférencés en Lambert 2 dans le S.I.G., nous représentons, sous la forme d'objets vectoriels (points, lignes et polygones), les parcelles agricoles, les haies brise-vent, les bâtiments, les réseaux (routiers et hydrographiques), et l'emprise du remblai. Afin d'obtenir plus de précisions sur les différentes caractéristiques de la ligne ferroviaire (emprise, remblai, merlon antibruit), nous utilisons les plans de masse (au 1/1 000 et 1/5 000) de RFF ainsi que les fichiers numériques X, Y et Z issus des relevés topographiques des géomètres. La résolution de la photographie aérienne 1/25 000 permet de cartographier l'occupation du sol (fig 4.5). Cependant, il n'est pas possible de déterminer certaines caractéristiques des objets reconnus par la télédétection comme par exemple, la nature, l'homogénéité et la hauteur des haies, les espèces et les variétés culturales de chaque parcelle.

Une campagne d'observation sur le terrain permet de valider l'occupation du sol (haie, culture) et d'affiner leurs caractéristiques (hauteur, nature, perméabilité des haies, espèces et variétés des cultures). Ces informations, qui ne sont pas accessibles par la photo-interprétation, sont nécessaires à l'étude du gel. Par exemple, la porosité des haies conditionne directement l'intensité du refroidissement dû au blocage de l'air froid.

La reconnaissance sur le terrain (travaux réalisés en mars 1997 et réactualisés en avril 2000) permet de dénombrer 365 haies et 166 parcelles fruitières sur la zone d'étude (échelle mésolocale) :

- Les haies sont caractérisées suivant leur nature (ex : conifère, feuillu, roseau), leur hauteur et leur perméabilité ;
- les parcelles sont définies suivant l'espèce (pomme, poire, pêche) et la variété (ex : pomme golden, poire Guyot ou William's). Durant les trois printemps (1998, 1999 et 2000), nous effectuons un suivi de chaque variété fruitière afin de connaître leur niveau de croissance (stade phénologique), du débourrement à la formation du fruit.

L'ensemble du traitement par photo-interprétation et de l'observation est synthétisé dans la carte de l'occupation du sol et sous la forme d'un tableau de données (fig. 4.6). Par exemple, on peut facilement localiser, par l'intermédiaire d'une requête, les parcelles constituées de cultures sensibles au froid (ex : espèces fruitières à floraison précoce -

*floraison mi-mars en moyenne-* pour la poire Harrow Sweet) ainsi que les obstacles capables de bloquer les écoulements gravitaires (ex : haies imperméables de conifères).

Les différentes couches d'informations (occupation du sol, MNT, champs de températures) créées doivent être intégrées dans le logiciel vectoriel (Mapinfo). Or, certains traitements sont réalisés en mode matriciel. L'intégration des effets micro-locaux nécessite la combinaison d'informations provenant de couches raster et vecteur. Par exemple, pour déterminer la zone d'accumulation située en amont des haies lors des situations radiatives, il est indispensable de connaître la porosité de la haie, sa position dans l'espace ainsi que la direction de la pente. Les haies représentent un fichier vectoriel alors que le relief est sous un support matriciel (MNT). Pour la mise en œuvre de ces méthodes de spatialisation, prenant en compte l'imbrication des échelles, il faut assurer une liaison entre le logiciel vectoriel dans lequel sera intégré l'ensemble des informations et le logiciel de traitements raster (Surfer). Il faut donc créer une « passerelle » entre les différents logiciels qui composent le S.I.G.

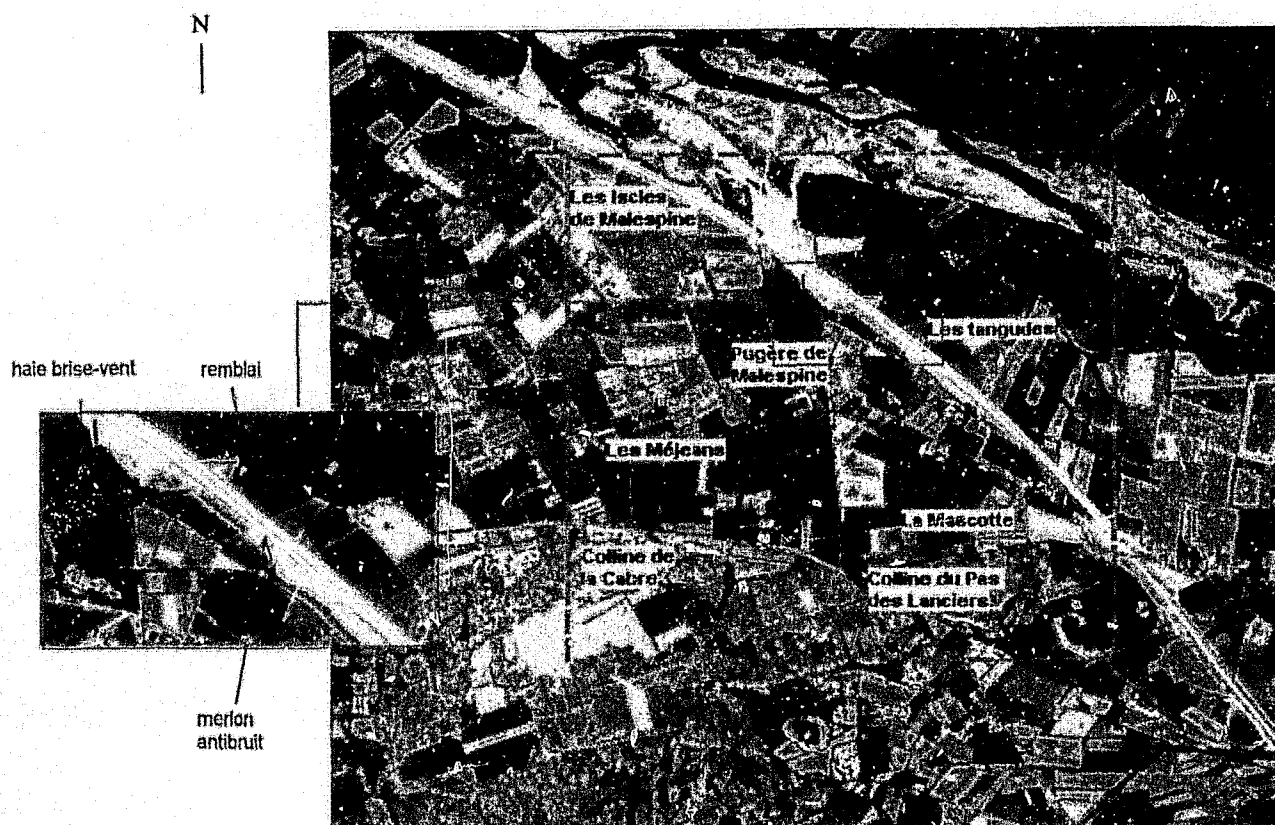
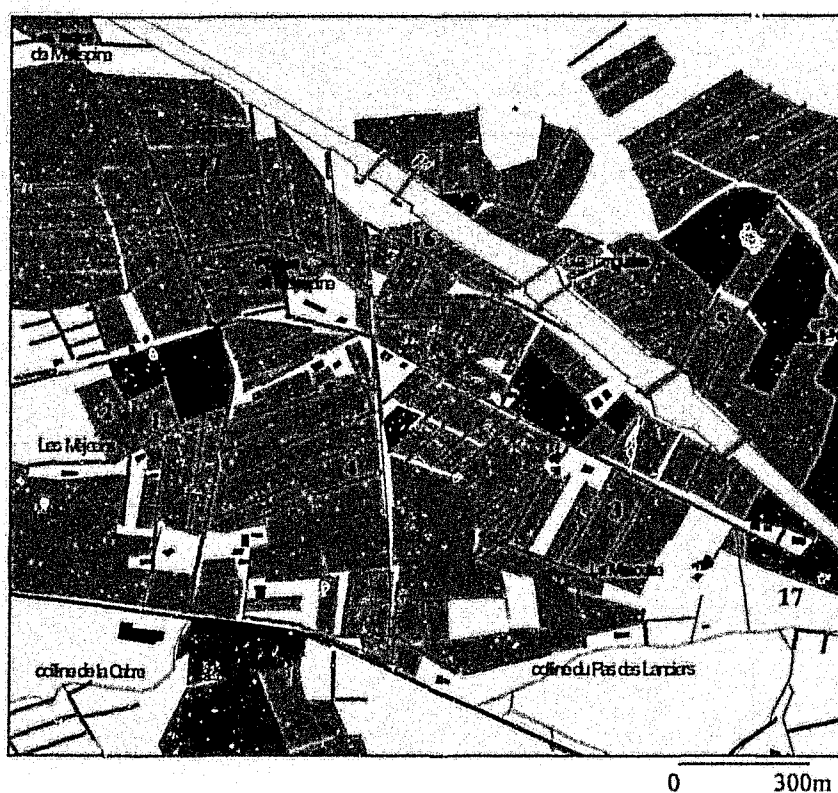


Fig 4.5 : Terrains expérimentaux de part et d'autre de la LGV sur les communes de Mallemort et Senas : (source : Aériol juillet 1998).



| n° parcelle | espèce | variété    |
|-------------|--------|------------|
| 1           | poire  | Guyot      |
| 2           | poire  | Guyot      |
| 3           | poire  | William's  |
| 4           | poire  | William's  |
| 5           | poire  | Conférence |
| 16          | pomme  | Gala       |
| 17          | vigne  |            |
| 18          | saule  |            |

#### Caractéristiques des parcelles

- arbres fruitiers
- maraîchage
- vignes
- friches
- autres
- haies imperméables
- haies perméables
- emprise ferroviaire
- ouvertures
- bâtiments
- routes
- RN7

Fig 4.6 : Occupation du sol sur le terrain expérimental de Mallemort/Senas à l'échelle méso-locale (état des lieux réalisé en avril 2000).

#### 1.4 « La matrice vectorielle » : une passerelle entre les logiciels et les différents formats de données (raster et vecteur)

Le terme de « matrice vectorielle » peut sembler paradoxal puisqu'il combine deux formats de données habituellement dissociés. La matrice est composée d'un ensemble d'objets vectoriels carrés qui forment une grille continue dans l'espace de travail. Cette grille constitue une image, *a priori*, raster dont les pixels ont des propriétés d'objets vectoriels. La matrice est le lien entre les logiciels composant le S.I.G., qui permet de mettre en relation les informations de formats différents (raster et vecteur) et d'échelles spatiales différentes (mésolocale et microclimatique).

Pour l'élaboration de la matrice, les points X et Y du MNT servent de base à la construction d'un ensemble de carrés (de 25 m de côté). Chaque carré est un objet vectoriel auquel peut être associé plusieurs attributs (altitude, pente, température,...) et constitue le pixel d'une matrice couvrant l'ensemble du site (annexe 10). C'est pour cette raison que les interpolations de données en mode raster sont effectuées suivant une résolution de 25 m de côté. Les attributs associés à chaque carré proviennent des traitements raster (interpolation des altitudes et des températures par krigeage), mais également de traitements vectoriels. Au final, l'exportation des données raster dans la « matrice vectorielle » n'engendre aucune modification au niveau de l'information (par exemple, les champs de températures contiennent toujours une valeur tous les 25 m), seul leur format est modifié. En mode raster, chaque pixel contient une information qu'il n'est pas possible de mettre en relation avec une autre information. Dans la « matrice vectorielle », chaque « pixel » contient plusieurs informations qui peuvent être combinées par l'intermédiaire des requêtes du logiciel vectoriel.

L'exemple des figures 4.7 et 4.8 montre comment les données contenues dans une image raster (interpolation dans Surfer) sont exportées pixel par pixel dans les carrés de la matrice vectorielle, et par conséquent, intégrées dans le logiciel vectoriel Mapinfo. Chaque carré peut contenir les données provenant de plusieurs images raster. L'exemple d'un point quelconque de coordonnées X, Y explique comment les informations d'altitude Z, d'orientation de la pente  $\alpha$  et de température T°C, précédemment dissociées, deviennent les attributs d'un même objet.

La matrice est le moyen de mettre en relation l'occupation du sol (vecteur), les traitements du MNT (raster) et l'interpolation des températures (raster) issue des mesures de terrain. Un exemple concret concerne la modélisation des effets microlocaux des haies brise-vent imperméables sur les températures en situation radiative. Le calcul de la zone d'air froid en amont des haies imperméable nécessite la connaissance de la pente et de la position des haies. Ces informations sont de formats différents avant l'utilisation de la « matrice vectorielle ».



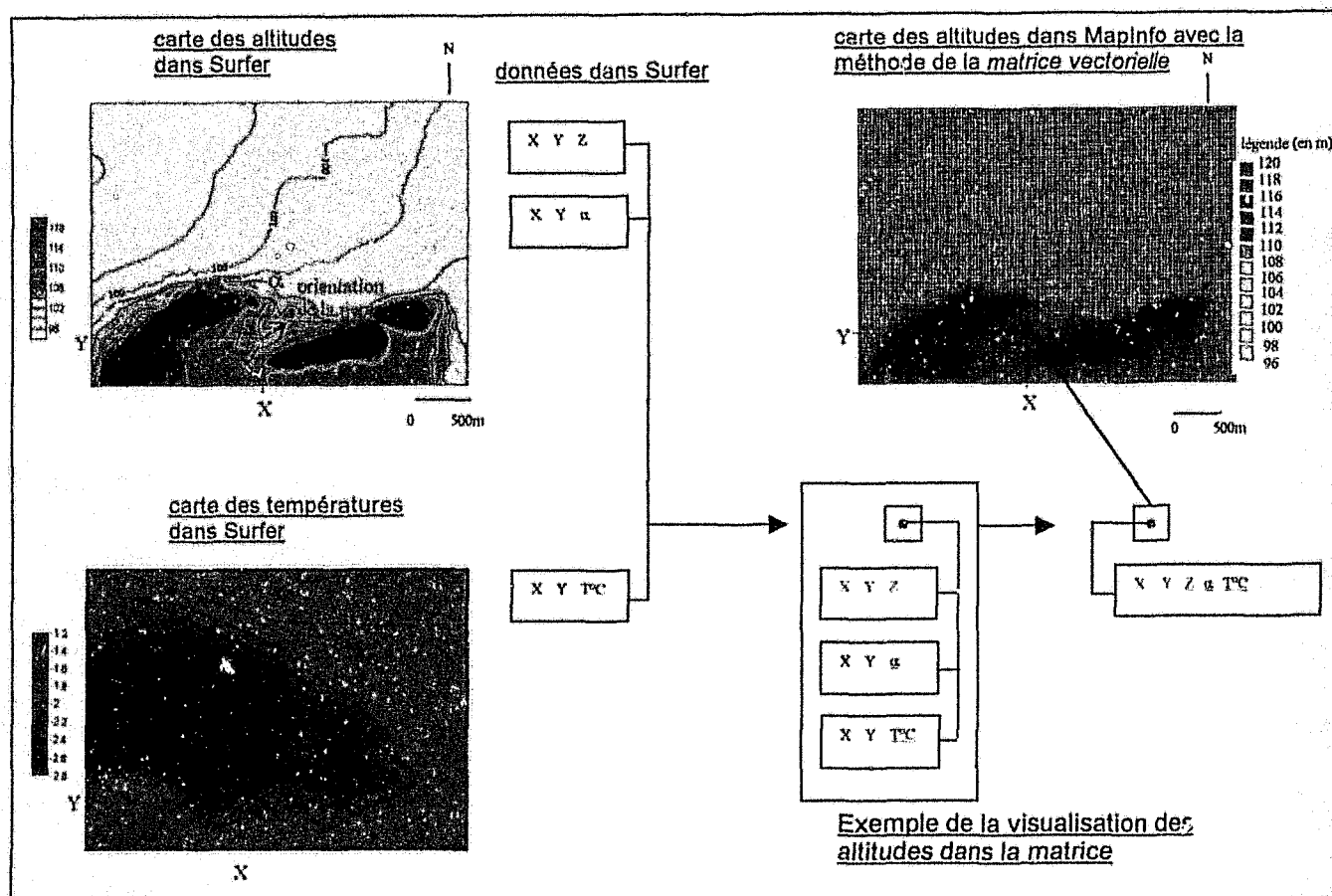


Fig 4.7 : Utilisation de la « matrice vectorielle » comme passerelle informatique permettant d'intégrer des données matricielles dans un S.I.G. vectoriel.

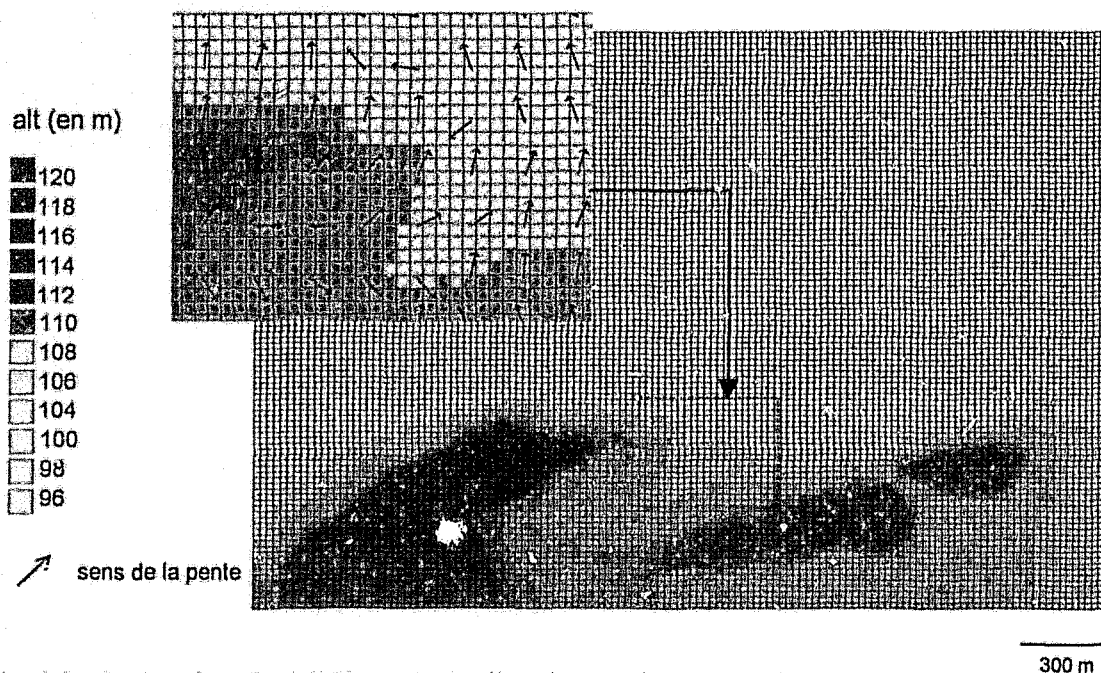


Fig 4.8 : Intégration du MNT et de la direction de la pente à l'échelle méso-locale dans la « matrice vectorielle ».

## 1.5 Intégration des données météorologiques d'échelles microclimatiques : précision indispensable du mode vectorielle

La modélisation des températures influencées par des effets microlocaux demande une méthode différente de celle employée précédemment. En effet, les pixels de 25 m ne sont pas assez précis et l'interpolation des données par un modèle à base géostatistique n'est pas satisfaisante (fig 4.3b). Afin d'obtenir une précision à quelques mètres près, le mode vectoriel s'avère le mieux adapté. A cette échelle spatiale, quel que soit le type de refroidissement, la haie brise-vent est l'élément principal qui modifie le champ de températures : par temps radiatif, les haies imperméables, dont l'orientation favorise un effet de barrage en travers de la pente, accentuent le refroidissement en amont ; en situation advective ou d'arrêt de mistral, le secteur abrité du vent, en aval des haies imperméables, subit également un refroidissement plus important. Les nombreuses nuits de mesures sur le terrain ont permis de définir des données moyennes déterminant la baisse de température engendrée par les haies brise-vent ainsi que les surfaces agricoles concernées par ce refroidissement supplémentaire. Ces informations servent de base de données à la matérialisation - *par l'intermédiaire « d'objets surfaciques vectoriels »* -, sur l'ensemble du site, des secteurs où la température est modifiée par la présence des haies.

### 1.5.1 Modélisation du blocage de l'air froid en amont des haies imperméables en situation radiative

En situation radiative, l'air s'écoulant le long de la pente peut être ralenti ou bloqué par une haie brise-vent imperméable. A l'échelle de la parcelle, on distingue un secteur de quelques dizaines de mètres carrés en amont de la haie où l'air froid n'est plus en mouvement et subit un refroidissement supplémentaire. La modélisation de ce phénomène fait appel à une information et à une requête vectorielle (localisation et sélection des haies imperméables), ainsi qu'à une information raster (orientation de la pente). On considère que la haie joue localement le rôle d'un obstacle qui favorise l'accumulation de l'air froid se déplaçant sous l'action de la gravité. L'ensemble des mesures météorologiques a permis de fixer empiriquement un « coefficient de refroidissement supplémentaire » d'au moins  $-1,5^{\circ}\text{C}$ . On estime que l'extension de la surface d'accumulation d'air froid est sensible jusqu'à environ 25 mètres de l'obstacle lorsque celui-ci est perpendiculaire à l'écoulement. Les observations ont montré que la zone d'accumulation n'est significative que dans le cas où l'angle formé par la haie et la pente est compris entre 60 et 120 degrés (90 degrés correspondant au cas où la pente est orthogonale à la haie). En dehors de cette « fourchette empirique », nous estimons que l'air froid continue son déplacement le long de la haie (annexe 11). Ces valeurs sont définies afin d'effectuer une modélisation des secteurs influencés par les haies imperméables. Mais il ne s'agit pas de représenter exactement la réalité et il est possible que sur certaines parcelles, le refroidissement induit par la haie et la surface concernée soit quelque peu différente. L'objectif est de présenter une méthode de localisation des portions de parcelles influencées par des éléments d'échelle microclimatique sur l'ensemble du site.

La méthode utilise deux types d'information pour déterminer les zones d'accumulation : la base de données contenant les haies (localisation et caractéristiques) et le



MNT, exporté dans la matrice, à partir duquel sont déterminées les caractéristiques de la pente en chaque point de la grille (fig 4.8). Afin de mettre en relation les haies et la direction de la pente, les fonctions vectorielles de Mapinfo sont combinées avec la matrice. Chaque haie est associée à la pente du pixel qui la supporte. La haie est découpée en fonction du pixel. Elle devient donc une succession de portions de haie conservant à la fois les attributs de la haie d'origine (perméabilité) et du pixel (sens de la pente). La zone d'accumulation définie suivant le sens de l'écoulement et la position de la haie est calculée pour chaque carré de la matrice contenant un segment de haie (fig 4.9).

La zone d'accumulation est un parallélogramme ABCD dont l'un des côtés correspond à la haie, et dont l'extension est fonction de la direction de la pente et de la perméabilité de la haie. Pour obtenir les coordonnées manquantes du parallélogramme, il faut projeter le vecteur direction à partir des extrémités de la haie. Ainsi en utilisant les coordonnées de A et de B, et le vecteur V, on obtient les coordonnées de C et D :

$$\begin{array}{ll} \text{C :} & X_c = X_b - (X_{v2} - X_{v1}) \quad \text{D :} \quad X_d = X_a - (X_{v2} - X_{v1}) \\ & Y_c = Y_b - (Y_{v2} - Y_{v1}) \quad \quad \quad Y_d = Y_a - (Y_{v2} - Y_{v1}) \end{array}$$

En pratique, les coordonnées des haies de MapInfo sont exportées vers un tableur afin de calculer les coordonnées de C et D. L'ensemble des coordonnées de A, B, C et D est ensuite importé dans MapInfo qui peut créer les parallélogrammes matérialisant les zones d'accumulation en amont des haies imperméables (fig 4.9).

Ce calcul est ensuite réalisé pour l'ensemble des haies imperméables générant un blocage de l'air froid. La modélisation des effets microclimatiques sous la forme d'objet vectoriel surfacique s'applique également au secteur d'abri en aval des haies imperméables en situation advective ou d'arrêt de mistral. Dans ce cas, il s'agit de l'interaction entre la haie et la direction du vent (mistral).

#### 1.5.2 Modélisation des zones d'abri en aval des haies imperméables en situation advective

Au cours d'une advection d'air froid, l'espace immédiatement en aval des haies brise-vent imperméables est protégé du vent. L'air de la couche limite n'étant plus brassé par le vent, les déperditions radiatives provoquent un refroidissement important dans cette portion d'espace. La modélisation de ce phénomène d'échelle microclimatique consiste à définir les secteurs où le refroidissement est accru par les haies imperméables.

Pour réaliser les traitements sur le rôle des haies, nous utilisons les données relatives aux haies (coordonnées géographiques, hauteur et perméabilité), ainsi que la force et la direction du vent. A partir des travaux de Guyot (1991) et de Castaner (1984), une distance de protection est déterminée en fonction de la vitesse du vent et des caractéristiques de la haie. Ces calculs sont développés pour définir les effets mécaniques du vent pour des vitesses élevées. Les effets de protection sont relatifs à la vitesse du vent sur une distance qui est toujours fonction de la hauteur et de la nature de la haie. Il est donc envisageable de simuler la surface de la zone calme située en aval de la haie en situation advective ou d'arrêt de mistral.

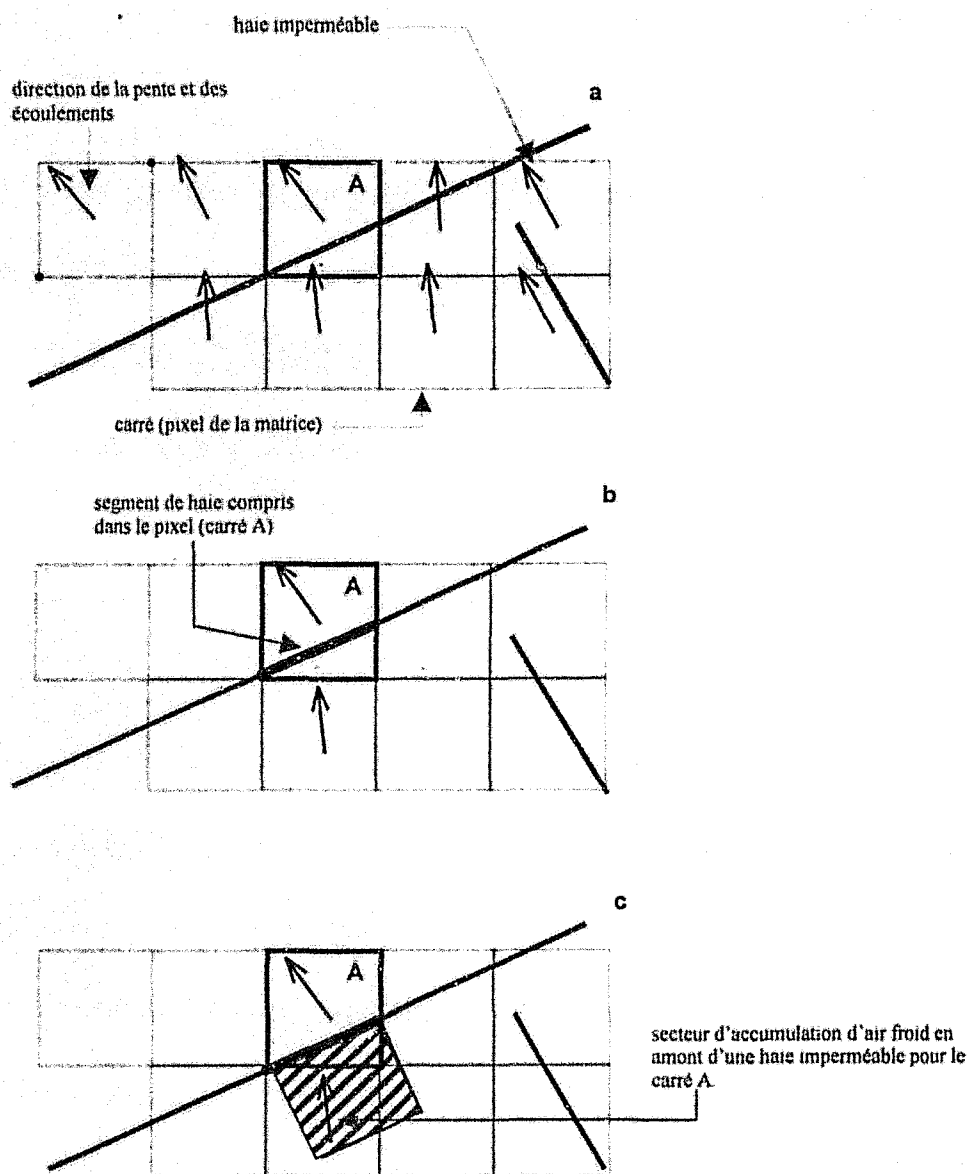


Fig 4.9 : Représentation de la zone d'accumulation d'air froid en amont des haies imperméable en fonction de la direction de la pente (exemple pour le carré A).

- a) Visualisation des pentes, des haies et de la matrice
- b) Exemple de découpage en segments d'une haie par un carré
- c) Construction du parallélogramme représentant la zone d'accumulation d'air froid

#### Partie 4 : Modélisation des risques climatiques induits par le remblai

La relation entre les caractéristiques des haies (perméabilité, hauteur) et la zone calme est déterminée par des mesures aux abords de différents types de haie. L'écart moyen de la température entre le point de mesure situé immédiatement en aval de la haie imperméable et celui sur le secteur brassé par le vent est d'environ 1°C. La distance empirique est fixée à partir des données expérimentales : la longueur du secteur abrité représente près de 2.5 fois la hauteur de la haie.

Pour déterminer au mieux la surface de calme générée par chaque haie, nous utilisons une combinaison de calculs vectoriels. Les coordonnées X et Y des extrémités de chaque haie sont extraites de la base de données. Puis nous appliquons un vecteur vent qui permet de calculer les coordonnées de la zone de calme correspondant à un parallélogramme. Soit une haie H1 dont les extrémités sont nommées A: (Xa,Ya) et B : (Xb,Yb), le vecteur vent est caractérisé par un couple de coordonnées (Xv1,Yv1 ; Xv2,Yv2). Le coefficient H relatif à la haie est défini en premier lieu par la perméabilité. Si la haie est imperméable, il y a une zone de calme, si la haie est perméable, il y a toujours un léger brassage qui limite le refroidissement. En deuxième lieu, la hauteur définit l'extension de la zone calme.

La zone calme est un parallélogramme ABCD dont l'un des côtés correspond à la haie, et dont l'extension est fonction du vent et de la hauteur de la haie. Pour obtenir les coordonnées manquantes du parallélogramme, il faut projeter le vecteur à partir des extrémités de la haie. Ainsi, en utilisant les coordonnées de A et de B, et le vecteur V, pondéré par le coefficient H, on obtient les coordonnées de C et D :

$$\begin{array}{ll} \text{C : } X_c = X_b + ((X_{v2} - X_{v1}) * H) & \text{D : } X_d = X_a + ((X_{v2} - X_{v1}) * H) \\ Y_c = Y_b + ((Y_{v2} - Y_{v1}) * H) & Y_d = Y_a + ((Y_{v2} - Y_{v1}) * H) \end{array}$$

En pratique, les coordonnées des haies de MapInfo sont exportées vers un tableur afin de réaliser le calcul des coordonnées de C et D. Ensuite, l'ensemble des coordonnées de A, B, C et D est importé dans MapInfo afin de créer les parallélogrammes matérialisant les zones de calme en aval des haies imperméables (fig 4.10).

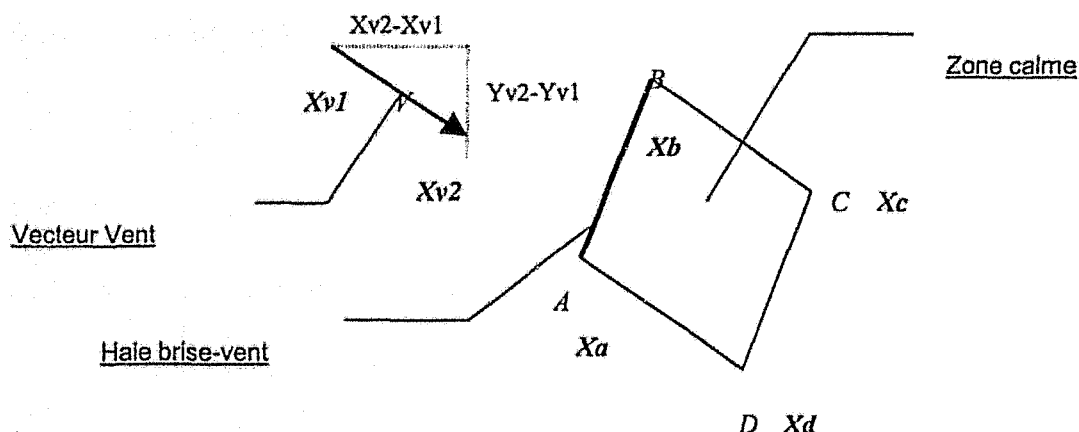


Fig 4.10: Construction de la zone d'abri du mistral en aval de la haie brise-vent.

Grâce à l'utilisation du mode vectoriel pour modéliser les effets microlocaux, on peut définir précisément les surfaces concernées. Cette méthode est applicable à l'ensemble des facteurs d'échelle microclimatique comme par exemple, la simulation du secteur à proximité des haies (distance d'environ 2H) bénéficiant d'un apport thermique d'environ 1°C par réémission du rayonnement infrarouge.

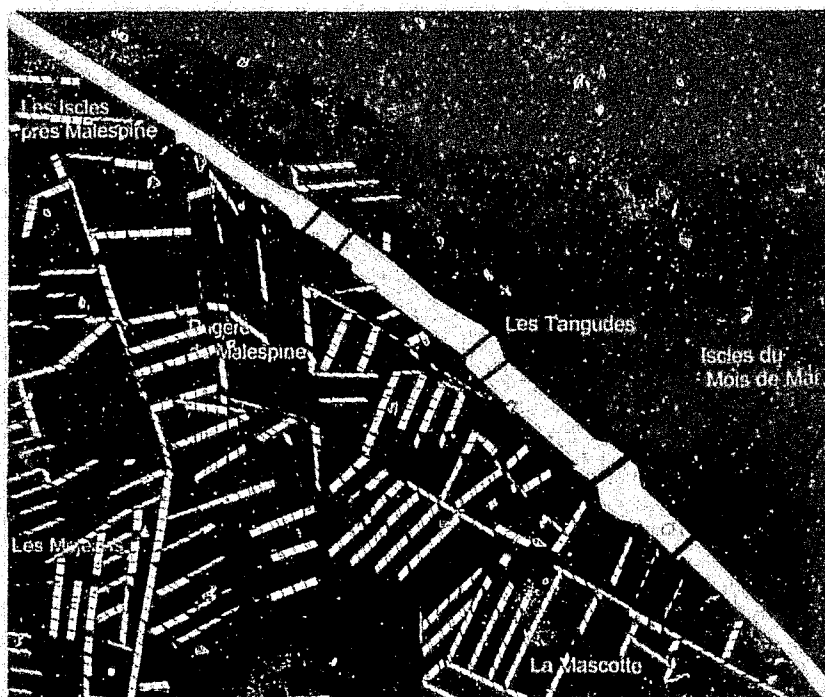
Les données météorologiques obtenues à différentes échelles sont modélisées suivant des méthodes différentes. Elles représentent des couches spécifiques dans la S.I.G. La superposition des couches va permettre de prendre en compte l'imbrication des échelles et de réaliser une cartographie, aux échelles fines, des secteurs agricoles où le risque gélif est accentué par le remblai ferroviaire.

## **1.6 S.I.G. : système de modélisation spatiale du risque gélif prenant en compte l'imbrication des échelles**

### **1.6.1 Cartographie des températures minimales de la nuit**

Après plusieurs traitements informatiques, les données météorologiques sont intégrées dans le logiciel vectoriel Mapinfo. Nous obtenons une cartographie des températures minimales aux échelles spatiales « mésolocale » et microclimatique pour les nuits du 12-13 avril 1993, du 19-20 avril 1998 et du 23-24 mars 1999.

Pour la nuit radiative du 12-13 avril 1998, le champ des températures minimales est associé aux parallélogrammes matérialisant les surfaces d'accumulation en amont des haies imperméables. Le coefficient de -1.5°C est attribué au niveau des zones d'accumulation afin d'accentuer localement les basses températures (coefficient empirique déterminé après les mesures météorologiques). Au final, la figure 4.11a montre à la fois le champ de température à l'échelle méso-locale (températures plus froides au sud du remblai ferroviaire) et les effets d'accumulation le long des haies. On distingue aussi la transgression localisée de l'air froid au niveau de l'ouverture. Les effets microclimatiques sont représentés soit sous une forme vectorielle ou matricielle. Le mode matriciel permet d'attribuer une température au pixel en fonction de l'élément d'échelle microclimatique. Inversement, le pixel étant de 25m\*25m, la précision n'est pas optimum. Par exemple, certaines portions de parcelles situées à l'aval des haies bloquant l'air froid sont comprises dans le même pixel que la zone froide (fig 4.11b). Avec le mode vectoriel, la délimitation du secteur influencé est plus précise, mais ce format limite les traitements : on ne peut pas attribuer de valeur de températures à ces zones et nous savons seulement que ces secteurs subissent un refroidissement plus intense.

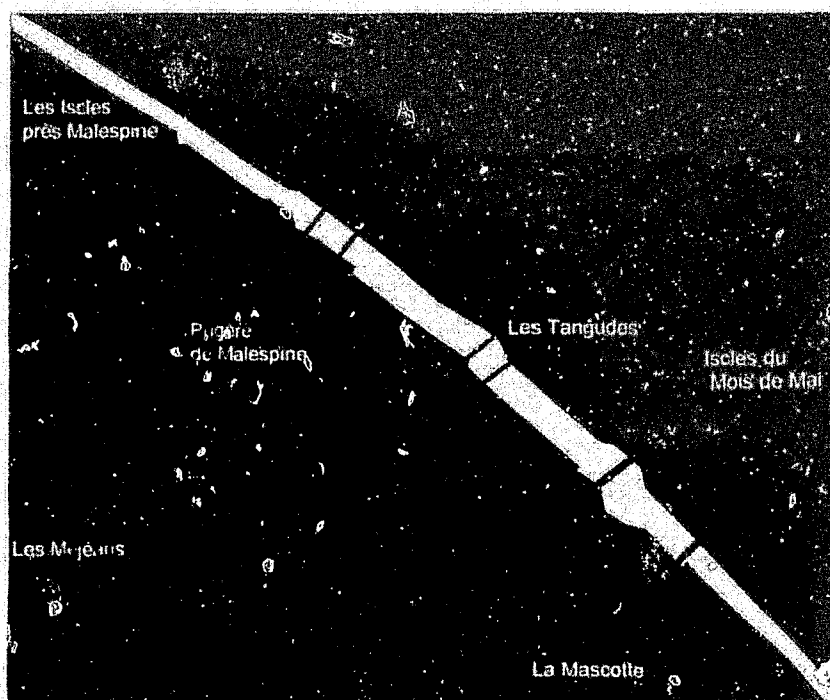


Les parallélogrammes en amont des haies représentent les secteurs d'accumulation d'air froid définis en fonction de l'angle de la pente et de la position de la haie (coefficient de  $-1,5^{\circ}\text{C}$  par parallélogramme).

a)

$T^{\circ}\text{C}$

|   |      |
|---|------|
| ■ | -1,2 |
| ■ | -1,4 |
| ■ | -1,6 |
| ■ | -1,8 |
| ■ | -2   |
| ■ | -2,2 |
| ■ | -2,4 |
| ■ | -2,6 |
| ■ | -3,2 |
| ■ | -3,4 |
| ■ | -3,6 |
| ■ | -4,6 |



b)

300 m

haies brise-vent



ouvertures sous le remblai



infrastructures ferroviaires

Fig 4.11 : Interpolation spatiale des températures minimales aux échelles méso-locale et microclimatique en situation de gel radiatif : (12-13/04/1998)

a) représentation en modes vectoriel et matriciel

b) représentation en mode matriciel.

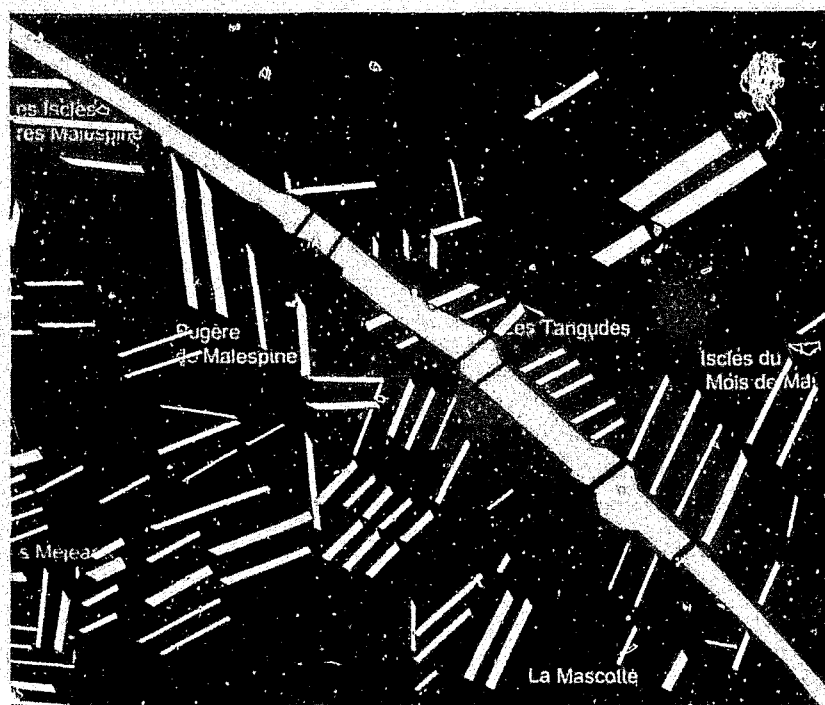
Pour la nuit du 19 au 20 avril 1998, la superposition des couches de températures aux deux échelles spatiales montre une variabilité thermique plus importante à l'échelle parcellaire. L'écart de température maximal sur le champ de température à l'échelle mésolocale n'excède pas  $1^{\circ}\text{C}$  alors qu'il est de  $1,5^{\circ}\text{C}$  entre la surface à l'abri de la haie imperméable et celle brassée par le vent. Le mistral s'étant arrêté en fin de nuit, la formation d'écoulements est très limitée. Il n'y a donc pas de blocage d'air froid en amont des haies imperméables. Les deux modes de représentation - matriciel et vectoriel - impliquent les mêmes avantages et inconvénients que dans l'exemple précédent. En mode raster, les zones d'abri ne sont pas définies précisément, alors qu'en mode vectoriel, les secteurs les plus gélifs sont plus précis mais les températures ne sont pas attribuées à chaque parallélogramme (fig 4.12a).

Pour la nuit d'arrêt de mistral du 23 au 24 mars 1999 (arrêt de mistral après une journée ensoleillée), le principe de superposition des couches est le même. L'arrêt de mistral se produisant en milieu de nuit, le refroidissement radiatif est important. Les mesures météorologiques ont permis d'observer des accumulations d'air froid dans le secteur subhorizontal des Méjeans et en amont des haies imperméables (fig 4.12b). Les effets microclimatiques sont représentés de la même manière que pour la situation de gel radiatif (parallélogrammes en amont des haies imperméables avec un coefficient de  $-1,5^{\circ}\text{C}$ ).

#### 1.6.2 Cartographie du risque gélif imputable au remblai de la LGV

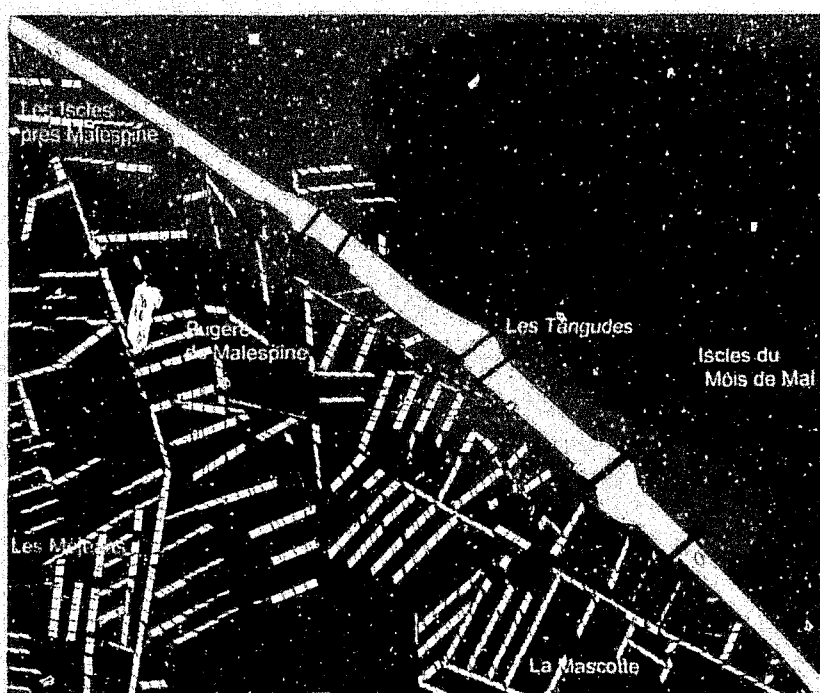
La modélisation spatiale du risque gélif accru par le remblai ferroviaire et les haies brise-vent imperméables est réalisée en combinant la couche des températures minimales d'un type de gel et la couche des cultures fruitières définie suivant la sensibilité des espèces et des variétés. La majorité des arbres fruitiers cultivés dans le Sud-Est de la France sont vulnérables au fort refroidissement printanier. L'atout majeur de l'arboriculture, dans cette région étant la précocité des récoltes, les espèces et variétés cultivées fleurissent généralement entre le 15 mars et le 15 avril. On ne trouve pas ces variétés à croissance précoce dans les régions où le gel printanier est beaucoup plus fréquent et plus intense. Dans le centre de la France, par exemple, les variétés de pommes et de poires cultivées sont beaucoup plus résistantes au gel et fleurissent vers la fin du mois d'avril.

Le niveau de résistance des espèces fruitières n'est pas fixe et il décroît régulièrement entre la levée de dormance (reprise de croissance) et la formation du fruit. D'après les stades phénologiques définis par Fleckinger (1948), le seuil de températures critique pour les pommiers varie de  $-7^{\circ}\text{C}$  au début du gonflement du bourgeon à  $-1,6^{\circ}\text{C}$  pendant la nouaison. Par conséquent, la modélisation du risque gélif est différente suivant la période où se produit le refroidissement nocturne. Si l'épisode gélif se produit vers la mi-mars, les espèces et variétés fruitières à floraison précoce seront les plus exposées alors que si le gel intervient à la fin du printemps, l'ensemble des arbres fruitiers sera soumis à ce risque. La modélisation du risque gélif des arbres fruitiers à l'échelle climatique est complexe du fait de l'hétérogénéité temporelle du niveau de résistance des organes végétatifs. Toutefois, nous pouvons établir deux cartes représentant différentes phases du printemps en fonction des périodes de floraison des espèces et des variétés fruitières.



a) Les parallélogrammes blancs représentent les secteurs d'abri en aval des haies imperméables

300 m



b) parallélogrammes blancs : zone d'accumulation supplémentaire d'air froid (environ -1,5°C)

300 m

Fig 4.12 : Interpolation spatiale des températures minimales aux échelles méso-locale et microclimatique en situation de gel advectif (a) et d'arrêt de mistral (b)

a) représentation en modes vectoriel et matriciel (19-20/04/1998)

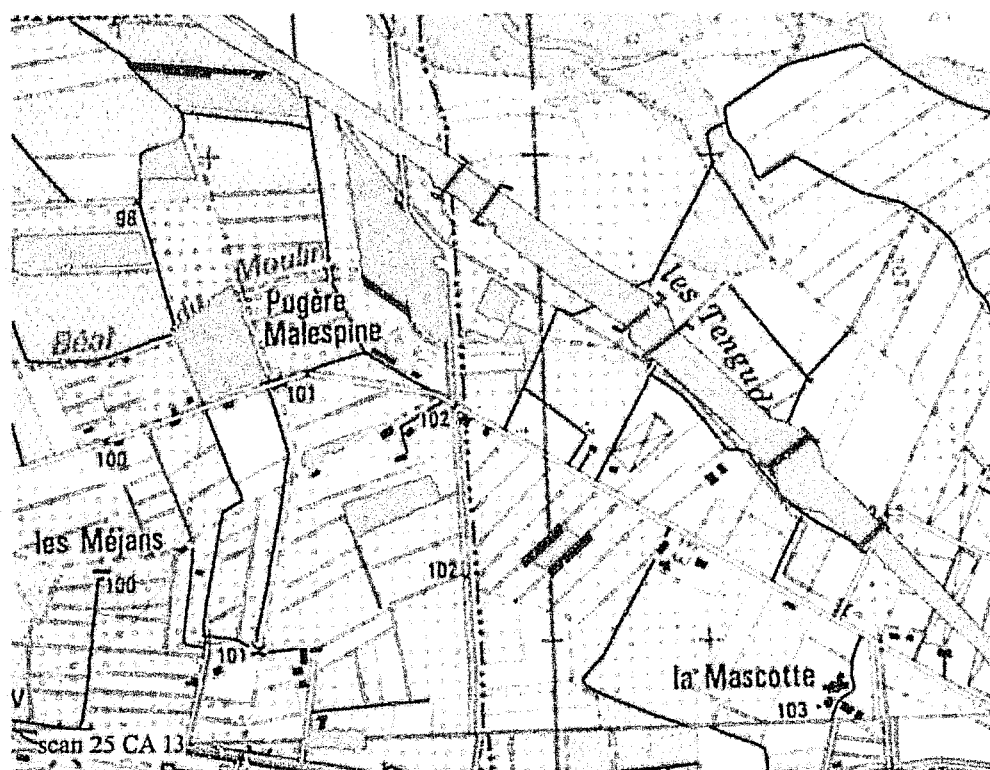
b) représentation en modes vectoriel et matriciel (23-24/03/1999).

Entre février et mars, les fruits à noyau sont les plus exposés. La floraison de l'ensemble des variétés de pêchers, de pruniers et d'abricotiers a lieu entre le 15 février et le 30 mars (Ctifl, 1998). Quelques variétés de poires, comme la variété Harrow Sweet, fleurissent également durant cette période. Le risque de dégâts sur ces variétés est accentué par l'intensité et l'occurrence des épisodes gélifs qui sont beaucoup plus importants au début du printemps. En cette saison, le bilan énergétique n'est pas encore suffisamment fort pour limiter les refroidissements nocturnes radiatifs. En prenant l'exemple de la modélisation des températures (multi-échelles) de la nuit de type radiatif du 12 au 13 avril 1998 (fig. 4.11), nous estimons la surface à risque gélif radiatif accru par le remblai est d'environ 15,5 ha (fig 4.13a). Il s'agit des parcelles à floraison précoce situées dans la zone d'abri, au sud de la ligne ferroviaire. A l'échelle parcellaire, la surface où le refroidissement est accentué par le blocage d'air froid en amont des haies imperméables (au moins  $-1,5^{\circ}\text{C}$ ) est estimée à moins d'1 ha. A cette échelle, la vulnérabilité du végétal lié au niveau de croissance est variable suivant la position sur la parcelle. Du côté ombragé de la haie, les rangées d'arbres peuvent avoir un retard végétatif de plusieurs jours par rapport au côté ensoleillé. Sur le site expérimental, la majorité des zones d'accumulation d'air froid en amont des haies correspondent aux secteurs ensoleillés. La probabilité d'un refroidissement supplémentaire et d'une croissance végétative plus rapide accentuent le risque de gel pour ces portions de parcelles.

A partir de la mi-avril, l'ensemble des variétés de poires et de pommes fleurissent et les boutons floraux sont de plus en plus vulnérables aux basses températures. En moyenne, d'après les seuils de sensibilité, ils peuvent résister à des températures minimales de l'ordre de  $-3$  à  $-2^{\circ}\text{C}$  (Ctifl, 1998). Pour les pêchers et les pruniers, qui sont au stade de la nouaison, le seuil critique est d'environ  $-1^{\circ}\text{C}$ . Considérant que l'ensemble des cultures fruitières est sensible aux basses températures à cette période, on estime que près de 104 ha de parcelles fruitières se situent dans le secteur où le remblai est responsable d'une augmentation du refroidissement radiatif, dont 7 ha subissent un risque supplémentaire provenant du blocage de l'air froid par les haies imperméables (fig 4.13b). Ces surfaces sont définies en superposant les couches des cultures fruitières et de la modélisation des températures aux deux échelles en situation de gel radiatif après une journée nuageuse (exemple de la nuit du 12/13 avril 1998).

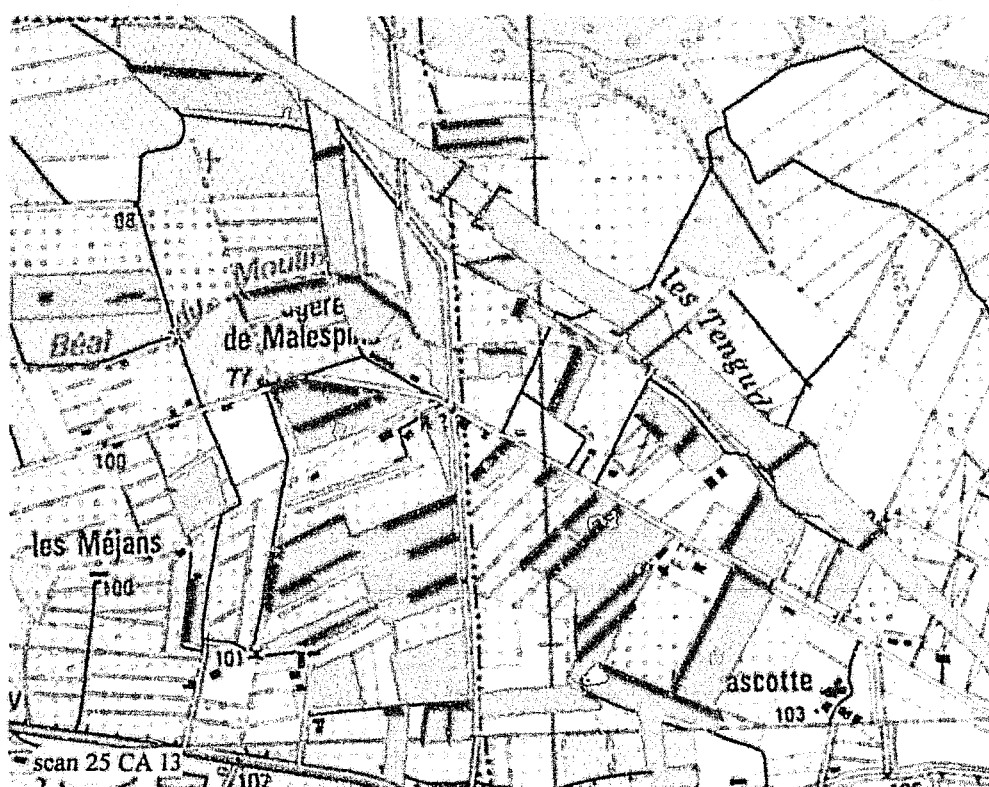
Le S.I.G. a permis de combiner les données météorologiques (d'une nuit type) et la sensibilité au gel des cultures, les deux facteurs expliquant le gel des organes végétatifs. La variable météorologique a pu être étudiée et quantifiée suivant un protocole spécifique. Le paramètre agronomique a été plus difficile à cerner. Pour l'ensemble des arbres fruitiers, des seuils de sensibilité aux basses températures sont définis suivant les espèces fruitières et pour chacune d'entre elles, le risque gélif s'accroît du débourrement à la formation du fruits. Cependant, le contrôle sur fruits réalisé lors de la nuit gélive du 22 au 23 mars 1998 a démontré que le niveau de résistance au gel des différentes variétés d'une même espèce était très variable. Par exemple, la poire Alexandrine au stade « pleine floraison » n'a subi aucun dégât alors qu'une parcelle de Guyot, au même stade phénologique et quelques dizaines de mètres en amont a près de 90% de fleurs détruites. Cela montre les limites des seuils de températures critiques. La variabilité de résistance au gel suivant les espèces, les variétés et l'échelle temporelle rend complexe la représentation cartographique de la sensibilité des cultures.





a)

300 m



b)

- risque supplémentaire de gel sur parcelles agricoles sensibles
- risque important de gel sur portions de parcelles en amont de haies imperméables (blocage d'air froid)

300 m

Fig 4.13 : Parcelles fruitières où le risque gélif est accentué par le remblai ferroviaire en début de printemps entre mi-février/mi-avril (a) et vers le mois de mai (b)\*.

\* En situation de gel radiatif avec présence d'un couvert nuageux la veille (exemple de la modélisation des températures multi-échelles de la nuit du 13 au 14 avril 1998)

## Bilan

Le S.I.G. a permis de mettre en relation l'ensemble des informations *-données météorologiques multi-échelles, arbres fruitiers, relief, occupation du sol, ...-* nécessaires à la délimitation des secteurs à risques gélifs. Nous avons réalisé trois cartes représentant la spatialisation des températures acquises à l'échelle mésolocale (effet du remblai) et microclimatique (effet des haies brise-vent) pour trois nuits gélives de type différent (radiatif, advectionnel et arrêt de mistral en fin de nuit). Ces cartes permettent d'évaluer l'impact du remblai sur la variabilité spatiale des températures. Pour la nuit radiative avec présence d'un couvert nuageux la veille *-une des situation les plus à risque pour les cultures fruitières-* la superposition des couches, représentant la température multi-échelles et la sensibilité du végétal, a permis d'estimer la surface culturale où le risque gélif est accentué par le remblai. Mais cette carte est réalisée à partir de l'interpolation des températures d'une seule nuit. **Nous ne pouvons donc pas prétendre avoir effectué une cartographie du risque gélif à l'échelle climatique.** Au cours des trois printemps d'expérimentation, l'échantillon est trop faible (19 nuits gélives printanières) pour établir une statistique, cependant, le risque gélif se traduit généralement à l'échelle d'une nuit voir même de quelques heures (le gel des organes végétaux se produit le plus souvent juste avant le lever du jour). Le gel radiatif avec présence d'un couvert nuageux la veille semble être *-comme dans le cas même cas qu'un arrêt de mistral en début de nuit avec veille nuageuse-*, la situation atmosphérique la plus dangereuse pour les cultures fruitières. Par conséquent, nous estimons qu'au cours de ces nuits gélives, un secteur d'environ 100 ha, au sud de la LGV, a subi un risque supplémentaire de gel provoqué par les infrastructures ferroviaires (modification de l'aérologie).

## 2 ESTIMATION DU RISQUE LIE AUX EFFETS MECANQUES DU MISTRAL

Les mesures météorologiques et les observations agronomiques sur des parcelles tests ont permis de déterminer assez précisément l'impact de la LGV sur l'écoulement du mistral. L'objectif de la modélisation par SIG est d'extrapoler ces résultats sur l'ensemble du terrain d'étude et de définir les portions d'espace arboricole où le risque est accentué par les infrastructures ferroviaires. Contrairement à l'exemple précédent, la modélisation ne nécessite pas d'étape intermédiaire d'interpolation de données en mode raster ; toutes les opérations sont réalisées en mode vectoriel.

Par temps de mistral, les haies brise-vent modifient l'écoulement du vent et génèrent, en aval, des zones de protection qui varient suivant leur porosité, leur hauteur et leur position par rapport au vent. Pour estimer la surface protégée sur l'ensemble du terrain expérimental, nous devons connaître l'ensemble de ces caractéristiques pour toutes les haies. La construction du remblai ferroviaire provoque une canalisation du vent puis une compression de l'air entre l'obstacle et les haies. Le vent violent et turbulent est dévié vers la parcelle suivant un angle d'environ 35 degrés (cf fig 2.85) formant une zone triangulaire néfaste à la qualité des fruits (boisage, coups, ...). En confrontant, la localisation de ces secteurs avec les zones protégées en aval des haies, sur les parcelles attenantes à la LGV, nous pouvons modéliser les secteurs où le risque est accentué par l'obstacle ferroviaire (fig 4.14).

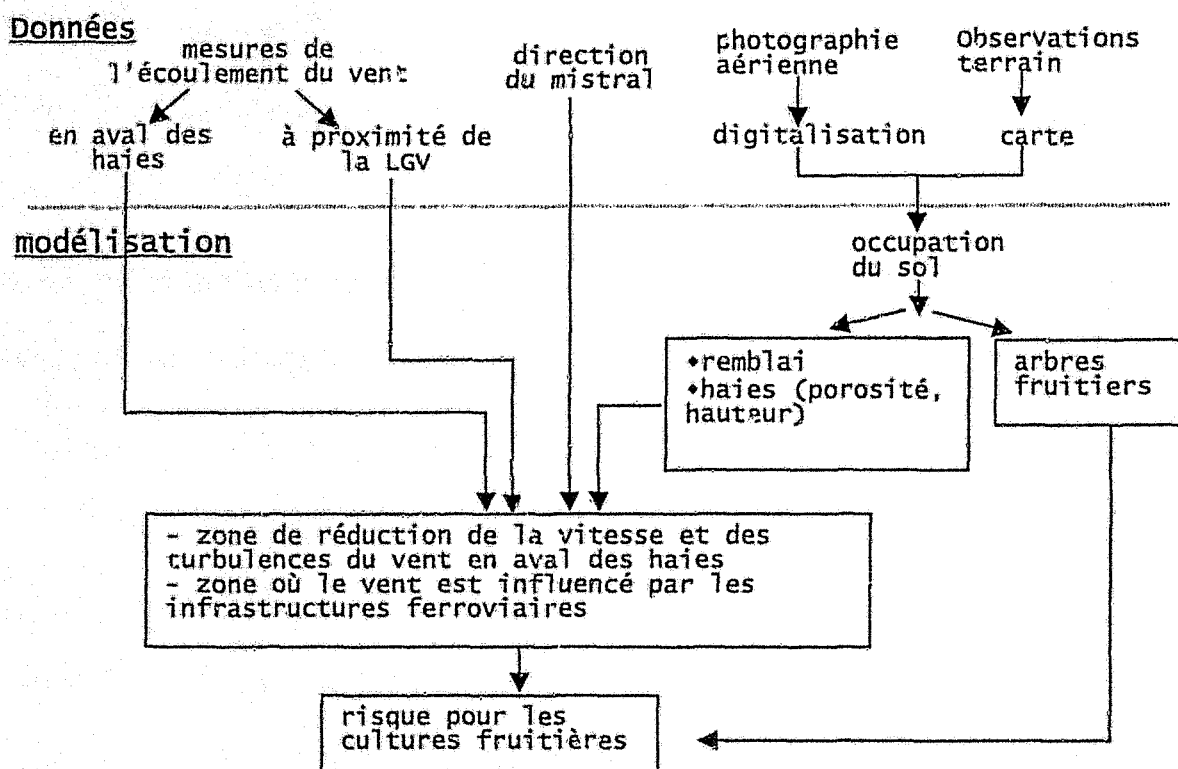


Fig. 4.14 : Utilisation du SIG pour modéliser le risque des effets mécaniques du mistral à proximité de la LGV.

## 2.1 Modélisation de la protection en aval des haies brise-vent

La modélisation des zones d'abri en aval des haies brise-vent nécessite plusieurs informations et plusieurs traitements :

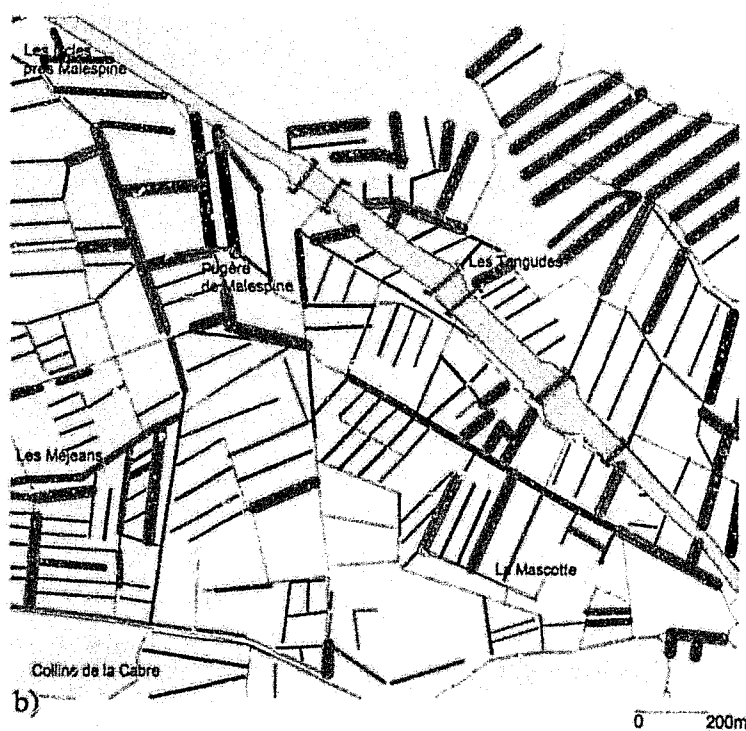
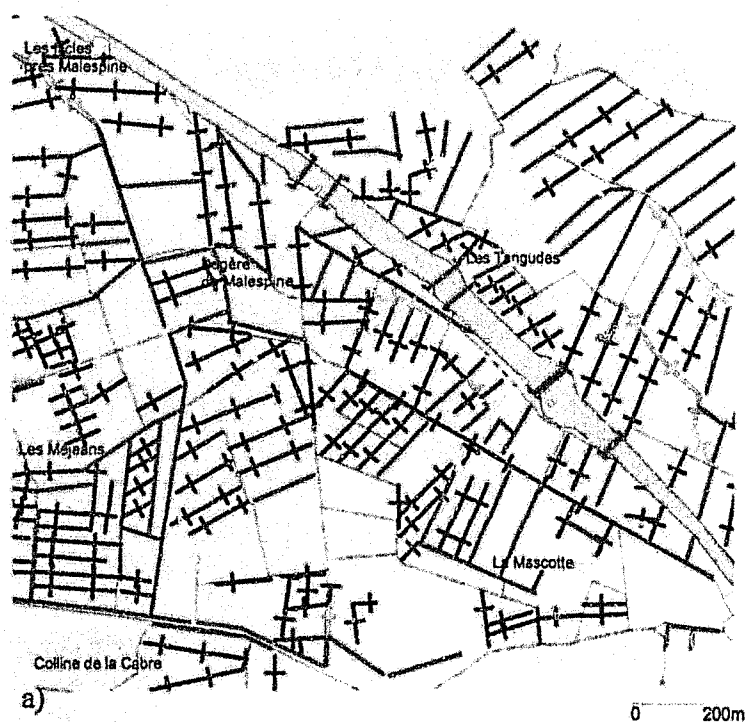
- les coordonnées géographiques X, Y des haies ;
- la porosité et la hauteur des haies ;
- la position des infrastructures ferroviaires ;
- la direction générale du vent ,
- les distances de protection déterminées lors des mesures météorologiques et agronomiques.

En fonction de ces éléments, nous modélisons, par l'intermédiaire d'objets vectoriels surfaciques, la zone de protection en aval des haies brise-vent.

L'ensemble du réseau de haies est digitalisé à partir de la photographie aérienne orthorectifiée et calée dans le S.I.G. Les campagnes d'observations, présentées dans le chapitre 1.3, ont permis de déterminer la porosité et la hauteur des haies. Nous avons dénombré 235 haies imperméables et 130 perméables sur la zone d'étude. La faible proportion de haies perméables correspond à l'aménagement de brise-vent le plus répandu sur le site d'étude, c'est-à-dire, une haie perméable en amont d'une succession de haies imperméables (fig 4.15 a et b). La haie perméable, généralement proche de 20 m de haut, ralentit le vent sur plusieurs dizaines de mètres puis les haies imperméables créent des zones calmes où les cultures sont protégées.

Pour délimiter la surface d'abri en aval de chaque haie, nous nous servons d'une méthode similaire à celle employée pour modéliser les secteurs abrités en aval des haies imperméables en situation de gel advectif (cf §1.5.2). Cette méthode consiste à utiliser une combinaison de calculs vectoriels. Les coordonnées S1 et S2 des segments de chaque haie sont extraits de la base de données (fig 4.16a). Nous appliquons ensuite un vecteur vent (caractérisé par un angle en degrés) qui permet de calculer les coordonnées de la zone protégée. Soit une haie dont les extrémités sont nommées S1: (X1,Y1) et S2 : (X2,Y2), la distance de protection en aval de la haie est fixée en fonction de la porosité et de la hauteur de la haie. Lors des mesures météorologiques, nous avons défini une distance de protection de 2,5 fois la hauteur d'une haie imperméable, de 1,5 fois la hauteur d'une haie de cyprès (très imperméable) et de 8 fois la hauteur d'une haie de peupliers (perméable). La zone calme est représentée par un trapèze S1, S2, S3 et S4 dont la base correspond à la haie, et dont la hauteur est fonction de la direction du vent et du coefficient attribué à la haie (2,5H, 1,5H ou 8H). Pour obtenir les coordonnées manquantes du trapèze (S3 et S4), le vecteur vent est projeté (avec un angle de plus ou moins 15°) à partir des extrémités de la haie (fig 4.16b).

En pratique, les coordonnées des haies de MapInfo sont exportées vers un tableur afin de réaliser le calcul des coordonnées de S3 et S4. Ensuite, l'ensemble des coordonnées de S1, S2, S3 et S4 est importé dans MapInfo afin de créer les trapèzes matérialisant les zones d'abri en aval des haies. D'après la carte de modélisation des zones d'abri en aval des haies brise-vent, nous remarquons que la surface parcellaire protégée représentent 125 ha d'une surface cultivée d'environ 280 ha (fig 4.17a).



- bâtiment
- parcelles agricoles
- autres (forêt, friches, ...)
- emprise et remblai ferroviaire
- ouvertures sous le remblai

nature des haies

- cyprès
- cyprès/feuillus
- feuillus
- roseaux

porosité des haies

- imperméable
- perméable

hauteur des haies perméables (en m)

- 18 - 25
- 14 - 18
- 10 - 14
- 6 - 10
- 2 - 6

hauteur des haies imperméables (en m)

- 18 - 25
- 14 - 18
- 10 - 14
- 6 - 10
- 2 - 6

Fig 4.15 : Caractéristiques des haies prise-vent sur le terrain expérimental de Mallemort/Senas  
a) nature et porosité  
b) hauteur et porosité.

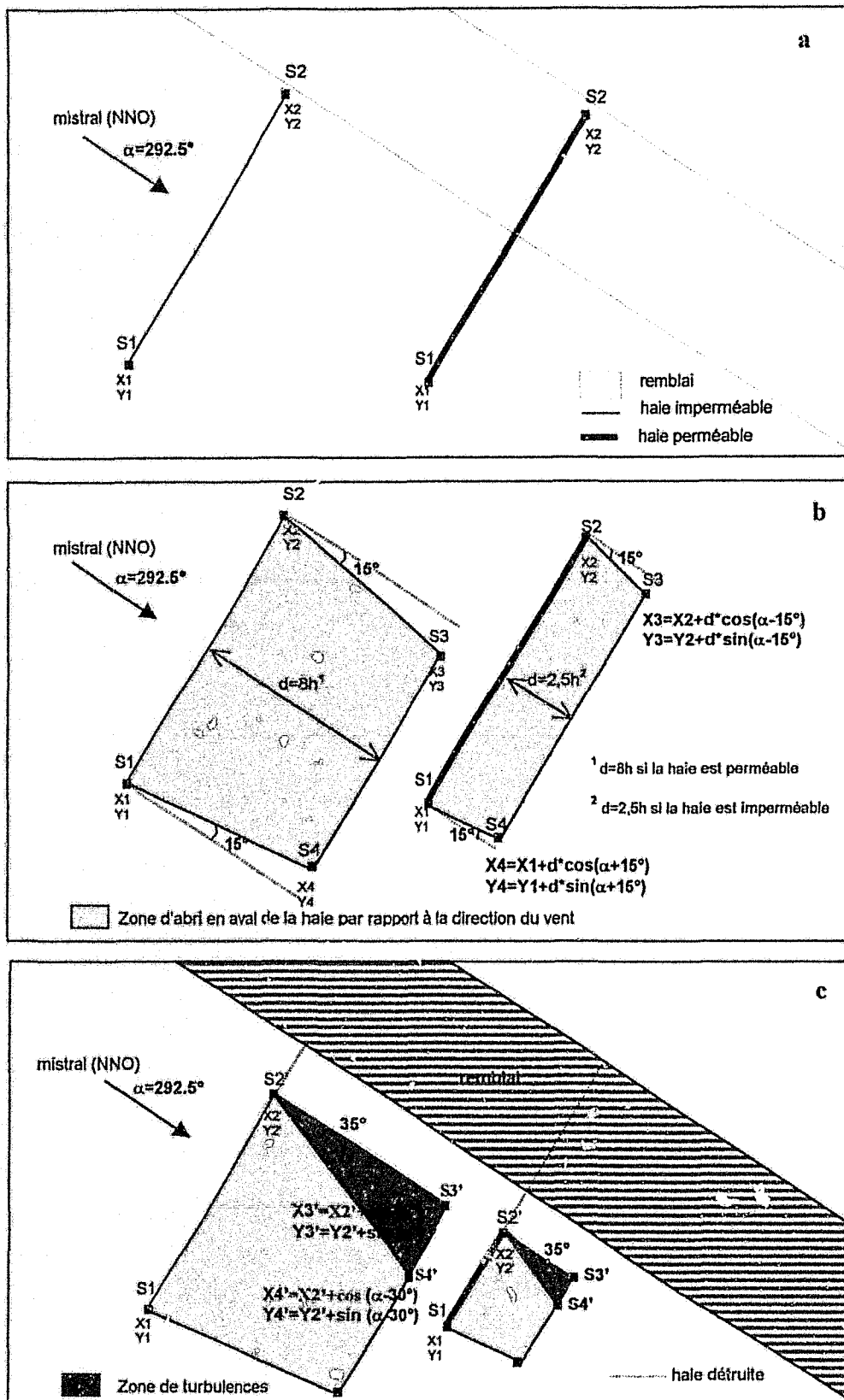


Fig 4.16 : Modélisation du mistral aux abords des haies brise-vent avant et après l'implantation du remblai ferroviaire.

- a) schéma d'implantation des haies et du remblai ;
- b) modélisation de la zone d'abri en aval des haies brise-vent ;
- c) modélisation des zones de turbulences consécutives à la destruction des haies et à la construction du remblai.

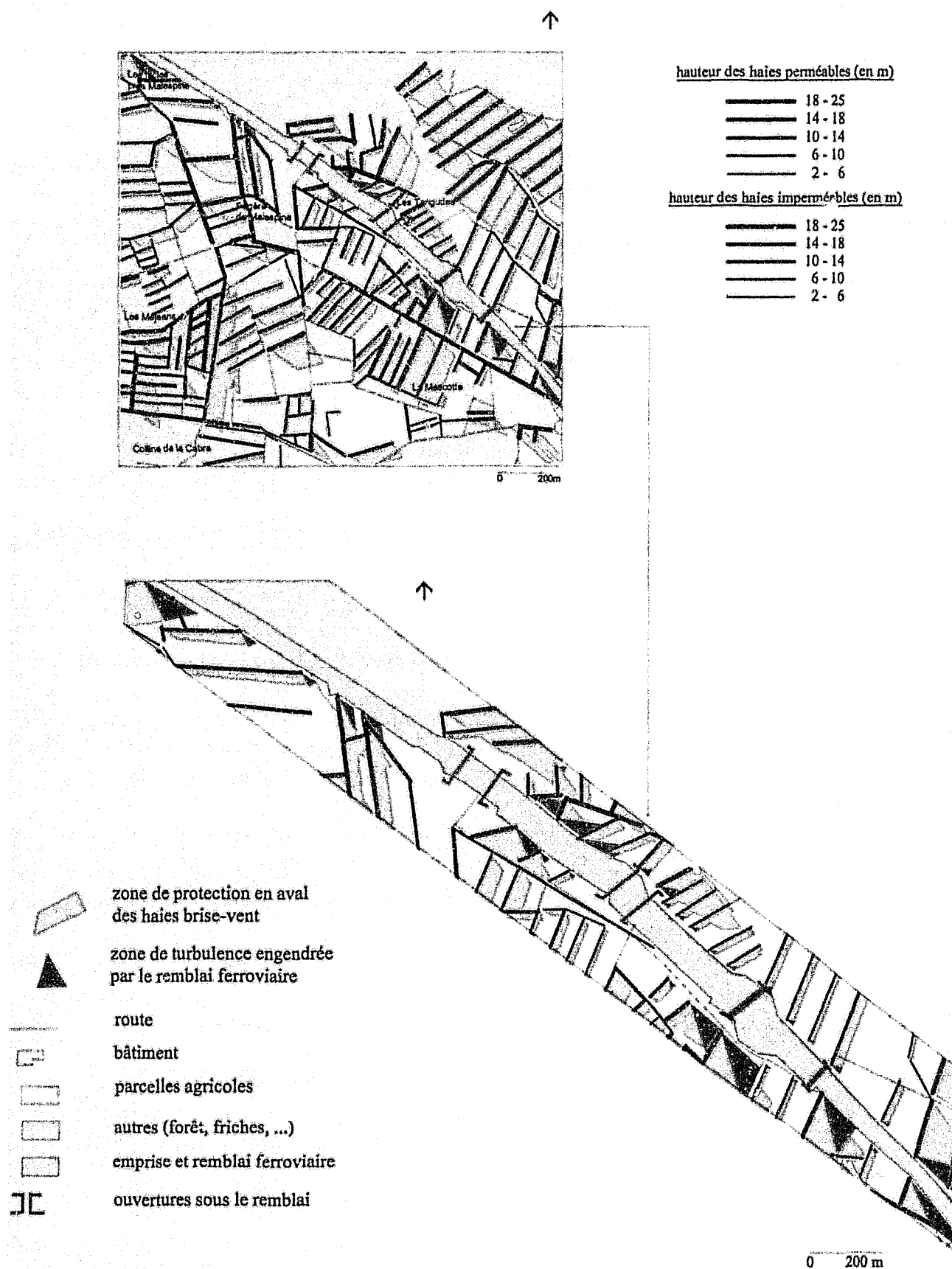


Fig 4.26 : Modélisation spatiale des secteurs agricoles où l'écoulement du mistral est modifié par les haies brise-vent et les infrastructures de la LGV

## 2.2 Modélisation des secteurs à risques à proximité de la LGV

Après avoir représenté la surface culturale protégée par le réseau de haies brise-vent, l'étape suivante consiste à modéliser les secteurs où l'écoulement du mistral est perturbé par la LGV. Les mesures météorologiques et agronomiques ont permis d'estimer une surface triangulaire avec un angle d'environ  $35^\circ$  sur les parcelles attenantes à la ligne ferroviaire où le risque lié aux effets mécaniques du vent (vitesse et turbulences) est accentué. En fonction du vecteur vent et de l'extrémité de la haie proche de la LGV, ce triangle empirique est modélisé pour l'ensemble des parcelles arboricoles bordant la LGV (fig 4.16c). La zone tourbillonnaire supplémentaire semble agir sur toute la longueur de la parcelle (d'une haie à l'autre). Toutefois, les campagnes de mesures s'étant déroulées sur des parcelles dont la longueur est inférieure à 100 m, nous ne pouvons pas affirmer que cette zone tourbillonnaire est similaire sur des parcelles plus grandes. Dans le SIG, la superposition de la couche représentant les zones triangulaires (à risque) avec la zone de protection en aval de chaque haies, nous pouvons définir la surface culturale où le risque de dégâts supplémentaires pour les cultures fruitières est accentué par les infrastructures ferroviaires. Nous estimons cette surface à environ 12 ha (fig. 4.17b).

### Bilan

Grâce au Système d'Information Géographique, nous pouvons mettre en relation l'occupation du sol (remblai, haies, ...) avec les résultats des expérimentations météorologiques et agronomiques. La carte finale représentant les secteurs protégés par les haies brise-vent et la surface parcellaire soumise à l'action néfaste de la LGV est une estimation, à l'échelle microclimatique, des secteurs où le risque de dégâts pour les cultures est accru. L'utilisation d'objets surfaciques (trapèzes et triangles) permet d'atteindre une bonne précision qui ne serait pas possible en mode raster. Le contrôle sur fruits, réalisé sur une parcelle à proximité de la LGV (cf fig. 3.17), a permis de valider, non seulement les résultats des mesures météorologiques, mais également cette modélisation.

## CONCLUSION DE LA PARTIE 4

---

La spatialisation de données ponctuelles à des échelles spatiales fines aboutit à une cartographie des secteurs où le risque microclimatique est accentué par les infrastructures de la Ligne à Grande Vitesse Méditerranée. En superposant dans le S.I.G. des couches d'informations de formats différents, l'impact de l'obstacle ferroviaire a pu être modélisé en prenant en compte l'ensemble des facteurs environnementaux de proximité (remblai, haies brise-vent, ...) influençant le climat local (imbrication des échelles spatiales). Pour l'estimation de la variabilité spatiale du risque gélif, l'influence du remblai ferroviaire et des haies brise-vent sur le blocage de l'air froid par type de temps radiatif a été mis en évidence. Par l'intermédiaire de couches supplémentaires, nous aurions pu affiner la cartographie en modélisant, par exemple le gain énergétique observé à proximité des haies (réémission du rayonnement infrarouge) ou les portions parcellaires soumises aux premiers rayons du soleil (réalisation de masque en fonction de la position des haies et d'une abaque solaire). Ce type



*Partie 4 : Modélisation des risques climatiques induits par le remblai*

de S.I.G. présente donc l'intérêt de pouvoir améliorer et affiner la modélisation microclimatique en introduisant dans le système des couches d'informations supplémentaires (ex : mesures complémentaires sur le terrain).

## CONCLUSION GENERALE

---

## CONCLUSION GENERALE

---

L'objectif principal de cette thèse était d'évaluer l'impact des infrastructures de la Ligne à Grande Vitesse (LGV) Méditerranée sur le microclimat et de cartographier les secteurs arboricoles où les risques climatiques (gel printanier et mistral) sont accentués par ce nouvel élément du milieu. La mise en place d'un dispositif de mesures (météorologiques et agronomiques) et d'une méthode de modélisation adaptée aux échelles spatiales fines ont permis de répondre à cette problématique.

♦ Avant l'implantation de la LGV, en situation de refroidissement radiatif, une brise de vallée descendante drainait l'ensemble de la basse vallée de la Durance. De par ses caractéristiques (vitesse supérieure à 3 m/s ; forte humidité relative), cet écoulement d'échelle topoclimatique limitait significativement les risques de gel en brassant l'air froid des écoulements secondaires (échelle méso-locale) présents sur la zone d'étude. La présence du remblai ferroviaire modifie l'écoulement de la brise descendante et crée une zone d'abri au sud-ouest de la LGV. En renforçant indirectement les écoulements gravitaires provenant du Pas des Lanciers, le remblai augmente le risque de stagnation d'air froid dans ce secteur. L'intensité du refroidissement nocturne varie suivant les conditions atmosphériques.

*En situation radiative*, on remarque un écart thermique d'environ 2°C entre les deux côtés de la LGV (plus froid au sud-ouest du remblai). Toutefois, dans le cas où le nouveau remblai minéral a pu accumuler suffisamment d'énergie solaire la veille, le refroidissement des parcelles limitrophes est atténué. Dans le cas contraire (nuageux la veille, moins d'apport énergétique solaire), le refroidissement est plus intense et le « lac d'air froid » présent dans le secteur subhorizontal au sud-ouest de la LGV s'étend jusqu'au remblai.

*En situation d'arrêt de mistral*, lors de la phase d'arrêt, le vent en s'engouffrant dans l'emprise ferroviaire limite le risque gélif en brassant l'air froid qui se forme par déperdition énergétique. Le remblai a, dans ce cas, un rôle positif et apporte un gain énergétique (de 1 à 2°C) sur les parcelles bordant la LGV. Mais, cet effet s'atténue progressivement lorsque le temps devient calme. Le risque de gel est réduit lorsque l'arrêt se produit en fin de nuit, mais s'il parvient en début de nuit, la situation est identique à celle des conditions radiatives.

Du fait de la diversité des conditions atmosphériques des épisodes gélifs et du faible échantillon de nuits gélives printanières, la **modélisation spatiale du risque pour les cultures fruitières n'est pas réalisée à l'échelle climatique, mais à l'échelle de l'événement météorologique**. Ainsi, à partir des données de la nuit du 12 au 13 avril 1998, nous estimons à un peu plus de 100 ha, la surface arboricole où le risque gélif est accentué par la LGV.

♦ La destruction des cultures et des haies brise-vent sur la largeur de l'emprise modifie localement l'écoulement superficiel du mistral. Le vent, canalisé par l'emprise, est accéléré. Le resserrement entre les haies (plus ou moins imperméables) et le remblai provoque la compression de l'air. Le vent, fort et turbulent, est dévié vers la parcelle en aval du brise-vent. La partie de la parcelle, où le vent est plus turbulent pour la qualité des fruits, forme un triangle avec un angle de 35 degrés environ. La modélisation spatiale de ce « triangle » sur

### Conclusion générale

L'ensemble des parcelles limitrophes de la LGV correspond à une surface d'environ 17 ha où le risque de dégâts qualitatifs, lié au mistral, est accentué par la ligne ferroviaire.

Il convient d'évoquer une application pratique du dispositif expérimental mis en place pour l'étude d'impact de la LGV Méditerranée. Au cours du printemps 2000, nous avons utilisé le réseau de capteurs météorologiques et la base de données du S.I.G. (localisation des parcelles à risque, suivi régulier du stade phénologique) pour la gestion du gel printanier sur la commune de Mallemort. En effet, certains arboriculteurs sont équipés de l'aspersion d'eau comme système de protection contre le gel. Lorsque la situation atmosphérique est propice à une gelée printanière, les systèmes sont déclenchés sur la totalité des parcelles équipées. La forte demande d'eau engendre des problèmes de pression dans le réseau d'irrigation ce qui limite l'efficacité de la protection (après la gelée du 12 au 13 avril 1998, des arboriculteurs ont subi d'importants dégâts par manque de pression au niveau des asperseurs). Nous avons imaginé un système d'alerte, relié au dispositif de capteurs météorologiques et à la base de données du S.I.G., indiquant à l'arboriculteur les parcelles les plus sensibles (ex : variétés avec les stades phénologiques les plus avancées) et les secteurs où le refroidissement est le plus intense. En fonction de ces informations, l'arboriculteur peut déclencher le système de protection uniquement sur les parcelles à risque et réaliser une protection antigel raisonnée. Malheureusement, ce système n'a pas pu être testé par « manque » de gelée au cours du printemps 2001.

Hormis ces résultats essentiels pour cette étude, plusieurs conclusions peuvent être tirées sur la méthode expérimentale définie lors de cette étude :

⇒ Nous avons mis en place un protocole et une technique de mesures météorologiques adaptés à l'étude de la variabilité climatique aux échelles fines. L'acquisition des données météorologiques à différentes échelles a été possible grâce à la conception de capteurs météorologiques permettant d'obtenir des données, simultanément, sur divers points de mesures. La détermination des points de mesures en fonction des échelles spatiales imbriquées ainsi que la répétition des campagnes de mesures (68 nuits gélives et 26 journées de mistral) a permis d'évaluer l'influence des infrastructures ferroviaires sur les variables météorologiques. Cette méthode peut être appliquée à tous types d'études de topoclimatologie ou de microclimatologie. Elle nécessite, d'une part, **une bonne connaissance du terrain expérimental** et d'autre part, **un nombre suffisant de capteurs**, afin d'obtenir un maillage suffisamment fin de points de mesures.

⇒ Le « contrôle sur fruit » s'est avéré une technique très intéressante pour valider les hypothèses tirées des mesures météorologiques. **L'analyse agronomique a été également le moyen de palier au manque de données météorologiques.** En effet, les capteurs météorologiques disposés sur une parcelle apportent des informations ponctuelles sur la variabilité spatiale des phénomènes météorologiques, mais l'observation agronomique sur chaque arbre apporte des précisions sur le comportement de ces phénomènes entre chaque point de mesure météorologique.

### Conclusion générale

⇒ En intégrant, par l'intermédiaire d'une « passerelle informatique », un module raster dans un logiciel vectoriel, nous avons pu réaliser une modélisation fine des risques microclimatiques provoqués par l'implantation de la LGV. Ce type de S.I.G. semble être un outil approprié pour spatialiser des données météorologiques ponctuelles obtenues à des échelles différentes. Toutefois, cette méthode requiert quelques améliorations, dans cette thèse, les interpolations de données ont été effectuées avec les traitements pré-programmés du logiciel Surfer (méthode « presse bouton » selon Laborde, 2001). Une étape supplémentaire, destinée à améliorer les calculs d'interpolation en fonction de la répartition spatiale des points de mesures, semble donc nécessaire.

Cette méthode - *mesures sur le terrain à partir d'un réseau de capteurs météorologiques ; modélisation et gestion par SIG* - est appliquée à d'autres études d'impact en climatologie locale (ex : études d'impact de la future LGV-Est Européenne sur le risque gélif dans plusieurs secteurs viticoles de Champagne). Elle n'est pas strictement réservée au risque agricole, elle peut être adaptée à d'autres domaines de la climatologie locale, notamment en climatologie urbaine (ex : étude en cours sur la variabilité spatiale de certains polluants tels que le CO et le NOx dans Paris ; Quénel *et al*, 2002).

Enfin, il convient d'évoquer quelques perspectives pour les moyens d'acquisition de données et de spatialisation présentés dans cette thèse. La conception et l'élaboration de capteurs météorologiques -*girouettes pour écoulements faibles et forts, anémomètres*- ont permis de multiplier les postes de mesures et d'affiner la maille du réseau d'acquisition des données météorologiques indispensable pour une étude climatique aux échelles fines. Le perfectionnement de ces instruments (capteurs météorologiques et enregistreurs) implique certaines améliorations notamment au niveau de la précision et de la finesse des relevés. Pour que le SIG sous forme multi-logiciels avec passerelle soit totalement opérationnel, il nécessite un développement logiciel intégrant complètement les traitements matriciels et vectoriels. Tout cela n'est pas vraiment le travail d'un géographe, mais plutôt un objectif pluridisciplinaire associant géographes, électroniciens, informaticiens et physiciens.

## BIBLIOGRAPHIE

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

- ARGENT R.M., 1992 : The influence of a plant canopy on shelter effect. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41-44, 2643-2653.
- ARNAUD M. et EMERY X., 2000 : *Estimation et interpolation spatiale*. Editions Hermes, 217p.
- ARNAUD-FASSETA G., 1998 : *Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône*. Thèse de doctorat de l'univ. Aix-Marseille II, 329p.
- AUPETIT H., 1994 : *Les visiteurs du ciel : guide de l'air pour l'homme volant*. Editions Rélines, 365p.
- AVC (Association Viticole Champenoise), 1991 : Les gelées de printemps. *Le vigneron champenois*, numéro spécial, 63p.
- BATTIAU-QUENEY Y., 1993 : *Le relief de la France : coupe et croquis*. Masson, 251p.
- BAZIN J., 1988 : Des haies et brise-vent naturels. *Encyclopédie et Techniques Agricoles*, 1175, 3-6.
- BAGGIOLINI M., 1952 : Les stades repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. *Rev. Rom. Agric.*, 8, 1.
- BALLARD J.K., 1997 : Critical temperatures for blossom buds (cherries, prunes, peaches, apricots, pears et apples). *Washington State University*, 1-2.
- BARET F., GUYON D. et GU X.F., 1996 : Propriétés optiques des sols et des feuilles de l'école de l'INRA, tome 1 « de la plante au couvert végétal », 285-291.
- BARTHELMIE R.J., PALUTIKOF J.P. et DAVIES T.D., 1993 : Estimation of sector roughness lengths and the effect on prediction of the vertical windspeed profile. *Boundary Layer Meteorology*, 1-2, 19-48.
- BATES E.M., 1971 : Temperature inversion and frost protection by wind machine. *Agric. Met.*, 9, 335-346.
- BELTRANDO G., 1998 : Les gelées printanières en Champagne viticole. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 21, 30-43.
- BELTRANDO G., 2000 : La climatologie : une science géographique. *L'information géographique*, 64, 241-261.
- BELTRANDO G., LECOMPTE M. et SARMIER I., 1992 : Le gel dans le vignoble champenois : itinéraire topoclimatiques pour la mesure de l'infrarouge thermique. *Publ. de l'Associat. Internat. de Climato.*, 5, 335-342.
- BELTRANDO G. et CHEMERY L., 1995 : *Dictionnaire du climat*. Larousse, 344p.
- BELTRANDO G., BRIDIER S. et QUENOL H., 1995 : *Estimation des modifications thermiques générées par le remblai de la future ligne T.G.V. Est européen dans le vignoble champenois*. Rapport d'expertise réalisé pour le Syndicat Général des Vignerons de la Champagne, 56p.

BELTRANDO G., QUENOL H. et D'ALESSIO S., 1996 : *Etude de l'impact du remblai de la future ligne T.G.V. Méditerranée sur le climat local : inventaire et approche méthodologique*. Rapport intermédiaire pour la SNCF et la Chambre d'Agriculture des Bouches-du-Rhône, 57p.

BELTRANDO G., QUENOL H. et BRIDIER S., 1998 : *Impact du remblai de la ligne T.G.V. Méditerranée sur le climat local dans la basse vallée de la Durance*. Rapport final pour la SNCF et la Chambre d'Agriculture des Bouches-du-Rhône, 66p.

BELTRANDO G., QUENOL H. et BRIDIER S., 2000 : *Evaluation de l'impact du remblai de la ligne T.G.V. Méditerranée sur les gelées de printemps dans le secteur de Mallemort*. Rapport pour la RFF et la Chambre d'Agriculture des Bouches-du-Rhône, 51p.

BELTRANDO G., BRIDIER S., MADELIN M. et QUENOL H., 2002 : *Evaluation de l'impact du futur remblai de la ligne à grande vitesse Est européenne sur les gelées de printemps dans les Fonds de Sillery (vignoble de Champagne)*. Rapport pour la RFF, 26p.

BELTRANDO G., BRIDIER S., MADELIN M. et QUENOL H., 2002 : *Evaluation de l'impact du futur remblai de la ligne à Grande Vitesse est européenne sur le risque de gel dans le vignoble de Champagne*. Soumis à la revue « Hommes et Terres du Nord ».

BELTRANDO G., BRIDIER S., MADELIN M. et QUENOL H., 2002 : *Impact du futur remblai de la ligne ferroviaire de la Ligne à Grande Vitesse Est-Européenne sur le gel printanier dans le vignoble champenois, présentation d'un poster à l'European Geophysical Society*.

BENICHO P. 1986 : Cartography of statistical pluviometric fields with an automatic allowance for regional topography. *Third international conference on statistical climatology*, Vienna, 360-366.

BENICHO P. et LEBRETON O., 1987 : Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La météorologie*, 7<sup>e</sup> série, octobre, n°19.

BERLIN COURT P., 1991 : Le cas d'une petite ville suisse : Bienne. *Actes du colloque de Fribourg (CH)*. Publ. de l'Associat. Internat. de Clim., 4, 7-14.

BIBER J.P. 1987 : Brise-vent. *Encyclopédie des Techniques Agricoles*, 1175, 21-23.

BONHOMME M. et RAGEAU R., 1989 : Seuils de sensibilité au froid du matériel végétal en arboriculture fruitière. *I.N.R.A. « le gel en agriculture »*, 33-66.

BONNARDOT V., 1996 : *Le climat et la vigne en Bourgogne orientale*. Thèse de doctorat, Université de Dijon, 235p.

BONNARDOT V., CAREY V., PLANCHON O. et CAUTENET S., 2001 : Sea breeze mechanism and observations of its effects in the Stellenbosch wine producing area. *Wynboer 10-14, Winemad October 2001*, 107-113.

BONNEAU M., et SOUCHIER B., 1994 : *Pédologie 2 : constituants et propriétés du sol*. Masson, 665p.

BOOTSMA A., 1975 : Estimating minimum temperature and climatological freeze risk in hilly terrain. *Agric. Meteorol.*, 3, 425-433.



## Figures et tableaux

BORDREUIL C., 1975 : Les gelées de printemps dommageables dans les Bouches-du-Rhône au cours des 30 dernières années. *Annales des Bouches du Rhône, D.D.A.*, 31-38.

BOUCHET R.J., 1965 : Problèmes des gelées de printemps. *Agricultural Meteorology*, 2, 167-195.

BOULAIN J., 1975 : *Géographie des sols*. PUF, 195p.

BRIDIER S., 2001 : *Modélisation de la répartition des brises et des températures en situation radiative*. Thèse de doctorat de l'université Denis Diderot (Paris 7), 178p.

BRIDIER S., QUENOL H. et BELTRANDO G., 1995 : Evaluation de l'influence d'un ouvrage linéaire en remblai -le T.G.V. Est- sur l'écoulement de l'air froid dans le vignoble champenois. *Publ. de l'Associat. Internat. de Climato.*, 8, 233-240.

BRIDIER S., QUENOL H. et BELTRANDO G., 2002 : Evaluation du risque supplémentaire de gel imputable au talus de la Ligne Nouvelle du TGV Méditerranée dans la basse vallée de la Durance. sous presse Photo-interprétation.

BROOKS F.A. et SCHULTS H.B., 1958 : Observation and interpretation of nocturnal density currents. *Climatologie et microclimatologie, actes du colloque de Camberra UNESCO, recherches sur la zone aride*, 11, 272-277.

CANNELL M.G.R., 1997 : Spring phenology of trees and frost avoidance. *Institute of Terrestrial Ecology, Bush Estate*, vol 52, 2, 46-52.

CARREGA P., 1986 : Une méthode pour l'estimation des températures en relief contrasté dans les Alpes Maritimes. *International symposium on topoclimatology and its applications*, Liège, Mont Rigi, Belgique, Presses universitaires, Université de Liège, 3-12.

CARREGA P., 1989 : Vents et échelles de contraintes géographiques : exemples en région niçoise. *Publ. de l'Associat. Internat. de Climato.*, 2, 309-316.

CARREGA P., 1994 : *Topoclimatologie et habitat*. Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée, Th. Et., 35 & 36, 408p.

CARREGA P. et GLINSKY-OLIVIER P., 1997 : Cartographie du vent à l'échelle locale : performances comparées de deux modèles numériques. *Publ. de l'Associat. Internat. de Climato.*, 10, 126-134.

CASANOVA A., 1969 : Température dans le sol pendant un gel en surface de quelques heures. *La météorologie*, 57-65.

CASTANER D., 1983 : Guide pratique des haies brise-vent dans la Drôme. *Institut pour le Développement Forestier*, 1-44.

CASTANER D., 1984 : Les brise-vent : leur modes de fonctionnement, leurs effets sur les cultures. *Institut pour le Développement Forestier*, 1-8.

CELLIER P., 1989 : Mécanismes du refroidissement nocturne : application à la prévision des gelées de printemps. *Le Gel en Agriculture I.N.R.A.*, 145-164.

CELLIER P., 1996 : Bilan d'énergie et microclimats en situation de relief. *Actes de l'école de l'INRA, tome 1 « de la plante au couvert végétal »*. 505-517.

## Figures et tableaux

CHABIN P., 1996 : Séminaire sur la topoclimatologie dans le D.E.A. « Interface Nature/Société » (non publié).

CHARABI Y., QUENOL H., BELTRANDO G. et KERGOMARD C., 2001 : Variation du champ thermique nocturne estival à l'intérieur d'un fragment urbain. *Publ. de l'A.I.C.*, 13, 455-464.

CHARRE J., 1994 : S.I.G., l'analyse spatiale et modélisation. *Géopoint 94 Groupe Dupont, Université d'Avignon*, 37-42.

CHARRE J., MIELLET P. et WANIEZ P., 1991 : *Pratique des systèmes d'information géographiques raster*. Reclus modes d'emploi, 18, 48p.

CHARTON P., LAJOURNADE M., LAROCHE B., PITON N. et QUENOL H., 1998 : L'aspersion antigel. L'arboriculture fruitière, 514, 4346.

CHAUVET P., PAILLEUX J. et CHILES J.P., 1976 : Analyse objective des champs météorologiques par cokrigage. *La météorologie*, 6<sup>e</sup> série, 4, 37-54.

CHEMERY L. et DUCHENE-MARCILLAZ P., 1987 : *Atlas climatique de la construction*. CSTB, 182p.

CHIAPALE J.P., 75 : A numerical model for estimating the modification of heat budget introduced the modification of heat budget introduced by hedges. *Proc. Int. Conf. Heat and Mass Transfer in the Biosphere Dubrovnik*. Scribbook Co, 457-466.

CHOISNEL E., 1977 : Le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol. *La météorologie*, 6<sup>e</sup> série, 11, 103-159.

CHOISNEL E., 1986 : Problèmes d'échelle et réseaux météorologiques en zone de moyenne montagne. *Agrométéo. des régions de moyenne montagne, séminaire de Toulouse INRA*, 37-49.

CHOISNEL E., 1986 : Aspects topographiques : une méthode d'étude en région de moyenne montagne. *Agrométéo. des régions de moyenne montagne, séminaire de Toulouse INRA*, 177-196

CHOISNEL E., 1993 : L'agrométéorologie, outil de décision. *Météo-France*, 4-10.

CHOISNEL E. et JACQ V. , 1987 : Une méthodologie d'étude des topoclimats. *La presse thermique et climatique*, 188-196.

CHOISNEL E. *et al.*, 1993 : Un système de prévision de gelées de printemps à l'échelle fine dans le vignoble champenois. *La météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 2, 8-18.

CHRISMAN N.R. et Mc GRANAGHAN M.P., 1990 : Accuracy of spatial data base. *Good Child Kemp, ed. NCGIA Core Curriculum*, 45, 1-14.

CHRISMAN N.R., 1991 : The error component in spatial data. *In Maguire, Good Child Rhind, ed. Geographical Information System*, 1, 165-174.

CLEMENTS W.E., ARCHULETA J.A. et GUDIENSEN F.H., 1989 : Experimental design of the 1984 ASCOT field study. *J. Appl. Meteor.*, 28, 405-413.

COLETO-MARTINEZ J.M., ROZAS-ESPRADAS A., BARTOLOME T., ESTEBAN-CALDERON G. et PULIDO-GARCIA F., 1998, : Tipification de danos por heladas primoverales en cerezo en estados fenologicos preflorales. *Fruticultura profesional*, 96, 96-100.

COURAULT D., ROUX C., CLASTRE Ph. et PROSPER-LAGET V., 1996 : Influence de l'environnement sur la température de l'air dans le sud-est de la France. *Publ. de l'A.I.C.*, 9, 185-194.

D'ALESSIO S., 1996 : *Contribution à l'analyse du climat local dans la basse vallée de la Durance : développement d'une méthode pour l'analyse des paramètres climatiques (vent, air froid)*. Mémoire de maîtrise de l'université Denis Diderot (Paris 7), 85p.

DAMAGNEZ J. 1976 : Focages : histoire, écologie et économie, *Rapport de synthèse*, 105-108.

DEMOLON A., 1951 : *Principes d'agronomie 1 : dynamique du sol*. Dunod, 519p.

DE MONTMOLLIN F.A., OLIVIER R.J., SIMARD R.G. et ZWALHLEN F., 1980 : Evaluation of a precipitation map using a smoothed elevation-precipitation relationship and optimal estimates (kriging). *Nordic Hydrology*, 11, 113-120.

DE SAINTIGNON M.F., 1987 : Variations climatiques : modélisation et cartographie. *Le courrier du CNRS*, n°66 à 68.

DELFINER J., 1973 : Analyse objective du géopotential et des vents géostrophiques par krigeage universel. *La météorologie*, 25, 1-57.

DIMACOPOULOS G. et DURAND R., 1969 : *Eléments de météorologie agricole*. Collection d'enseignement agricole, 179p.

DORAN J.C. et HORST T.W., 1981 : Velocity and temperature oscillations in drainage winds. *Journal of Applied Meteorology*, 4, 361-364.

DORAN J.C. et HORST T.W., 1986 : Nocturnal drainage flow on simple slopes. *Boundary Layer Meteorology*, 34, 263-286.

DUCHAUFOR P., 1970 : *Précis de pédologie*. Masson, 479p.

DUCLOS G., 1994 : *Atlas des sols de la région PACA*. Min. de l'Agriculture et de la Pêche, 949p.

DURAND R., 1964 : La détermination des seuils de résistance aux gelées printanières. *Phytoma*, 155, 15-18.

DURAND R., 1965 : Appréciation du risque de gelée pour l'implantation d'un verger. 97<sup>e</sup> congrès de la société pomologique française, Bourges, 23-26.

DURAND R., 1988 : Action des éléments du climat sur la végétation. *Encyclopédie des Techniques Agricoles*, 3-13.

EMSALEM R., 1978 : Méthodes d'interpolation pour le calcul de cartes automatiques. *Cahiers de l'Aménagement de l'Espace*, 2, avril, 1-91.

## Figures et tableaux

- EMSALEM R., 1986 : Les régimes pluviométriques du Limousin. *Symposium International sur la topoclimatologie et ses applications*, Erpicum ed., Presses universitaires, université de Liège, 57-74.
- ENDLICHER W., 1979 : Thermal imagery as a tool to delimit vineyard sites liable to cold air damage. *University of Freiburg*, 1-11.
- ENDLICHER W., 1980 : L'utilisation de mesures itinérantes et de thermographie comme moyen d'étude du mésoclimat : l'exemple des vignobles du Kaiserstuhl. *Recherches Géographiques à Strasbourg*, 13-14, 127-133.
- ERPICUM M., 1980 : Les contrastes thermiques nocturnes entre vallée et plateau : esquisse de leur modélisation à partir de facteurs climatiques locaux et régionaux mesurés en Haute-Belgique. *Recherches Géographiques à Strasbourg*, 13-14, 107-113.
- ESCOURROU G., 1996 : *transport, contraintes climatiques et pollution*. Sedes, 172p.
- FALLOT J.M., 1992 : *Etude de la ventilation d'une grande vallée préalpine* (la vallée de la Sarine en Gruyère). Thèse de l'université de Fribourg, Suisse, 475p.
- FALLOT J.M. et HERTIG J.A., 1998 : Evaluation des concentrations moyennes annuelles de NO<sub>2</sub> au bord des routes. *Publ. de l'Associat. Internat. de Climato.*, 11, 331-318.
- FASSETA G. A., 1999 :
- FEYT G., MAILLOUX H. et DE SAINTIGNON MF., 1995 : SIG et information climatique. *Revue internationale de géomatique*, vol 5, n°3/4, 361-376.
- FLECKINGER J., 1948 : Notations phénologiques représentations graphiques du développement des bourgeons floraux du poirier. *Assoc. Franç. Avan. Sci.*, Paris, 64<sup>e</sup> session, 3.
- FOUCAULT A., 1993 : *Climat : Histoire et avenir du milieu terrestre*. Fayard, 328p.
- FOULONNEAU C., 1964 : Protection du vignoble contre les gelées. *Vignes et vins*, 126, 7-32.
- FOULONNEAU C., 1967 : Action du gel sur le végétal. *INRA « le gel en agriculture »*, 1-31.
- FRICHTEN L.J., 1967 : A sensitive cup-type anemometer. *J. Appl. Meteorol.*, 3, 348-358.
- FUNCKEN P., ERPICUM M., FREDERIC M. et MABILLE G., 1995 : Thermographie routière de la région Wallonne : méthodologie et présentation des résultats, intérêt de l'approche. *Publ. de l'Associat. Internat. de Climato.*, 8, 31-36.
- FURY R. et JOLY D., 1994 : Interpolations spatiales (à maille de 100m) des températures minimales journalières. *Association Internationale de Climatologie*, 542-549.
- FURY R. et JOLY D., 1995 : Interpolation spatiale à maille fine des températures journalières. *La météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 11, 36-43.
- GADE D., 1978 : Windbreaks in the lower Rhone Valley. *The Geographical Review*, 68, 127-144.
- GANDEMER J., 1985 : Ecoulements et charges induits par le vent sur les bâtiments : application aux capteurs solaires. *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*, 2045, 1-31.

## Figures et tableaux

GANDEMER J., 1991 : *Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti : guide méthodologique et conseils pratiques*. Min. de l'Équipement, 125p.

GAUCHER G. 1968, *Traité de pédologie agricole*. Dunod, 577p.

GAUTIER M., 1987 : *L'arbre fruitier*. Les production fruitières, agriculture d'aujourd'hui science et technique application, Vol 1, 492p.

GAUTIER M., 1988 : *La culture fruitière*. Les production fruitières, agriculture d'aujourd'hui science et technique application, Vol 2, 450p.

GEIGER M., 1980 : Recherches topoclimatiques au Palatinat. *Recherches Géographiques à Strasbourg*, 13-14, 95-102.

GEIGER R., 1965 : *The climate near the ground*. Harvard University Press, Cambridge, Mass., 611p.

GEIGER R., 1968 : Topoclimate. *In World Survey of Climatology*, New York, 2, 105-136.

GEIGER R., 1995 : Artificial protection against wind. *The climate near the ground*, 431-497.

GEIGER R., ARON R.H. et TODHUNTER P., 1995 : *The climate near the ground*. Vieweg, 528p.

GESLIN H., 1956 : Les variations microclimatiques de température et le problème des gelées de printemps. *Annales de la Société Nationale d'Horticulture de France*, 6, 150-160.

GILL C.G., 1975 : Development and use of the Gill UVW anemometer. *Boundary Layer Meteorology*, 8, 475-495.

GIRARD G., 1994 : *Gelées printanières en Médoc : le dispositif de protection par aspersion employé au Château Margaux*. Mémoire d'ingénieur I.N.R.A. de Bordeaux, 78p.

GODARD A., 1995 : Le système bassin-versant : fonctionnement naturel, interventions humaines. *Ann. Géo.*, 581-582, 3-5.

GODARD M. et MIGAUD J., 1954 : Les gelées de printemps à l'école nationale d'agriculture de Montpellier. *La météorologie*, 36, 319-344.

GRAS R., 1988 : *Physique du sol pour l'aménagement*. Masson, 587p.

GRAS R., 1994 : *Sols caillouteux et production végétale*. INRA édition, 175p.

GUINEAudeau C., 1981 : Guide des haies brise-vent et bandes boisées. *Institut pour le Développement Forestier*, 15-20.

GUMUCHIAN H. et MAROIS C., 2000 : *Initiation à la recherche en géographie*. Anthropos PUM, 425p.

GUYOT G., 1977 : Les effets aérodynamiques des brise-vent. *Promoclim*, 3, 157-188.

GUYOT G., 1983 : Action du vent sur la production fruitière. *Le fruit belge*, 404, 357-368.

GUYOT G., 1990 : Brise-vent, pare-feu et sylviculture. *Revue forestière*, 93-101.

GUYOT G., 1991 : Les effets microclimatiques des brise-vent et des aménagements régionaux. *Encyclopédie des Techniques Agricoles*, 1170, 1-27.

GUYOT G., 1997 : *Climatologie de l'environnement*. Masson, 505p.

GUYOT G. et SEGUIN B., 1976 : Influence du bocage sur le climat d'une petite région. *I.N.R.A.*, 121-129.

GUYOT G. et SEGUIN B., 1976 : *Climat et aménagement en pays de bocage*. Rapport de fin de contrat d'étude, INRA station de bioclimatologie de Montfavet, 767p.

GUYOT G. et VERBRUGGHES M., 1976 : Etude de la variabilité spatiale du microclimat à l'échelle parcellaire en zone bocagère. *Table ronde CNRS « écosystèmes bocagers »*, 131-136.

GUYOT G., BENSALÈM B., DELECOLLE R., 1987 : Brise-vent et rideaux d'abris avec référence particulière aux zones sèches. *Cahier de conservation 15*, FAO (Rome), 385p.

HUFTY A., 1997 : *Introduction à la climatologie : rayonnement et température*. Notes et documents de cours de l'université Laval à Québec, 3<sup>e</sup> édition, 13, 172p.

JANEX F., 1990 : *Etude de coulées gravitaires*. Mémoire d'ingénieur INRA, 32p.

JOLY D., BERT H., FURY R., VERMOT-DESROCHES et JAQUINOT J.P., 1994 : Interpolation des températures à grande échelle. *Revue Internationale de Géomatique*, vol.4 – n°1, 55-85.

JONES G., 1992 : *Plants and microclimate : a quantitative approach to environmental plant physiology*. Second edition, Cambridge University Press, 323p.

KASTENDEUCH P., 1996 : *Analyse à plusieurs échelles et modélisation des régimes de vents d'été dans le Fossé Rhénan méridional*. Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur (Strasbourg), 175p.

LABORDE J.P., 2001 : Usage de la cartographie en climatologie. *Communication au colloque A.I.C. Séville 2001* (sous presse).

LEDDET C. et DEREUDRE J., 1993 : La résistance au gel des bourgeons. *Commission d'agrométéorologie de l'INRA « le gel en agriculture »*, séminaire des 21-22 novembre 1989, 113-128.

LEFEVRE J. et TISSOT P., 1953 : *Arboriculture fruitière*. Nouvelle encyclopédie agricole, 557p.

LOUIS A., 1988 : *Traité d'arboriculture fruitière*. Le courrier du livre, 364p.

MACOUIN M., 1991 : Reconnaître les dégâts de gel en arboriculture fruitière. *Moselle fruits*, 2, 6-16.

MAGS (MINISTERIUM FÜR ARBEIT, GESUNDHEIT UND SOZIALES DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN), 1986 : Luftreinhalteplan Rheinschiene Mitte 1982-1986 Düsseldorf.

MAHRT L., 1986 : *Nocturnal topoclimatology*. WMO, 117, TD 132, Genève, Suisse, 76p.

MAHRT L. et ANDRE J.C., 1982 : The nocturnal surface inversion and influence of clear radiative cooling. *Journal Atmospheric Sciences*, 39, 864-878.

MAHRT L. et LARSEN S., 1982 : Small scale drainage front. *Tellus*, 6, 579-587.

- MATTIOLI P., 1998 : Stima dei danni da gelo e brina su melo. *L'Informatore Agrario*, 4, 115-125.
- MAZERAND A., 1969 : Brise-vent et opération de remembrement en pays de bocage. *Revue du Génie Rural*, 7-12.
- MAZZARELLA D.A., 1972 : An inventory of specifications for wind-measuring instruments. *Bull. Am. Met. Soc.*, 53, 860-871.
- MC ANENEY K.J. et JUDD M.J., 1990 : Multiple windbreaks : an aeolean ensemble. *Boundary-Layer Meteorology*, 54, 129-146.
- MESLAND C., LOISEAU S. et BELTRANDO G., 1995 : Evaluation de l'impact sur le climat local de la mise en eau d'un lac en Champagne : réflexion méthodologique préliminaire. *Publ. de l'Associat. Internat. de Climatol.*, 8, 265-272.
- METEO-FRANCE, 1992 : *Impact du barrage de Vieux-Pré sur la climatologie locale*. Rapport du service météorologique interrégional nord-est, 65p.
- METEO-FRANCE, 1996 : Normales climatiques 1961-1990. Tome 1 "stations métropoles", 452p.
- MISSENARD A., 1965 : *Conductivité thermique des solides, gaz et de leur mélanges*. Eyrolles, Paris, 554p.
- MONET R., 1982 : *Le pêcher*. Brochure CTIFL, 132p.
- MONTHEITH J.L., 1973 : *Principles of environmental physics*. Ed. Arnold, 241p.
- MORLON P., 1989 : Du climat à la commercialisation : l'exemple de l'Altiplano péruvien. *Editions de l'ORSTOM "Le risque en agriculture"*, 187-224.
- NORD M., 1991 : Shelter effects of vegetation belts-results of field measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 54, 363-385.
- OKE T.R., 1987 : *Boundary Layer Climates*. Second edition, London, 372p.
- ORGANISATION METEOROLOGIQUE MONDIALE, 1990 : Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques. 5<sup>ème</sup> éd., Genève OMM, n°8.
- PALTRIDGE G.W. et PLATT C.M.R., 1976 : Radiativ processes in meteorology and climatology. *Dev. Atmos. Sci.*, Amsterdam, 318p.
- PAUL P., 1997 : Les risques de modifications furtives du climat régional liées aux activités humaines : le cas du Fossé rhénan méridional. *Publ. de l'Univ. de Bourgogne « les risques liés au climat » sous la direction de D. Lamare*, 175-185.
- PELLI T., 1977 : *Emissionskataster für Motorfahrzeuge in der Schweiz 1970. Technische Beilage 1, Verkehr in den städtischen Agglomeration, Datenermittlung und theoretische Betrachtungen*. Eidg. Amt für Umweltschutz, Zürich, Bern.
- PERRAUDIN G., 1965 : Résistance au gel printanier de quelques espèces et variétés fruitières. *Phytoma*, 166, 13-19.

- PEU VAST J.P., BAROUX E., BELLIER O. et SEBRIER M., 1999 : Le problème de l'activité des failles de Nîmes, de Salon-Cavaillon et de la Moyenne Durance (SE de la France) : apports de la géomorphologie structurale. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, 327-358.
- REBUFFET P., 1969 : *Aérodynamique expérimentale*. Dunod, tome 1, 815p.
- ROBINSON P.J. et HENDERSON-SELLERS A., 1999 : *Contemporary Climatology*. Longman, 2<sup>nd</sup> Edition, 315p.
- QUENOL H. et BRIDIER S., 1995 : *Influence d'un ouvrage linéaire en remblai (T.G.V. Est européen) sur le climat local et le microclimat en Champagne viticole*. Mémoire de maîtrise (direction : BELTRANDO G.), université Denis Diderot, 70p.
- QUENOL H., 1996 : *La circulation du mistral aux abords de haies brise-vent : approche méthodologique pour l'étude de l'impact d'un ouvrage en remblai -le T.G.V. Méditerranée-sur le climat local*. Mémoire D.E.A. « Interface Nature/Société », 52p.
- QUENOL H. et BELTRANDO G., 1999 : Modifications de l'organisation de l'espace agricole générées par l'implantation de la ligne T.G.V. Méditerranée : le cas de la commune de Mallemort en Provence. *Terres du Nord*, 4, 255-260.
- QUENOL H., BRIDIER S., BELTRANDO G., DE ROSNY G et FRANGY J.P., 2002 : Variabilité spatiale du CO à l'échelle de la rue en fonction du trafic automobile, de la morphologie de la rue et du climat local à Paris, présentation d'un poster à l'*European Geophysical Society*.
- RAVENEAU J., 1997 : *Cartographie assistée par ordinateur, CartAO*. Notes de cours, LATIG, Département de géographie, Université de Laval, Québec, 9, 214p.
- RAYO-DIAZ J.B., LAQUIDAIN M.J. et GONZQLEZ-LATORRE J., 1996 : Sintomatologia específica de danos por helados tardías en melocotonero y almendro. *Fruticultura Profesional*, 79, 19-27.
- REBUFFET P., 1967 : *Aérodynamique expérimentale*. Tome 1, Dunod, 815p.
- REESE R.L. et GERBER J.F., 1969 : An empirical description of cold protection provided by a wind machine. *Jour. Am. Horti. Sci.*, 94, 697-700.
- REKLIP, 1993 : Atlas climatique du Fossé Rhénan Méridional. Editions Coprur.
- RINGUELET R., 1969 : Les brise-vent. *Revue de l'aménagement et de l'équipement du milieu rural*, 632-642.
- ROUSSEL I., 1997 : La pollution de l'air. Risque climatique ou risque anthropique ? Sa maîtrise est-elle possible ? *pub. de l'univ. de Bourgogne « les risques liés au climat »*, 163-174.
- ROTEN M. 1969, Recherches microclimatiques sur la vallée du Rhône en Valais. Thèse Doctorat de l'université de Fribourg (Suisse), 195p .
- SANDERS L., RUAS A., DUMOLARD P. et GUARNIERI F., 1994 : Compte rendu de l'atelier « SIG et autres outils ». *Colloque Géopoint S.I.G., Analyse spatiale et aménagement*, 207-210.



## Figures et tableaux

- SARMIR I., 1995 : Variabilité spatio-temporelle des températures minimales et des dégâts du gel dans le vignoble champenois. Thèse de Doctorat de l'Université Denis Diderot, Paris, 285p.
- SCHREIBER K.F., 1965 : Etude du risque de gel à l'ouest du lac de Neuchâtel. *Phytoma*, 31-34.
- SEGUIN B., 1990 : La température de surface d'un couvert végétal et son état hydrique. Possibilité d'application à la surveillance des forêts par satellite. *Revue forestière française XLII, n° spécial « espaces forestiers et incendies »*, 106-111.
- SEGUIN B., THOUY G. et COGNET M., 1975 : Caractérisation des inversions nocturnes lors des gelées de printemps dans un verger de la moyenne Vallée du Rhône. *Notes techniques INRA Avignon*, 1-17.
- SHEPPARD P.A., 1946 : An improved design of cup anemometer. *J. Sci. Instr.*, 17, 218-221.
- SIMON J.C., 1988 : Les effets biologiques des brise-vent et des aménagements régionaux. *Encyclopédie des Techniques Agricoles*, 1173, 1-9.
- SMITH M.W., 1979 : Principes de la propagation du gel et des échanges d'énergie à la surface du sol. « gel des sols et des chaussées » *Ass. Des Ingénieurs des Ponts et Chaussées*, 9, 25-28.
- SOLTNER D., 1988 : L'arbre et la haie. *Sciences et Techniques Agricoles*, 7-19.
- SOLTNER D., 1994 : *Planter des haies*. Sciences et Techniques Agricoles, Soltner Edition 7<sup>ème</sup> édition, Angers, 100p.
- SZABO Z., SOLTESY M. et NYEKI J., 1996 : Frost injury to flower buds and flowers of Cherry varieties. *Webster Acta Hort ISHS*, 410, 315-321.
- TABARD P., 1965 : Variations microclimatiques en fonction du sol et des cultures. *Phytoma*, 167, 23-27.
- TABARD P., 1967 : Etude comparative de divers modes de protection antigel. *Phytoma*, 187, 31-34.
- THERIAULT M., 1995 : *Systèmes d'information géographique : concepts fondamentaux*. 2<sup>ème</sup> édition, LATIG Département de géographie, Université de Laval, Québec, 165p.
- THERIAULT M., 1996 : *Systèmes d'information géographique : concepts fondamentaux*. Notes de cours, LATIG, Département de géographie, Université de Laval, Québec, 12, 165p.
- TOURET V., 1997 : haies composites ou rideaux d'arbres. *Forêt-entreprise*, 118, 51-57.
- VERBRUGGES M., 1989 : Contribution à l'analyse des microclimats au niveau de l'arbre, de couverts forestiers et de parcelles agricoles entourées de brise-vent. Thèse de doctorat, 176p.
- VEZINA G., 1985 : Efficacité de différents types de brise-vent en conditions naturelles dans le sud de la France. *I.N.R.A. Avignon*, 1-85.
- VEYRET Y. et PECH P., 1993 : *L'homme et l'environnement*. PUF, 423p.
- VIDAL F. et GALTIE J.F., 1994 : Intégration de photographies aériennes dans les systèmes d'information géographique par vectorisation automatique. *Géopoint S.I.G. analyse spatiale et aménagement*, 183-186.

*Figures et tableaux*

VIERS G, 1990: *Eléments de climatologie*. Nathan Université, 223p.

VINET F., 1997 : Les risques climatiques, crise et gestion du risque : l'exemple de la recrudescence de grêle de 1992 à 1994. *Les risques liés au climat, Pub. De l'Univ. De Dijon*, 151-161.

VINET F., 1999 : *Le risque grêle en France*. Thèse USTL, 650p.

WANG H. et TAKLE E., 1995 : Numerical simulations of shelterbelt effects on wind direction. *American Meteorological Society*, 34, 2206-2219.

WANNER H., 1991 : *Bienne, climat et pollution atmosphérique d'une ville suisse*. Ed. P. Haupt, Berne et Stuttgart, 455p.

WIERINGA J., 1967 : Evaluation and design of wind vanes, *J. Appl. Meteorol.*, 6, 114-1122.

WILLIAM'S P.J., 1982 : propriétés générales des sols gelés. , 17-20.

YOSHINO M., 1975 : *Climate in a small area : an introduction to local meteorology*. University of Tokyo Press, 549p.

Anonyme, 1998 : *Gel de printemps*. Brochure Ctifl, 151.

Anonyme. 1976 : *Le Temps qu'il fera par le Centre des Glénans*, Edition du seuil.

Anonyme. 1985 : *Le nouveau cours des Glénans*. Editions du seuil.

## FIGURES ET TABLEAUX

---

## LISTE DES FIGURES

---

- Fig I.1 : Diversité géologique aux échelles du bassin versant rhodanien (a) et de la basse vallée de la Durance (b) : d'après Fasseta, 1999 (a) et Peulvast et al, 1999 (b).
- Fig I.2 : Topographie de la basse vallée de la Durance, Modèle Numérique de Terrain (a) et coupe topographique (b).
- Fig I.3 : Occupation du sol et topographie du secteur d'étude.
- Fig I.4 : Schéma de l'interaction entre plusieurs composantes du milieu montrant les perturbations engendrées par l'implantation de la LGV.
- Fig I.5 : Modification de l'occupation du sol, à Mallemort, entre 1995 et 1998, sur une bande de 290 ha, de part et d'autre de la LGV (Quénol et Beltrando, 1999).
- Fig I.6 : Interaction des différents paramètres définissant le risque gélif.
- Fig 1.1 : Différents facteurs intervenant sur le refroidissement nocturne radiatif.
- Fig 1.2 : Mécanismes du refroidissement nocturne en fonction de la situation atmosphérique (adapté de AVC, 1991 et Hufty, 1997).
- Fig 1.3 : Représentation schématique des brises nocturnes soufflant dans une vallée (d'après Fallot, 1992).
- Fig 1.4 : Influence du tracé d'une vallée sur la vitesse du vent, et effet thermique induit (d'après Carrega, 1994).
- Fig 1.5 : Variation des températures minimales en fonction de la topographie (d'après Geslin et Hilaire, 1956).
- Fig 1.6 : Mécanisme du gel dans le végétal (adapté du schéma de Girard, 1994).
- Fig 1.7 : Cycle annuel végétatif des arbres fruitiers (adapté de Louis, 1988).
- Fig 1.8 : Schéma des organes floraux du pommier et du poirier (d'après Louis, 1988).
- Fig 1.9 : Températures critiques du pommier (a) et du poirier (b) en fonction des stades phénologiques.
- Fig 1.10 : Les quatre conditions pour que le mistral se lève (d'après Les Glénans, 1985).
- Fig 1.11 : Fréquence des directions et vitesses du vent dans la vallée du Rhône (calculé à partir des normales climatiques 1961-1990 de Météo France).
- Fig 1.12: Les échelles du climat local appliquées aux coteaux viticoles en Côte d'Or (d'après Chabin, 1996).
- Fig 1.13 : Classification des échelles en situation de gel radiatif.
- Fig 1.14 a, b et c : Terrains expérimentaux et postes de mesures définis suivant l'emboîtement des échelles spatiales pour déterminer l'influence de la LGV sur le gel printanier.
- Fig 1.15 : Représentation schématique de l'influence d'un aménagement régional sur l'écoulement de l'air (A : développement de la couche limite régionale ; B : écoulement à l'échelle parcellaire (d'après Damagnez, 1976).
- Fig 1.16 : Hiérarchisation spatiale des éléments modifiant l'écoulement du mistral.
- Fig 1.17 (a à l) : Capteurs (a à i) et stations d'acquisition de données météorologiques (j à l) utilisés dans cette étude.
- Fig 1.18 : Variabilité thermique nocturne entre un sol nu et un sol enherbé à Mallemort : mesure à 5 cm de profondeur et à 10 cm au dessus du sol (nuit radiative du 15-16 mars 1999).

## Figures et tableaux

Fig 1.19 a et b: Stratification thermique de part et d'autre du remblai T.G.V. (nuit avec arrêt de mistral du 19-20 novembre 1998).

Fig 1.20 : Variation thermique nocturne en fonction de l'orientation du capteur. (nuit du 14-15 décembre 1997).

Fig 1.21 : Système d'Information Géographique, d'après Raveneau (1997).

Fig 1.22 : Exemple de formats matriciel et vectoriel : adapté du schéma de Thériault, 1996.

Fig 2.1 : Schéma illustrant les effets des brise-vent à l'échelle parcellaire sur les échanges radiatifs de courte longueur d'onde (Guyot, 1991).

Fig 2.2 : Schéma illustrant les effets des brise-vent à l'échelle parcellaire sur les échanges radiatifs de grande longueur d'onde (Guyot, 1991).

Fig 2.3 : Représentation schématique des effets des brise-vent sur le bilan radiatif diurne au cours d'une belle journée (d'après Guyot *et al.*, 1987).

Fig 2.4 : Représentation schématique des effets des brise-vent sur le bilan radiatif au cours d'une nuit clair avec vent (Guyot *et al.*, 1987).

Fig 2.5 : Représentation des températures nocturnes par temps clair avec vent (d'après Guyot, 1991).

Fig 2.6 : Températures nocturnes en milieu clos (parcelle n°1) et ouvert (parcelle n°2) en situation de gel radiatif : moyenne toutes les 30 mn suivant un pas de temps de 6 mn (26-27/01/00).

Fig 2.7 : Evolution des températures nocturnes et du taux d'humidité relative en situation radiative sur une parcelle bordée de haies imperméables (parcelle n°1) : moyenne sur 10 mn avec un pas de temps de 2 mn (02-03/02/98).

Fig 2.8 : Représentation par points des températures nocturnes (du coucher au lever du soleil) en milieu clos (parcelle n°3) en situation de gel radiatif : moyenne horaire avec un pas de temps de 2 mn (25-26/01/99).

Fig 2.9 : Représentation par points de l'évolution des températures du lever du soleil (07h50 heure locale) au milieu de matinée sur une parcelle bordée de haies imperméables (parcelle n°3) : moyenne horaire avec un pas de temps de 2 mn (11-12/02/98).

Fig 2.10 : Effet de limitation du rayonnement nocturne par des haies de natures différentes (parcelle n°4) en situation radiative : moyenne toutes les 30mn avec un pas de temps de 6mn (21-22/12/99).

Fig 2.11 : Répartition des points de mesures en amont et en aval d'une haie imperméable.

Fig 2.12 : Températures en situation de blocage d'air froid en amont d'un brise-vent imperméables : moyenne toutes les 30mn avec un pas de temps de 6mn (21-22/12/99).

Fig 2.13: Températures sur un poste en pente dégagé et un poste en situation de blocage d'air froid : moyenne toutes les 30 mn calculée à partir de mesures toutes les 2 mn (18-19/12/99).

Fig 2.14: Températures sur un poste en pente dégagé et un poste en situation de blocage d'air froid : moyenne toutes les 30 mn calculée à partir de mesures toutes les 2 mn (16-17/04/99).

Fig 2.15 : Répartition des points de mesures en amont et en aval d'une haie perméable.

Fig 2.16 : Températures en amont et en aval d'un brise-vent perméable : moyenne toutes les 30mn avec un pas de temps de 6mn (21-22/12/99).

Fig 2.17 : Relation entre topographie et températures minimales (d'après Bootsma, 1975).

Fig 2.18: Relation entre la topographie, la nature des haies brise-vent et la température minimale lors d'une nuit de type radiatif sans vent : (21/22 décembre 1999).

## Figures et tableaux

Fig 2.19: Ecart thermique entre un secteur au vent et un secteur protégé en aval d'une haie imperméable par temps advectif : moyenne horaire calculée avec un pas de temps 2mn (12/13 février 1999).

Fig 2.20: Variabilité spatiale de la température sur une parcelle bordée de deux haies imperméables par temps advectif : moyenne horaire calculée avec un pas de temps de 2mn (12-13/02/99).

Fig 2.21 : Représentation par points des températures nocturnes (du coucher au lever du soleil) en milieu clos (parcelle n°9) en situation de gel advectif : moyenne horaire avec un pas de temps de 2 mn (30-31/01/99).

Fig 2.22 : Evolution de la température en fonction de la vitesse du vent en situation d'arrêt de mistral : données brutes, pas de temps 2 mn (14-15/12/98).

Fig 2.23 : Evolution de la température en fonction des arrêts de mistral nocturnes : données brutes, pas de temps 2 mn (période du 02 au 05/02/1999).

Fig 2.24 : Variabilité spatiale de la température sur une parcelle bordée de deux haies imperméables par arrêt de mistral : moyenne réalisée toutes les 30 mn à partir d'un pas de temps de 2mn (14-15/02/99).

Fig 2.25 : Comportement du taux d'humidité relative entre secteur au vent et secteur protégé sur une parcelle bordée de deux haies imperméables par situation d'arrêt de mistral : moyenne réalisée toutes les 30 mn à partir des données relevées à un pas de temps de 2 mn (14-15/02/1999).

Fig 2.26 : Evolution des températures en fonction de la vitesse du vent sur une parcelle bordée de deux haies brise-vent imperméables par situation d'arrêt de mistral : moyenne réalisée toutes les 30 mn suivant des données relevées toutes les 2 mn (02-03/02/1999).

Fig 2.27 : Ecart de températures entre le secteur abrité par la haie et le secteur brassé lors de l'arrêt de mistral : moyenne réalisée toutes les 30 mn suivant des données relevées toutes les 2 mn (02-03/02/1999).

Fig 2.28 : Evolution de la température au cours d'une nuit marquée par une phase advective (jusqu'à 01:00) et une phase calme avec la présence d'un brouillard épais (de 01:00 à 06h00) : moyenne réalisée toutes les 30 mn suivant des données d'un pas de temps 2mn (15-16/12/1998).

Fig 2.29 : Représentation par points des températures nocturnes (jusque en milieu de matinée) en milieu clos en situation radiative avec un brouillard épais : moyenne horaire avec un pas de temps de 2 mn ; disposition des 16 capteurs similaires à la figure 2.8 (14-15/02/1998).

Fig 2.30 : Profils thermiques sur une parcelle bordée de haies (a) et sur une parcelle ouverte (b) : (16-17/12/1998).

Fig 2.31 : Stratification verticale des températures sur une parcelle bordée de haies imperméables (a) et sur une parcelle ouverte (b) : moyenne sur 30 mn à partir de données d'un pas de temps de 2 mn (16-17/12/1998).

Fig 2.32 : Mesure de températures à 50cm, 1m50 et 3m en amont et en aval d'une haie imperméable faisant barrage aux écoulements d'air froid : relevés instantanés (26-27/01/2000).

Fig 2.33: Stratification thermique par temps advectif sur une parcelle bordée de haies imperméables : moyenne sur 30mn à partir d'un pas de temps 2mn (14-15/12/1998).

Fig 2.34: Profils thermiques suivant le type de temps sur une parcelle ouverte et sur une parcelle bordée de haies brise-vent.

Fig 2.35 : Evolution des température à 10 cm dans le sol en fonction de la position à la haie sur une parcelle cloisonnée en situation radiative : moyenne horaire suivant des données d'un pas de temps de 1 mn (25-26/01/1999).

Fig 2.36 : Evolution des température à 10 cm dans le sol en fonction de la position à la haie sur une parcelle cloisonnée durant une période avec succession d'arrêts nocturnes du mistral : moyenne horaire suivant des données d'un pas de temps de 1 mn (02-03-04-05/02/1999).

Fig 2.37 : Evolution des température à 10 cm dans le sol en fonction de la position à la haie sur une parcelle cloisonnée après un arrêt de mistral : moyenne horaire (03-04/02/1999).

Fig 2.38 : Evolution de la température dans un bourgeon de poirier (stade phénologique chute des pétales H) en fonction de la température de l'air libre en situation radiative : données brutes avec un pas de temps de 2 mn (01-02/04/1999).

Fig 2.39 : Evolution de la température dans un bourgeon de poirier (stade phénologique gonflement apparent C3) en fonction de la température de l'air libre en situation radiative : données brutes avec un pas de temps de 2 mn (17-18/02/1999).

Fig 2.40 : Evolution de la température dans un bourgeon de poirier (stade phénologique pétales visibles E2) en fonction de la température de l'air libre en situation radiative avec un passage nuageux : données brutes avec un pas de temps de 2 mn (21/22/1999).

Fig 2.41 : Evolution de la température dans un bourgeon de poirier (stade phénologique pétales visibles E2) en fonction de la température de l'air libre en situation d'arrêt de mistral : données brutes avec un pas de temps de 2 mn (18-19/03/1999).

Fig 2.42 : Contournement d'un mur opaque (d'après Gandemer, 1991).

Fig 2.43 : Représentation schématique de l'effet d'un brise-vent imperméable (a) et d'un brise-vent perméable (b) sur l'écoulement de l'air (d'après Guyot, 1984).

Fig 2.44 : Ecoulement du mistral en aval d'une haie imperméable : rose des vent réalisées avec des données enregistrées suivant un pas de temps d'une seconde (30/04/1997).

Fig 2.45 : Ecoulement du mistral en aval d'une haie brise-vent imperméable : moyenne toutes les 10 mn à partir d'un pas de temps de 10 seconde (07/07/1999 de 11h00 à 16h00).

Fig 2.46 : Schéma de la protection théorique en aval d'une haie imperméable.

Fig 2.47 : Ecoulement du mistral en aval d'une haie perméable : rose des vent réalisées avec des données enregistrées suivant un pas de temps d'une seconde (22/04/1997).

Fig 2.48 : Schéma de la protection théorique en aval d'une haie perméable.

Fig 2.49 : Classement des zones de production agricole par ordre de gélivité décroissante (d'après Bordreuil, 1975).

Fig 2.50 : Localisation des secteurs agricoles gélifs (d'après Bordreuil, 1975).

Fig 2.51 : Direction des écoulements nocturnes et postes de mesures pour les relevés à l'échelle locale.

Fig 2.52 : Direction des écoulements nocturnes entre Mallemort et Senas lors d'une nuit de type radiatif : mesures itinérantes, (20-21/10/1998).

Fig 2.53 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle locale en situation radiative : moyenne toutes les 15 mn (30-31/10/1997).

Fig 2.54 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle locale en situation radiative : moyenne toutes les 30 mn (14-15/11/1997).

Fig 2.55 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle locale en situation radiative : moyenne toutes les 30 mn (14-15/11/1997).

## Figures et tableaux

Fig 2.56 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle locale en situation advective : moyenne toutes les 30 mn (05-06/12/1998).

Fig 2.57 : Emplacement des 16 points de mesures à l'échelle méso-locale (de part et d'autre de la LGV).

Fig 2.58 : Hiérarchisation des éléments du milieu pouvant perturber les paramètres météorologiques de chaque point de mesures à l'échelle méso-locale.

Fig 2.59 : Direction des écoulements nocturnes entre Mallemort et Senas lors d'une nuit de type radiatif (14-15/09/1998).

Fig 2.60 : Comportement aérologique avant et après l'implantation de la LGV Méditerranée dans le secteur de Mallemort/Senas.

Fig 2.61 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle méso-locale (de part et d'autre de la LGV) en situation radiative avec temps ensoleillé la veille : températures minimales (a) et températures instantanées (b) 30-31/03/1999.

Fig 2.62 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle méso-locale (de part et d'autre de la LGV) en situation radiative avec temps ensoleillé la veille : températures minimales (a) et températures instantanées (b) 17-18/03/1999.

Fig 2.63 : Evolution de la température de part et d'autre de la LGV en fonction de la vitesse du vent et de l'état du ciel : moyennes réalisées toutes les 30 mn (02-03/12/1998).

Fig 2.64 : Stratification thermique sur la parcelle témoin (a) et au sud de la LGV (b) au cours d'une nuit radiative avec temps ensoleillé la veille : moyennes toutes les 30 mn (02-03/12/1998).

Fig 2.65 : Températures dans le sol (à 10 cm) sur le versant sud du remblai et sur une parcelle témoin : moyennes réalisées toutes les 30 mn (2-3/02/1999).

Fig 2.66 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle méso-locale (de part et d'autre de la LGV) en situation radiative avec temps nuageux la veille : températures minimales (12-13/04/1998).

Fig 2.67 : Profils de températures au moment du minimum de la nuit du 20 au 21 mars 2000.

Fig 2.68 : Profils de températures à proximité du remblai (a) et sur une parcelle témoin (b) : (14-15/11/1998).

Fig 2.69 : Propriétés thermiques du remblai favorables à l'accumulation d'énergie solaire et à la restitution en phase nocturne.

Fig 2.70 : Influence de l'inclinaison et de l'exposition des surfaces du remblai sur le rayonnement reçu par le sol (schéma réalisé à partir d'une figure de Gaucher G., 1968).

Fig 2.71 : Irradiation solaire reçue par des pentes d'orientations différentes en fonction de leur inclinaison aux dates des équinoxes.

Fig 2.72 : Températures du substrat des « versants » du remblai et températures de l'air en situation radiative : sol nu et tassé, à 5 cm de profondeur, moyenne horaire à partir d'un pas de temps de 2 mn (30-31/03/1999).

Fig 2.73 : Evolution de la température à proximité de la LGV et sur une parcelle éloignée en situation advective : moyennes réalisées toutes les 30 mn (15-16/11/1998).

Fig 2.74 : Evolution de la température à proximité de la LGV et sur une parcelle éloignée en situation advective : moyennes réalisées toutes les 30 mn (22-23/03/1999).

Fig 2.75 : Stratification thermique à proximité de la LGV (a) et sur une parcelle éloignée (b) en situation advective : moyennes réalisées toutes les 30 mn (15-16/11/1998).



## Figures et tableaux

Fig 2.76 : Ecart de températures entre l'emprise S.N.C.F. et les parcelles voisines en situation advective avec ralentissement du mistral : moyennes réalisées toutes les 30 mn (19-20/11/1998).

Fig 2.77 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle méso-locale (de part et d'autre de la LGV) en situation d'arrêt de mistral en fin de nuit : températures minimales 19-20/04/1998.

Fig 2.78 : Vitesse du vent enregistrée dans l'emprise de la LGV et évolution des températures à l'échelle méso-locale après un arrêt de mistral en milieu de nuit : vitesse du vent toutes les 5 mn et moyennes de températures réalisées toutes les heures (23-24/03/1999).

Fig 2.79 : Variabilité spatiale des températures à l'échelle méso-locale (de part et d'autre de la LGV) en situation d'arrêt de mistral en milieu de nuit : températures minimales 23-24/03/1999.

Fig 2.80 : Evolution des températures à proximité de la LGV et sur une parcelle éloignée en fonction de la vitesse du vent en situation d'arrêts de mistral précédant une journée nuageuse : moyennes réalisées toutes les 30 mn (12-13/11/1998).

Fig 2.81 : Hiérarchisation selon les niveaux d'échelle imbriquées des différents éléments du milieu influençant la répartition des basses températures en situations radiatives (journées nuageuses et ensoleillées) et par arrêt de mistral (quand le flux s'arrête en début de nuit) sur le terrain expérimental.

Fig 2.82 : Hiérarchisation selon les niveaux d'échelles imbriquées des différents éléments du milieu influençant la répartition des basses températures en situation advective et par arrêt de mistral (quand le flux s'arrête en fin de nuit).

Fig 2.83 : Ecoulement du mistral aux abords de l'emprise de la LGV (16/10/1996).

Fig 2.84 : Comportement du vent canalisé suivant la largeur du couloir : exemple d'un vent peu comprimé (d'après Gandemer, 1991).

Fig 2.85 : Ecoulement du mistral aux abords du remblai de la LGV : mesures ponctuelles (15/04/1997).

Fig 2.86 : Ecoulement du mistral aux abords du remblai de la LGV : mesures simultanées (28/05/1997).

Fig 2.87 : Comportement du vent canalisé suivant la largeur du couloir : exemple d'un vent comprimé (d'après Gandemer, 1991).

Fig 2.88 : Effet de canalisation et de déviation d'un vent (d'après Gandemer, 1991).

Fig 3.1 : Localisation et topographie des parcelles expérimentales dans le secteur de Bellegarde (Gard).

Fig 3.2 : Répartition des dégâts dus au gel printanier sur deux parcelles de pommiers dans une exploitation arboricole de Bellegarde (Gard) : observation des fruits réalisées en août 1998.

Fig 3.3 : Nombre moyen de fruits sur la parcelle B (contrôles réalisés les 28 /29 août 1998) : profil ONO-ESE (a) et profil NNE-SSO (b).

Fig 3.4 : Caractéristiques de l'occupation du sol à proximité de la parcelle expérimentale.

Fig 3.5 : Répartition des arbres fruitiers et des instruments de mesures sur la parcelle expérimentale.

Fig 3.6 : Evolution des températures nocturnes sur la parcelle expérimentale au cours des nuits gélives du 23-24/03/1999 (a), du 29-30/03/1999 (b) et du 30-31/03/1999.

Fig 3.7 : Répartition des dégâts provoqués par le gel sur la parcelle expérimentale Harrow Sweet : (analyse réalisée en mai 1999).

## Figures et tableaux

Fig 3.8 : Secteurs les plus gélifs de la parcelle Harrow Sweet en situations de gels radiatif et d'arrêt de mistral.

Fig 3.9 : Evolution des températures en fonction de la position du capteur météorologique par rapport au rayonnement solaire sur la parcelle expérimentale : données toutes les 10 s (04/07/99).

Fig 3.10 : Localisation des parcelles expérimentales (a) et répartition des températures minimales (b) à l'échelle méso-locale : 22-23/03/1998.

Fig 3.11 : Evolution de la température en situation de gel radiatif sur le poste expérimental n°11 : données toutes les 10 mn (22-23/03/1998).

Fig 3.12 : Répartition des dégâts après la gelée du 22 au 23 mars 1998 : taux de fleurs gelées par corymbes touchés (a) et taux de corymbes avec au moins une fleur gelée (b).

Fig 3.13 : Variétés (a) et stades phénologiques (b) sur les parcelles expérimentales lors de la gelée du 22 au 23 mars 1998.

Fig 3.14 : Contrôles sur fruits en amont d'une haie imperméable en situation de blocage d'air froid.

Fig 3.15 : Variabilité spatiale des dégâts sur deux parcelles fruitières à proximité de la LGV.

Fig 3.16 : Répartition des fruits boisés (variété de pommes rouges) en aval d'une haie imperméable : Ctifl Balandran (analyse réalisée durant l'été 1998).

Fig 3.17 : Proportion de fruits abîmés par le vent en aval d'une haie imperméable (a) et d'une haie perméable (b).

Fig 3.18 : Répartition des dommages issus des effets mécaniques du mistral sur une parcelle de pommiers Early Gold à proximité de la LGV.

Fig 4.1 : Utilisation du SIG pour modéliser le risque de gel radiatif.

Fig 4.2 : Utilisation du SIG pour modéliser le risque de gel advectif.

Fig 4.3 :

Fig 4.4 : Modèle Numérique de Terrain 2D du terrain expérimental de Mallemort/Senas à l'échelle méso-locale : (source : Visual Dem 75x75m reinterpolé à 25x25m).

Fig 4.5 : Terrains expérimentaux de part et d'autre de la LGV sur les communes de Mallemort et Senas : source : Aérial 1998).

Fig 4.6 : Occupation du sol sur le terrain expérimental de Mallemort/Senas à l'échelle méso-locale : état des lieux réalisé en avril 2000.

Fig 4.7 : Utilisation de la « matrice vectorielle » comme passerelle informatique permettant d'intégrer des données matricielles dans un S.I.G. vectoriel.

Fig 4.8 : Intégration du MNT et de la direction de la pente à l'échelle méso-locale dans la « matrice vectorielle ».

Fig 4.9 : Représentation de la zone d'accumulation d'air froid en amont des haies imperméables en fonction de la direction de la pente (exemple pour le carré A).

Fig 4.10: Construction de la zone d'abri du mistral en aval de la haie brise-vent.

Fig 4.11 : Interpolation spatiale des températures minimales aux échelles méso-locale et microclimatique en situation de gel radiatif (12-13/04/1998) : représentation en modes vectoriel et matriciel (a) et représentation en mode matriciel (b).

Fig 4.12 : Interpolation spatiale des températures minimales aux échelles méso-locale et microclimatique en situation de gel advectif (a) et d'arrêt de mistral (b).

Fig 4.13 : Parcelles fruitières où le risque gélif est accentué par le remblai ferroviaire : estimation pour la période mi-février/mi-avril (a) et pour le mois de mai (b).

## Figures et tableaux

Fig 4.14 : Utilisation du SIG pour modéliser le risque des effets mécaniques du mistral à proximité de la LGV.

Fig 4.15 : Caractéristiques des haies brise-vent sur le terrain expérimental de Maillemort/Senas : nature et porosité (a) ; hauteur et porosité (b).

Fig 4.16 : Modélisation du mistral aux abords des haies brise-vent avant et après l'implantation du remblai ferroviaire.

Fig 4.17 : Modélisation spatiale des secteurs agricoles où l'écoulement du mistral est modifié par les haies brise-vent et les infrastructures de la LGV.

Fig A.1 : Schéma de la girouette pour vents forts (conception et fabrication Quénol H, Bridier S. et Quénol A.) (*Vue en profil et en plan*).

Fig A.2 : schéma de l'anémomètre à coupelles (vent fort) : *vue de profil et en plan* (conception et fabrication Quénol A., Quénol H. et Bridier S.).

Fig A.3 : schéma de l'anémomètre à hélice (vent faible) : *vue de profil et vue d'une pôle* (conception et fabrication Quénol A.).

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tab 2.1 : Schématisation de la variabilité spatiale des températures nocturnes en milieu clos par divers types de temps favorables aux gelées printanières.

Tab 3.1 : Variabilité spatiale des dates de floraison et des seuils de sensibilité au gel sur la parcelle Harrow Sweet<sup>cov</sup> aux cours des trois nuits analysées (23-24/03, 29-30/03 et 30-31/03).

Tab 3.2 : Période durant laquelle la température critique pour les organes végétaux a été atteinte et dépassée lors des trois épisodes gélifs.

Tab 3.3 : Statistiques sur la proportion de fruits gelés de la parcelle Harrow Sweet après les gelées printanières de 1999.

## LISTE DES PHOTOS

---

Photo 1 : Défauts qualitatifs sur poiriers provoqués par le gel (cliché H. Quénol).

Photo 2 : Evolution du boisage provoqué par le frottement des feuilles sur une pomme Granny Smith cov (d'après Ctifl, 1998).

Photo 3 : Effet d'une haie imperméable sur la gelée blanche.

Photo 4 : Caractéristiques de la surface du merlon antibruit de la LGV.

Photo 5 a et b: Pommes abîmés par le vent observées pendant les analyses agronomiques.

Photo 6 : Simulation de l'écoulement du vent en aval d'un obstacle imperméable.

## annexes

# ANNEXES

---

## ANNEXE 1 : LOI DE FOURIER

---

$$J_q = -K \frac{\delta T}{\delta Z}$$

Flux de chaleur
Gradient de température

Soit un corps homogène dont la température locale  $T$  ne dépend que de la coordonnée  $Z$ , donc est uniforme dans tout plan perpendiculaire à  $OZ$ . Définissons la densité de courant d'énergie (ou de chaleur)  $J_q$ , comme la quantité d'énergie traversant par unité de temps une surface unité orthogonale à  $OZ$  ;  $J_q$  s'exprime donc en  $W.m^{-2}$ . Si la température est uniforme ;  $\delta T / \delta Z = 0$  et le courant  $J_q$  est nul ; par contre pour  $T$  non uniforme ;  $\delta T / \delta Z \neq 0$ , il y a courant d'énergie  $J_q \neq 0$ . Expérimentalement,  $J_q$  est d'autant plus intense que  $\delta T / \delta Z$  est plus grand, or si la variation spatiale de  $T$  n'est pas trop forte, il y a proportionnalité : c'est la loi de Fourier (1815) où  $K$  est la conductivité thermique. Le signe « - » indique que ce courant est bien dirigé vers les températures décroissantes.

Le sens du flux de chaleur dépend donc de la position relative des températures de surface par rapport aux couches profondes. Dans le cas d'une température de surface inférieure à celles des couches sous-jacentes, la restitution de chaleur du sol se réalise de la profondeur vers sa surface puis l'atmosphère. Ce flux se réalise d'autant plus vite que la température de surface décroît. D'après la loi de Fourier, le flux dépend de la conductivité thermique du sol, donc des caractéristiques thermiques de chacun de ses constituants (Girard, 1994)

## ANNEXE 2 : VENT, BRISE ET ECOULEMENTS GRAVITAIRES ?

---

Par souci de clarté, il est nécessaire d'apporter quelques précisions sur le sens de certains termes utilisés fréquemment dans notre analyse. Les notions de *vent*, de *brise*, et d'*écoulement* ont une signification bien définie en climatologie et en météorologie. « Le vent et la brise sont deux manifestations ressemblantes de phénomènes fondamentalement distincts » (Aupetit, 1991). Le *vent* est un déplacement d'air horizontal issu de phénomènes d'échelle météorologique. Le *vent météorologique* s'écoule, avec une déviation provoquée par la force de Coriolis, des anticyclones vers les dépressions. A l'échelle planétaire, la répartition des vents est donc en relation avec le champ de pression. La *brise* est provoquée par des mécanismes d'échelle aérologique. « Elle n'obéit pas à une quelconque loi planétaire d'échange entre les grandes masses d'air, mais à des causes locales, liées à la nature des substrats, des reliefs et l'heure du jour et de la nuit » (Aupetit, 1991). Les brises thermiques sont générées par des différences de températures provoquant ainsi un gradient de pression horizontal. Le système des brises thermiques suit un cycle diurne. La journée, les versants exposés au soleil se réchauffent plus vite que ceux à l'ombre. L'air réchauffé se détend et la brise s'installe du bas vers le haut de la pente : il s'agit de la *brise de pente ascendante* (ou *anabatique*). La nuit, le phénomène est inverse ; l'air froid issu du rayonnement infrarouge terrestre s'écoule par gravité de long de la pente : c'est la *brise de pente descendante* (ou *catabatique*). Les termes caractérisant les brises nocturnes diffèrent suivant l'échelle spatiale à laquelle se produit le phénomène : la *brise de vallée descendante* définit l'écoulement gravitaire principal dévalant vers la plaine et les *brises de versant*, les écoulements secondaires qui se déversent dans la vallée et alimentent la brise de vallée descendante.

## ANNEXE 3 : FICHE TECHNIQUE ET DÉTAILS DE LA CONSTRUCTION DES CAPTEURS

### A.3.1 Fabrication des capteurs météorologiques : girouettes et anémomètres

La fabrication des capteurs météorologiques a nécessité des connaissances en électronique (ouvrages et avis de spécialistes) et l'utilisation de matériaux adaptés (ex : tissu de carbone, balsa, ...). La réalisation de ce type d'appareil est complexe : tout d'abord, certaines normes doivent être respectées, comme par exemple les lois d'aérodynamique ou les autres caractéristiques du capteur (sensibilité, résolution, temps de réponse, finesse et fiabilité du capteur), sans lesquelles la prise d'information serait inexacte. Puis, le signal renvoyé par l'instrument doit être compatible avec l'enregistreur.

Girouette balsa et carbone : pour écoulements nocturnes faibles et vent fort

Un empennage fait tourner une tige munie d'un aimant au dessus d'un circuit imprimé divisé en 8 secteurs (4 points cardinaux et 4 sous-divisions). Sur chaque direction sont placés des composants électroniques de type contacteurs, appelés ILS, ainsi qu'une résistance d'une force prédéfinie. Les ILS sont des petites ampoules composées de deux fines tiges de métal entrant en contact sous l'influence d'un champ magnétique. Tous les secteurs, reliés entre eux, sont alimentés par un accumulateur d'1.3V. A chaque passage de l'aimant, le contacteur (ILS) se referme et laisse passer le courant par la résistance. La direction du vent est donnée par une tension dont le niveau dépend de la position de l'aimant sur le circuit imprimé. Connaissant, la valeur des résistances pour chaque secteur, on obtient la direction du vent (fig A.1).

La difficulté principale dans la mesure du vent est de limiter le plus possible les perturbations engendrées par le capteur. Cela est valable aussi bien pour la girouette que pour l'anémomètre. Les instruments utilisés dans les stations météorologiques (type Météo France) sont entièrement testés en soufflerie afin d'améliorer l'aérodynamique et d'amoindrir tout type de frottement qui risquerait de modifier les caractéristiques de l'écoulement (Rebuffet, 1967). Par exemple, un grand nombre d'études ont été effectuées pour trouver la forme optimale à l'empennage d'une girouette (Wieringa, 1967). Généralement, les schémas électroniques des girouettes proposent des systèmes où *"l'axe ne présente aucun contact avec la partie fixe et n'offre aucune résistance d'entraînement"* (ex : montage avec potentiomètre) (Mazzarella, 1972 ; Guyot, 1997). Le système avec aimant implique que le boîtier où est situé l'électronique soit proche de la girouette, il a donc fallu donner une forme profilée pour ne pas générer de turbulence. Une autre précaution concerne l'équilibrage du capteur. Le poids de l'empennage doit être équilibré par un contrepoids afin d'éviter à la girouette de prendre une position préférentielle lorsque son axe de rotation n'est pas parfaitement vertical. Avant de disposer les capteurs, les tensions correspondant à chaque direction sont vérifiées.

La consommation énergétique du capteur présente également quelques difficultés. En effet, lorsque l'accumulateur commence à se décharger, la tension délivrée par les résistances diminue et ne correspond plus à celle relevée au cours de l'étalonnage. Il aurait été aisé de solutionner ce problème (ex : système de recharge des accumulateurs par l'énergie solaire)

mais la durée des mesures de vent n'excédant jamais quelques heures, les données n'ont donc pas été affectées.

Cette girouette a été conçue pour l'étude des vents forts. La tige et l'empennage en carbone permettent à la girouette de résister à de fortes vitesses de vent. Pour les écoulements lents (ex : brise de pente  $< 2$  m/s), le poids de l'aimant est trop important pour que la tige de la girouette s'oriente suivant la direction de l'écoulement d'air. Pour ce type d'écoulement, les mesures ont été réalisées ponctuellement à l'aide d'une girouette ultra légère en balsa et d'une boussole. Toutefois, dans des situations de fortes pentes où les brises thermiques sont puissantes, nous avons pu employer les capteurs électroniques.

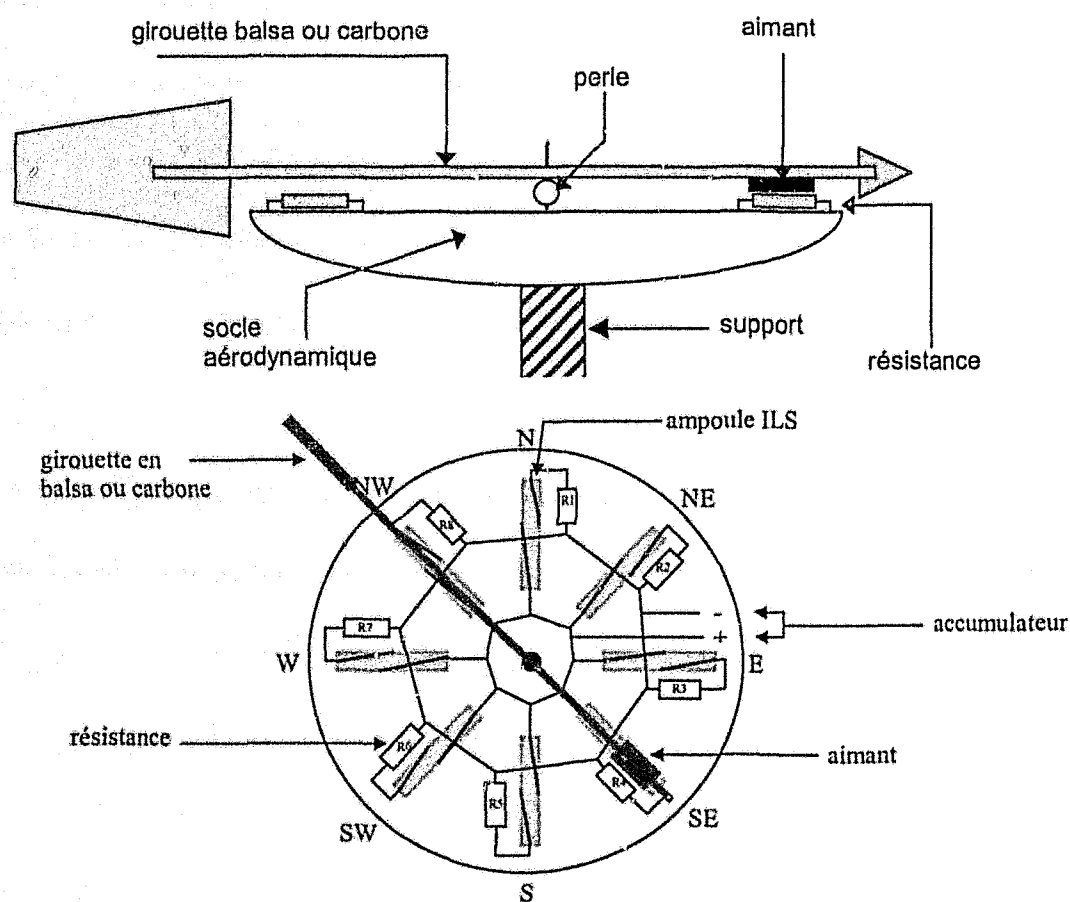


Fig A.1 : Schéma de la girouette pour vents forts (conception et fabrication Quénol H, Bridier S. et Quénol A.) (Vue en profil et en plan).



## Anémomètre à coupelles et à hélice

Mesurer la vitesse du vent demande, à la fois, un appareil robuste pour faire face à des vents puissants et fin pour relever des écoulements faibles de l'ordre du m/s. Il existe de nombreux types d'anémomètres, à pression, thermique, sonique, ... mais les plus couramment utilisés sont les anémomètres à hélice et à moulinet qui fonctionnent grâce à l'énergie cinétique de l'air. Que l'on mesure la vitesse ou la direction, des précautions sont prises pour éviter de perturber l'écoulement par la présence de l'appareil. Un grand nombre d'études ont permis d'optimiser la forme de ces instruments (Frichen, 1967 ; Gill, 1975). En se basant sur ces règles, nous avons fabriqué des anémomètres à moulinet (pour les vents forts) et à hélice type éolienne (pour les vents plus modérés).

Les anémomètres à coupelles et à hélice ont deux parties principales : le capteur rotatif et le corps transmetteur. Ce dernier est un petit moteur électrique de 12V qui transforme la rotation du capteur en tension mesurable par un Data Logger. Plus le vent est fort, plus le courant produit est important. Ces deux capteurs mesurent la vitesse du vent dans un plan horizontal.

L'anémomètre à moulinet est composé de 3 coupelles cylindriques reliées à un axe par des bras en contre-plaqué. La partie rotative du capteur est reliée par une vis au générateur d'énergie. La raison pour laquelle ce type d'appareil n'est utilisé que pour les vents forts est qu'il a l'inconvénient d'exercer un fort couple de freinage sur le moulinet. Le seuil de démarrage ainsi défini se situe aux alentours de 2 à 3m/s. Un certain nombre de précautions ont dû être prises dans l'élaboration de ce capteur notamment au sujet des coupelles. Avant, les anémomètres comportaient 4 coupelles hémisphériques, mais diverses études (Sheppard, 1940 ; Frichen, 1967) ont démontré que 3 coupelles de forme tronconique étaient le compromis idéal. Cette forme apporte un couple d'entraînement plus élevé. Mais cette configuration a l'inconvénient d'être difficilement réalisable. Il est très rare de voir des anémomètres ayant des coupelles autre qu'hémisphérique. *"Par ailleurs, le rapport entre le diamètre des coupelles et leur distance à l'axe de rotation doit être d'environ 2.5 pour ne pas accroître l'inertie du capteur"* (Guyot, 1997). Pour nos anémomètres, il est de 2 (diamètre coupelle = 3cm et distance coupelles/axe = 1.5cm). Ce capteur a été conçu pour l'étude des rafales de mistral et s'avère d'une précision insuffisante pour des vitesses de vent plus faibles (< 2 m/s) (fig A.2). Nous disposons de 5 capteurs de ce type.

L'anémomètre à hélice type éolienne dispose d'une girouette à l'extrémité de laquelle sont fixées 4 pâles reliées à un moteur. Ces pâles sont courbées et orientées de façon à ce que le vent puissent les entraîner. Cet appareil est plus léger et surtout plus sensible que l'anémomètre à coupelles, par contre son inertie est très importante. Nous l'utilisons surtout pour les mesures en situation gélive, notamment pour percevoir la présence de vent faible (à partir de 1 à 2m/s). Dans ce contexte, le plus important est de détecter la présence du vent et non d'estimer sa vitesse exacte (fig A.3). Nous avons fabriqué 2 anémomètres à hélice.

Le générateur électrique du capteur donnant du courant, les tensions mesurées sont converties en m/s. L'étalonnage des capteurs s'est déroulé en deux temps : dans un premier temps, nous utilisons le compteur d'une voiture. Le capteur est fixé sur un mât de 3 mètres afin d'éviter les turbulences générées par le véhicule. La vitesse donnée par le compteur est ensuite comparée avec les tensions enregistrées par le Data Logger. Il est important de préciser que ce type d'opération doit se dérouler par temps calme, sans vent, afin de ne pas

perturber l'étalonnage. Concernant la précision, il est certain que les vitesses ne sont pas relevées au dixième de mètre près et que nous n'obtenons pas les valeurs exactes (compteur de voiture faussé), mais l'essentiel est d'avoir une résolution d'au moins 1m/s et surtout que les données obtenues soient comparables pour tous les capteurs. Dans un second temps, nous avons comparé les valeurs avec l'anémomètre à hélice d'une station météorologique portable. Il s'avère que le capteur de la station portable a un "temps de réponse" un peu plus long que nos capteurs. C'est à dire que l'appareil ne répond pas de façon instantanée à la variation de la grandeur mesurée. De façon générale, les vitesses de vent entre les deux types d'instruments sont comparables.

Une inquiétude porte sur la capacité du moteur à résister à la puissance du vent et à l'environnement dans lequel il est disposé. Nous avons eu, à cet égard, la possibilité d'installer le capteur dans des conditions extrêmes dans le Nord canadien (station de Churchill) par l'intermédiaire de F. Pivot (Pivot, 2000) : il a résisté à des épisodes venteux très puissants et à des températures très basses ( $-45^{\circ}\text{C}$ ).

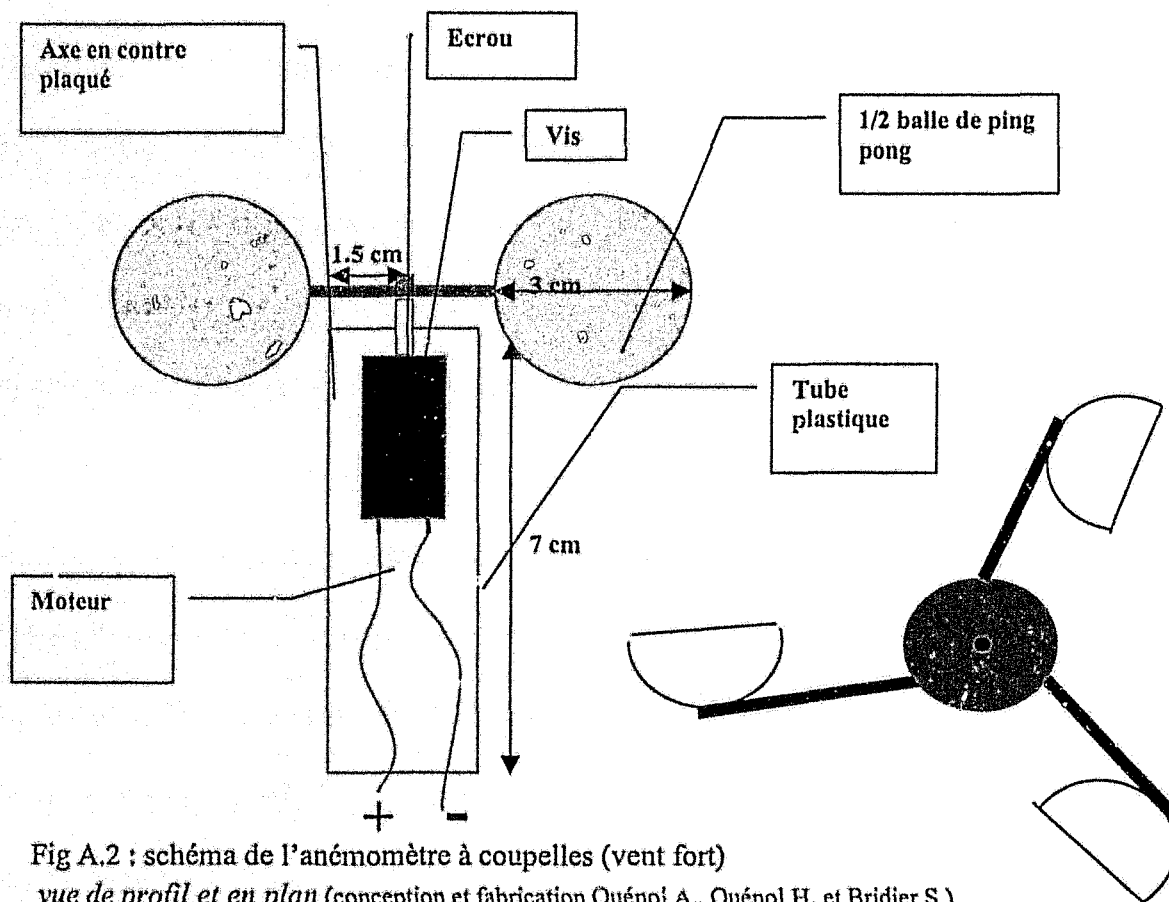


Fig A.2 : schéma de l'anémomètre à coupelles (vent fort)  
vue de profil et en plan (conception et fabrication Quénoï A., Quénoï H. et Bridier S.).

annexes

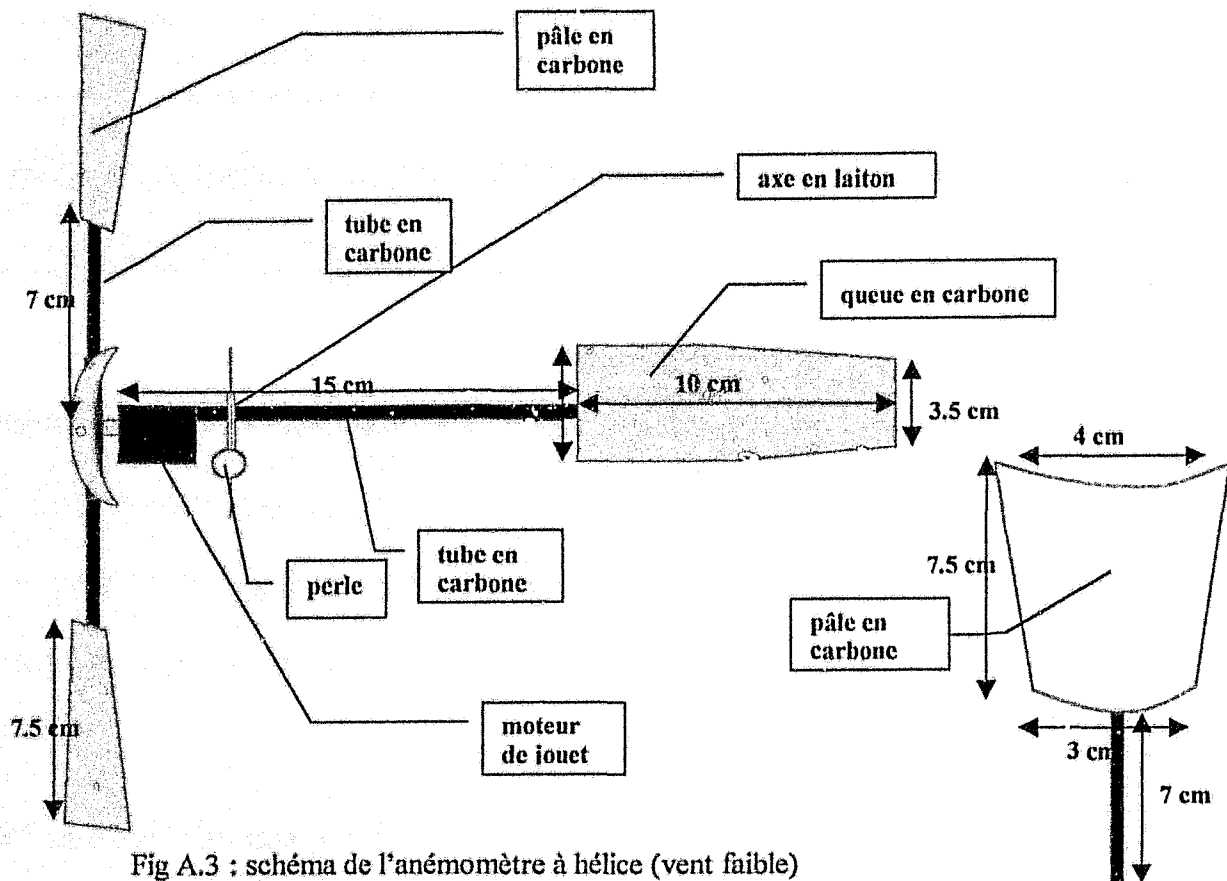


Fig A.3 : schéma de l'anémomètre à hélice (vent faible)  
vue de profil et vue d'une pale (conception et fabrication Quénol A.).

La rencontre d'obstacles pouvant fausser les mesures rend la fabrication d'un capteur délicate et implique des choix judicieux au fur et à mesure de la conception. Dans certains cas, nous avons échoué, soit pour des raisons techniques - *manque de compétence et de temps, notamment pour un capteur mesurant l'intensité des turbulences* -, soit pour des raisons financières - *abandon du projet de soufflerie pour réaliser des mesures en laboratoire* - (fig A.4 et photo). Mais, l'élaboration des girouettes et des anémomètres démontre qu'il est possible d'obtenir du matériel fiable et bon marché.



Photo 6 : Simulation de l'écoulement du vent en aval d'un obstacle imperméable.

### A.3.2 Autres instruments de mesures météorologiques

#### ♦ températures (air, sol, végétal, ...)

La température de l'air par situations gélives nocturnes est mesurée en indice actinothémique. Généralement, les valeurs ainsi obtenues sont nettement inférieures (de 2 à 3°C) à celles lues sous abri car l'indice actinothémique est soumis aux mêmes conditions de rayonnement que les végétaux. En effet, le capteur est exposé aux rayonnements venant de l'atmosphère et du sol (fig. 1.18e). *"Cela paraît être la meilleure référence, car la température du réservoir est voisine de celle des organes les plus froids"* (Foulonneau, 1967).

Deux types d'appareils sont utilisés : le plus classique est un thermomètre à minima à lecture directe. On se base ici sur la dilatation des liquides. L'alcool est préconisé pour les basses températures car il a un point de fusion très bas (environ -90°C). Ce liquide, présent dans le réservoir, s'élève dans une colonne graduée en fonction de la température. Un curseur situé dans le tube de verre est entraîné par le liquide lorsque la température baisse. La précision des thermomètres actinothémiques sont de 0,1°C. Des instruments, placés dans les mêmes conditions (à 1m50, au dessus d'un sol nu et tassé, ...) sur divers points du site, donnent la température minimale de la nuit. Par contre, ils ne permettent pas de faire un suivi régulier des températures et une présence humaine à proximité pour relever les données peut modifier la température.

Les capteurs électroniques (tiny talk) avec enregistreur intégré permettent d'étudier le comportement des températures suivant un pas de temps défini. Les mesures se fondent sur les variations de résistances électriques. La thermistance est un semi-conducteur avec lequel on réalise des thermomètres très sensibles. Ces capteurs achetés dans le commerce sont composés d'un circuit imprimé et étalonnés en usine. Munis d'un enregistreur convertisseur de données et d'une pile au lithium d'1.6V, ils sont autonomes et présentent un grand intérêt pour des mesures sur des postes éloignés. On peut choisir un pas de temps de une seconde à plusieurs mois et la résolution est de 0.3°C. Leur disposition sur le terrain s'effectue dans les mêmes conditions que le thermomètre actinothémique afin qu'il soit soumis aux divers rayonnements (fig. 1.18f).

Ces deux types d'instruments sont étalonnés régulièrement, notamment pour les thermomètres à minima qui sont sujets à "une dérive du zéro". L'étalonnage de ces instruments a lieu au début du printemps avant les campagnes de mesures.

Les mesures de températures dans le sol sont effectuées à l'aide de sondes externes Pt100. Ce modèle obéit aussi à des variations de résistances électriques. Ces capteurs sont disposés horizontalement à une profondeur de 10cm au contact du sol. *"Ce niveau a été choisi de façon à éviter la zone qui se trouve à proximité de la surface où les gradients thermiques très accentués rendent les mesures peu représentatives"* (Verbrugges, 1989) (fig 1.18g).

Les températures d'organes végétaux sont établies à l'aide de thermistances disposées à l'intérieur des bourgeons des arbres fruitiers. Malgré sa petite taille (1.5mm), le capteur engendre une blessure dans le végétal qui peut perturber la température interne. Toutefois, nous disposons, à l'air libre, le même instrument à quelques centimètres de celui présent dans l'organe afin de réaliser une comparaison. La thermistance est similaire à celles utilisées pour les mesures actinothémiques et la résolution est de 0,2°C (fig 1.18h).

♦ humidité de l'air

La teneur en eau de l'air est mesurée grâce à un capteur électronique (Tiny Talk) indiquant le taux d'humidité relative (fig 1.18i). Rappelons que l'état hygrométrique est *"la masse maximale de vapeur d'eau que ce volume d'air pourrait contenir eu égard à la température et à la pression atmosphérique . . . Une humidité relative de 0% correspond à un air totalement dépourvu de vapeur, tandis que la valeur 100% correspond à la saturation"* (Beltrando et Chémery, 1995). Le principe de fonctionnement de cet instrument est le même que celui des températures, c'est-à-dire un capteur relié à un Data Logger qui enregistre les données. Le pas de temps entre chaque mesure varie de 1s à plusieurs mois et la résolution est de 0,3°C. Le capteur est constitué d'une lame de polymère hygroscopique sur laquelle sont fixées deux électrodes métalliques. Ces composants constituent un condensateur dont la capacité va évoluer suivant la présence de molécules d'eau.

♦ vitesse, direction et turbulences

En plus des capteurs fabriqués (fig 1.18a, c et d), nous utilisons des stations météorologiques portables munies d'un anémomètre à hélice. Elles sont très utiles pour les mesures itinérantes. La direction des écoulements catabatiques nocturnes est déterminée à l'aide d'une girouette très légère confectionnée en balsa (fig. 1.18b).

Quantifier les turbulences exige l'élaboration d'un capteur capable de relever la présence de tourbillons aussi bien sur un plan horizontal que vertical. Nous avons essayé de réaliser cet instrument, mais pour les raisons mentionnées précédemment, cela a échoué. En effet, nous avons disposé verticalement un tube en PVC dans lequel un système d'hélice relié à un moteur était fixé. Le principe de dynamo est similaire à celui de l'anémomètre mais le fait que l'air turbulent ne tourne pas toujours dans le même sens est un inconvénient de taille : si le moteur ne produit pas d'énergie, on ne relève aucune information. La solution envisagée a été l'utilisation de girouettes. En zone de turbulences, la tige ne cesse de tourner et indique une multitude de directions. Même si ce système ne peut pas quantifier l'intensité des turbulences, il définit la présence d'un vent tourbillonnant.

### A.3.3 Les centrales d'acquisition

L'acquisition simultanée des données est nécessaire à l'analyse des variations microclimatiques. Ces stations enregistrent des valeurs produites par des capteurs suivant un pas de temps défini. Ensuite, les informations sont stockées dans une mémoire qui est consultable à l'aide d'un ordinateur. Les centrales d'acquisition se présentent sous plusieurs formes : Data Logger à une voie et une station à voies multiples.

♦ à une voie : les Tiny volt

Il s'agit d'un boîtier IP68 (imperméable) dans lequel se trouve une mémoire, un circuit imprimé et une pile (fig 1.18 j). Suivant le paramètre mesuré, le capteur climatique est intégré au dispositif. Dans ce cas, un programme de conversion de données est inclus et transforme les tensions électriques en l'unité du facteur étudié. Dans le cas contraire, une prise de

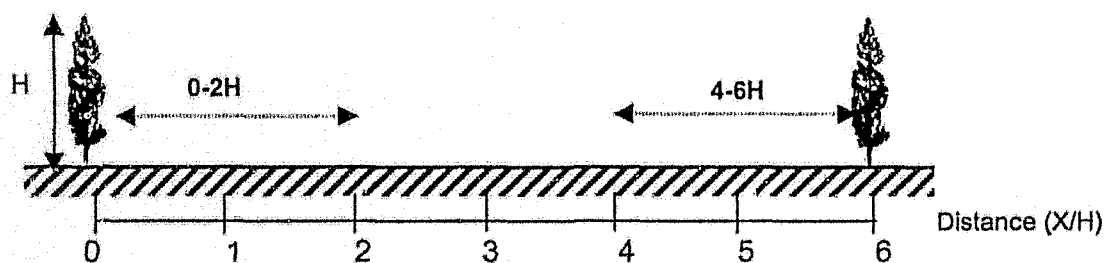
## annexes

connexion permet de relier le capteur. Celui-ci envoie l'information sous la forme de tension. La plage de mesure de l'enregistreur s'étend de 0 à 2.5V. Une sortie, disposée sur le côté de l'appareil permet de connecter l'enregistreur à un ordinateur afin de le programmer et de transférer les informations. Programmer chaque Data Logger suivant le même pas de temps et à la même heure est le moyen d'obtenir des données de façon simultanée sur de nombreux points de mesures éloignés.

### ♦ à plusieurs voies : la Smart Reader

Cette centrale est composée d'un boîtier rectangulaire à la base duquel est intégré un bornier de connexion pouvant relier 7 capteurs par l'intermédiaire de câbles (fig 1.18k). Les grandeurs d'entrée se présentent sous la forme de tension (de 0 à 10V). Le principe de fonctionnement est similaire au premier exemple. Les capteurs fournissent une information que la station d'acquisition enregistre simultanément. Les données sont ensuite récupérées avec un ordinateur. Ce type d'appareil est utilisé sur une petite surface (échelle de la parcelle) à cause de la taille limitée des câbles qui relient les capteurs.

# **ANNEXE 4 : DISTANCE A LA HAIE EN « NOMBRE DE FOIS LA HAUTEUR DE LA HAIE »**

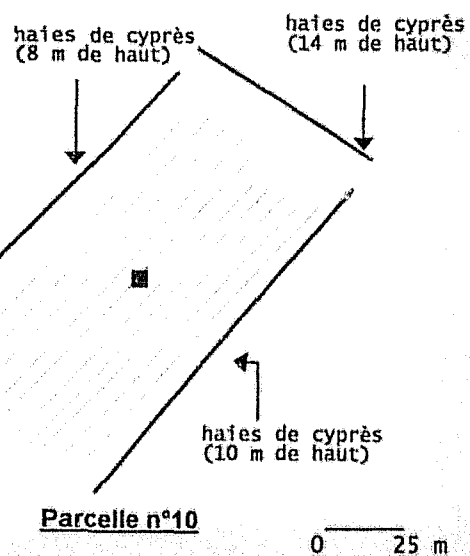
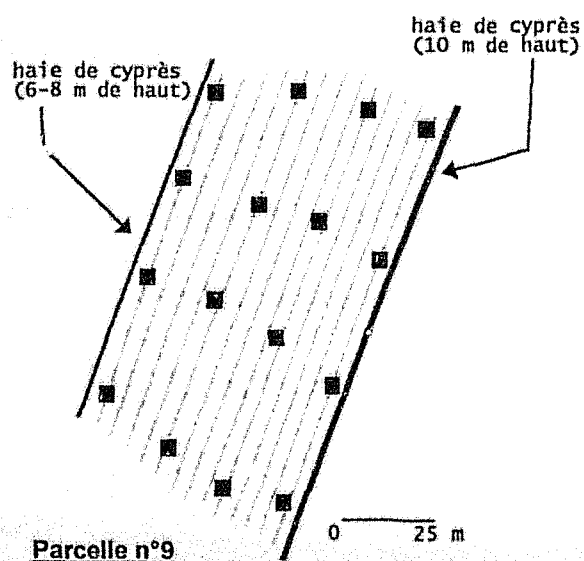
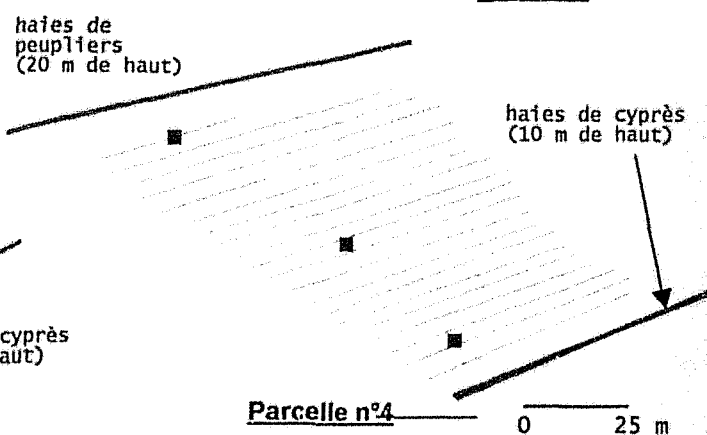
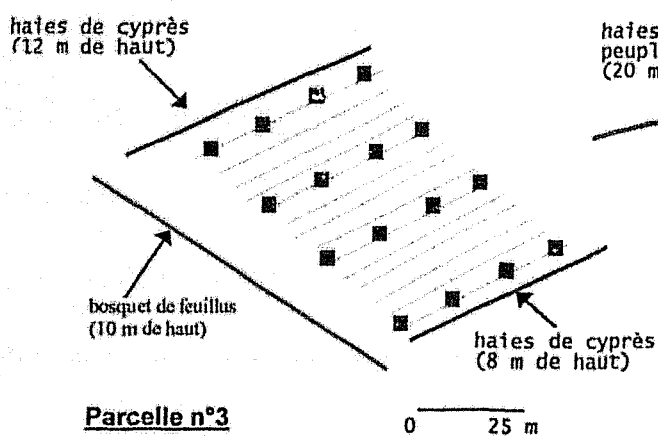
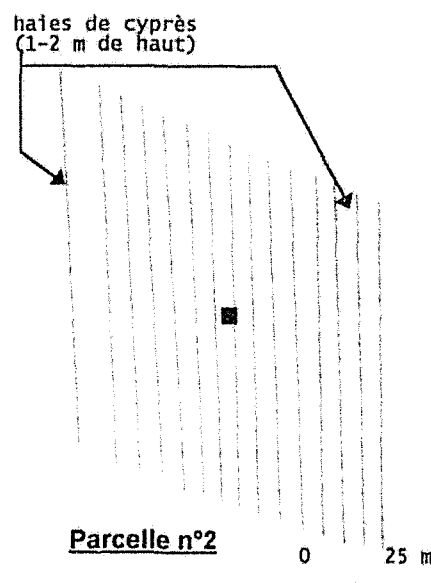
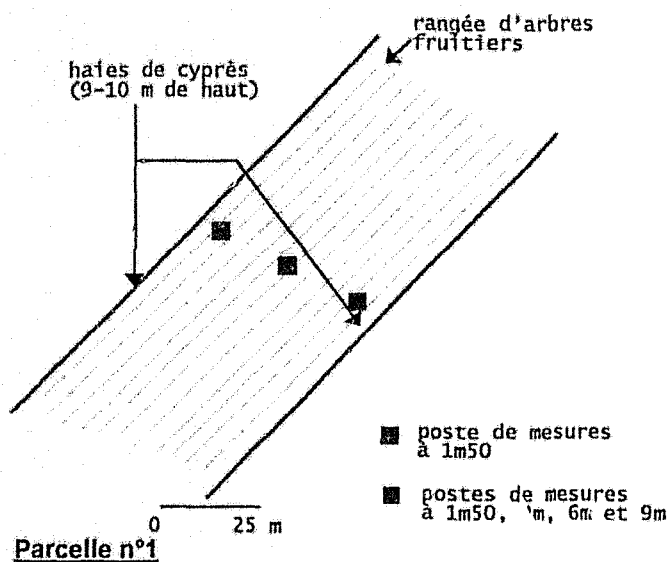


## ANNEXE 5 : LOCALISATION DES PARCELLES EXPERIMENTALES





## ANNEXE 6 : CARACTERISTIQUES ET EXEMPLES DE DISPOSITION DES POSTES DE MESURES SUR LES PARCELLES EXPERIMENTALES.



## **ANNEXE 7 : MICRO-CLIMAT ENGENDRE PAR LES HAIES BRISE-VENT EN SITUATION GELIVE (DETAILS DES NUITS DE MESURES)**

---

### **a) Nuit du 02 au 03 février 1998 (ciel clair, vitesse du vent observé inférieure à 3 m/s)**

L'analyse des températures montre que l'influence de la haie sur le taux d'humidité relative est négligeable. L'amplitude thermique entre les points proches des haies et celui du milieu de la parcelle est en moyenne de 0.5°C avec un maximum de 1.5°C. Cette différence est la même durant toute la nuit. Entre 00h00 et 03h00, la baisse est très importante (-4°C) car le taux d'humidité relative n'est pas à 100%. La forte évaporation nécessaire pour combler le déficit de saturation de l'air s'accompagne d'une consommation d'énergie provoquant un refroidissement rapide. A partir du moment où l'air est saturé, la température diminue plus lentement (-1°C entre 03h00 et 08h00). L'évolution du taux d'humidité durant la nuit agit sur les températures de façon similaire sur tous les points de la parcelle (fig. 2.7).

### **b) et c) Nuit du 25 au 26 janvier 1999 (ciel clair, vitesse du vent observé inférieure à 2 m/s)**

Au cours de la nuit du 25 au 26 janvier 1999 (parcelle 3), des moyennes de températures calculées sur 16 points de mesures ont permis d'observer le comportement thermique de la parcelle tout au long de la nuit. Au coucher du soleil (vers 17h25), on peut remarquer que les températures sont plus élevées (+1.5°C entre 16h30 et 17h30) au nord de la parcelle. Cet écart de température entre les deux extrémités du verger diminue au cours de la nuit et c'est à ce moment que l'on remarque l'effet bénéfique des haies sur les déperditions du sol. Tout au long de la nuit, la réémission du rayonnement IR par les haies induit un gain de température entre 1 et 1.5°C par rapport au centre de la parcelle. Au début du jour (vers 8h00), les premiers rayons du soleil atteignent la partie nord-nord-est de la parcelle ce qui implique une forte hausse de la température à cet endroit (fig 2.8). En situation de forte gelée, le secteur à l'ombre peut rester plusieurs heures après le lever du jour avec des températures négatives. Cette situation a été observée la nuit du 11 au 12 février 1998 (ciel clair, vitesse du vent observé inférieure à 2 m/s) où les zones à l'ombre de la haie et du remblai ont été prises par le gel jusqu'en milieu de matinée. Entre 09 et 10h, les températures varient jusqu'à 12°C du bord au centre de la parcelle (fig 2.9).

### **d) Nuit du 21 au 22 décembre 1999 (temps de type radiatif sans vent jusqu'à 01h00 puis petit passage nuageux et léger vent)**

Dans la nuit du 21 au 22 décembre 1999 (parcelle n°4), plusieurs capteurs de température sont disposés sur une parcelle protégée par une haie de cyprès (imperméable) de 10m de haut et une haie de peuplier (perméable) de 20m de haut. A proximité des brise-vent, on obtient des relevés semblables, supérieurs de plus de 1°C à ceux du centre de la parcelle. Dans cet exemple, l'écart thermique de plus de 1°C est présent entre 0-2H et 2-3H pour les deux haies. La surface parcellaire bénéficiant d'un gain thermique est plus importante du côté de la haie perméable parce qu'elle est plus haute que la haie imperméable (fig 2.10).

**e) Nuit du 21 au 22 décembre 1999** (temps de type radiatif sans vent jusqu'à 01h00 puis petit passage nuageux et léger vent)

La nuit radiative du 21 au 22 décembre 1999 (parcelle n°5 et 6) durant laquelle quelques passages nuageux et un léger vent ont ralenti l'accroissement de l'amplitude thermique, on note une différence de  $1,5^{\circ}\text{C}$  entre les deux côtés de la haie imperméable ( $T_{\text{x min}}$  « 8 m amont » =  $-6,7^{\circ}\text{C}$  ;  $T_{\text{x min}}$  « 8 m aval » =  $-5,3^{\circ}\text{C}$ ). Cette valeur n'est valable que pour les points de mesure à proximité de l'obstacle (8 m, 15 m en amont et 8 m en aval), car plus loin en aval (25 m), l'écart est moins important. C'est le début de la nouvelle accumulation située devant la haie suivante. Notons également qu'en amont, plus on s'éloigne de la haie, moins le refroidissement est important. L'écart de température entre le capteur disposé en zone en pente dégagée (Pas des Lanciers) et celui immédiatement en amont de la haie est comparable (environ  $1,5^{\circ}\text{C}$ ) à celui observé entre les deux côtés de la haie (fig 2.11 et 2.12).

**f) Nuit du 18 au 19 décembre 1998 et la nuit du 16 au 17 avril 1999** (temps de type radiatif, ciel clair, vitesse du vent observé  $< 2\text{m/s}$ )

La nuit du 18 au 19 décembre 1998 (parcelle n°5) deux capteurs ont été disposés à quelques dizaines de mètres de distance. L'un était sur une pente dégagée (Pas des Lanciers) et l'autre en contrebas 25 m en amont d'une haie imperméable. On peut remarquer des différences de températures dépassant parfois  $3^{\circ}\text{C}$  (écart moyen de  $1,7^{\circ}\text{C}$ ). Le ralentissement et la stagnation de l'air froid devant la haie imperméable accentue donc le refroidissement (fig 2.13). La nuit du 16 au 17 avril 1999, les mesures réalisées dans des conditions similaires aux abords de la haie imperméable dans la zone de blocage de l'air froid et au-delà de cette zone montre également un écart supérieur à  $2^{\circ}\text{C}$  sur une distance inférieure à 50m (fig 2.14). Nous notons que les profils de températures sont similaires sur les deux points. En effet, la haie imperméable ne bloque pas totalement l'air froid mais le ralentit. Les fluctuations présentes sur la pente sont également visibles en amont de la haie car l'air continue de s'écouler très lentement.

**g) Nuit du 12 au 13 février 1999** (temps de type advectif, ciel clair, vitesse du mistral observé à plus de  $10\text{m/s}$ )

La nuit du 12 au 13 février 1999 (parcelle n°1), où un vent fort de nord-ouest a soufflé jusqu'au lever du jour, l'écart de température entre le secteur brassé et le secteur protégé varie de  $0,7^{\circ}\text{C}$  à  $1^{\circ}\text{C}$  (fig 2.19). Du coucher au lever du soleil, la température décroît régulièrement sur tous les points de mesures. Plus on s'éloigne de la zone brassée, plus la baisse de la température est importante. Par exemple, sur le rang 1 (à 40m de la haie protégeant du vent), la température minimale atteint  $-6,3^{\circ}\text{C}$  alors que sur le rang 5 (à environ 20m de la haie), elle est de  $-6,6^{\circ}\text{C}$ . Sur le rang 11 (4m de la haie), la valeur minimale est de  $-7,2^{\circ}\text{C}$ . On remarque parfaitement l'action de brassage de l'air et les répercussions sur le comportement des températures (fig. 2.20).

h) Nuit du 14 au 15 février 1999 (arrêt de mistral vers 03h00, ciel clair)

Au cours de la nuit du 14 au 15 février 1999 (parcelle n°1), on utilise le même dispositif expérimental que pour l'exemple du gel advectif afin de pouvoir comparer l'influence des deux types de temps. Quand le vent est présent (de 19h00 à 02h30), l'écart thermique entre le secteur "brassé" et le secteur "protégé" est de 1°C ce qui correspond aux valeurs observées en situation advective. Dès l'arrêt du vent, le refroidissement est rapide sur tous les points de mesures mais plus important en zone préalablement "brassée" (environ -3.5°C en 1/2h et -2.5°C dans de le secteur protégé). L'air étant plus sec dans la zone ventée, le refroidissement par évaporation est accentué. Un écart du taux d'humidité relative de 7 à 10% est enregistré entre les deux secteurs de la parcelle. Cela contribue à la diminution des températures dans la partie de la parcelle où l'air est le plus sec (fig 2.24 et 2.25).

i) Nuit du 15 au 16 décembre 1998 (temps advectif, ciel clair jusqu'à 01h00 puis formation d'un brouillard)

La nuit du 15 au 16 décembre 1998 (parcelle n°1), la présence d'un vent (< à 7m/s) engendre une gelée advective jusqu'à 01h00 (T°Cmin=-2,7°C). Dès l'arrêt du vent, l'air est saturé (tHr=100% vers 01h30). La formation d'un brouillard épais (faible visibilité à quelques mètres) occasionne une remontée subite des températures et stoppe le risque de gel (+4.5°C en 1h). Après cette forte hausse, la température stagne jusqu'au lever du jour. Dans cette situation où le vent agit de façon défavorable, le brouillard est un élément limitatif des déperditions énergétiques grâce à une forte réflexion du rayonnement (fig 2.28).

j) Nuit du 16 au 17 décembre 1998 (temps radiatif, ciel clair, vitesse du vent observé < 2 m/s)

La nuit du 16 au 17 décembre 1998 est très favorable au gel de rayonnement : ciel clair avec peu de vent. Sur la parcelle dégagée, on retrouve l'inversion thermique dans les premiers mètres de l'atmosphère avec un gradient qui atteint -3.3°C entre 1m50 et 8m. La stratification thermique est représentative de ce type de temps, c'est-à-dire, qu'on observe les écarts de températures les plus importants dans les premiers mètres au-dessus du sol - moyenne de -0.6°C et maximum de -1.7°C entre 1m50 et 3m -, alors qu'ils se réduisent au fur et à mesure qu'on prend de l'altitude - moyenne de -0.5°C entre 6 et 8m -. En amont du brise-vent imperméable, le gradient thermique entre 1.5m et 3m est beaucoup plus intense avec une moyenne de -1.4°C et un maximum de -2.2°C. Cependant l'écart entre 1m50 et 8m, n'est pas supérieur à celui de la parcelle ouverte avec un maximum de -3.4°C. Au niveau du sol, la haie amplifie la stagnation de l'air froid en empêchant la circulation de l'air et donc l'homogénéisation des températures. Dans les deux cas, si les profils thermiques font apparaître une amplitude d'inversion forte entre 0 et 3m, celle-ci semble diminuer voir disparaître au dessus de 8m. La limite d'inversion ne paraît pas dépasser 10-15m de haut (fig 2.30 a b et 2.31 a b). Toutefois, il faut préciser que cet exemple concerne une nuit radiative d'hiver où les déperditions radiatives étaient très importantes. L'ensemble des mesures de stratification de l'air ont démontré que les inversions thermiques sont généralement beaucoup moins intenses sur les parcelles ouvertes ou sur les parcelles cloisonnées. Par conséquent, il

faut seulement noter que l'amplitude thermique verticale est plus importante dans un milieu clos.

k) Nuit du 26 au 27 décembre 2000 (temps radiatif, ciel clair, vitesse du vent observé < 2 m/s)

La nuit du 26 au 27 janvier 2000 (parcelles n°5 et 6), des mesures itinérantes à des hauteurs de 50cm, 1m50, 3m et 6m en amont d'une haie imperméable bloquant les écoulements catabatiques ont révélé la présence d'une forte inversion thermique. L'air froid stagnant devant la haie parvient à une hauteur d'environ 5-6m (fig 2.32). Comme nous ne disposons pas de données au-dessus de 6m, nous ne pouvons pas définir la limite de l'inversion. Nous pouvons admettre toutefois qu'elle serait beaucoup moins intense si la parcelle était dégagée ou n'avait pas d'obstacles entravant les arrivées d'air froid.

l) Nuit du 25 au 26 janvier 1999 (temps radiatif, ciel clair)

Au cours de la nuit de gel radiatif du 25 au 26 janvier 1999 (parcelle n°1), on peut remarquer un écart moyen proche de 3°C entre le secteur ensoleillé et celui à l'ombre. Les données en milieu de parcelle sont comparables (+0.4°C) à celles proche de la haie à l'ombre car cette zone est peu soumise, pendant la journée, au rayonnement solaire. L'amplitude thermique entre la partie ensoleillée de la parcelle et celle ombragée peut atteindre une moyenne supérieure à 5°C (fig 2.35).

m) période du 02 au 05 février 1999 (succession d'arrêt de mistral, ciel clair)

La période du 02 au 05 février 1999 (parcelle n°1), une succession d'arrêt de mistral a généré plusieurs nuits gélives. Le capteur disposé côté ombragé de la haie n'a pas dégelé durant ces trois jours. Toutefois, la température des autres points de mesure fluctue en fonction de l'apport solaire (fig 2.36). En milieu d'après midi, la température dans le sol dépasse 10°C dans le secteur ensoleillé. On voit, dans cet exemple, le rôle du rayonnement solaire sur le réchauffement des premières couches du sol.

Le facteur convectif influe sur la température de l'air, mais pas sur celle du sol. La superposition des données moyennes concernant la température du sol et la vitesse du vent ne laisse apparaître aucune relation entre ces deux variables. Seul le rayonnement solaire a une influence sur la température du sol (fig 2.37).

## **ANNEXE 8 : MESURES LIEES AU GEL A L'ECHELLE LOCALE (DETAILS DES NUIITS DE MESURES)**

---

### **a) Nuit du 20 au 21 octobre 1998 (temps radiatif, ciel clair)**

Au cours de la nuit du 20 au 21 octobre 1998, on constate que la brise vient de l'est au niveau du pont de Mallemort, ainsi que des lieux dits la Tapie et les Iscles du mois de Mai (fig 2.52). Au nord-nord-ouest de ces secteurs, au niveau des Tengudes et des Iscles de Malespines, la direction de la brise est d'origine sud-est. La vitesse de la brise, relevée au-dessus de la Durance atteint un maximum de 5m/s et une moyenne de 2.8m/s sur 5mn. Plus au nord-ouest, vers Orgon, le resserrement entre le Luberon et les Alpilles n'entrave pas le passage de la brise mais ralentit quelque peu sa vitesse.

### **b) Nuit du 30 au 31 octobre 1998 (temps radiatif, ciel clair)**

Durant la nuit du 30 au 31 octobre 1997, le fait le plus significatif est le maintien des températures au dessus de 0°C sur le poste proche de la Durance alors que la température chute fortement partout ailleurs (T°C minimale : point n°1 Durance 0°C, point n°3 Orgon -3,5°C ; point n°6 Mallemort -4,7°C ; point n°4 Cazan -6,5°C). La courbe de température du point d'Orgon (n°3) passe rapidement sous le zéro et semblent plutôt stable au cours de la nuit. Sur les points de mesures de Mallemort et d'Eyguières, la baisse des températures est plus brusque et atteint les minima les plus faibles (hormis Cazan qui n'est pas dans la vallée principale). Le poste d'Orgon, disposé dans le resserrement entre les Alpilles et le Petit Luberon est plus influencé par la brise de vallée descendante que Mallemort et Eyguières, ce qui a limité le refroidissement.

La répartition des températures dans la vallée de la Durance ne peut être considérée pour cette nuit là comme un phénomène homogène. En effet, si les températures se maintiennent dans le lit de la rivière, on voit qu'elles peuvent chuter et devenir négatives dans les vergers situés à quelques centaines de mètre de là. On voit dans cet exemple l'action de la brise de vallée sur l'homogénéisation des températures nocturnes. Toutefois, l'écart thermique moyen supérieur à 4°C entre le point n°1 et celui de Mallemort est dû en partie, à l'effet bénéfique de la brise, mais également aux caractéristiques de ce poste de mesures. En effet, le capteur de température a été disposé, pour cette nuit, dans le lit de la rivière au dessus d'un sol composé de galets. Pour les autres nuits de mesures, ce poste a été déplacé sur une parcelle proche de la Durance (fig 2.53).

### **c) Nuit du 14 au 15 novembre 1997 (temps radiatif, ciel clair)**

Dans la deuxième partie de la nuit du 14 au 15 novembre 1997 (temps radiatif), la température moyenne obtenue toutes les trente minutes est positive sur le point de Lambesc alors qu'elle varie de -2,2°C à -4,4°C à Cazan. Dans la vallée principale, les données proche de la Durance sont les moins froides. La température moyenne atteint -1°C alors qu'elle est de -3°C sur le point 6. Deux capteurs ont été disposés volontairement à proximité du remblai

ferroviaire. Nous verrons ultérieurement pourquoi les températures sont plus chaudes à proximité de l'obstacle.

Hormis le poste de Lambesc, les profils des courbes de températures sont assez semblables pour la plupart des points des mesures. Entre 01h30 et le lever du jour, la baisse de la température est régulière à Cazan, à Mallemort et en bord de Durance, même si on remarque une petite fluctuation vers 02h00 pour ce dernier point. A Lambesc, on note une succession de remontées et de baisses de la température. L'absence d'observations des autres variables météorologiques ne nous permet pas d'expliquer ce phénomène (fig 2.54).

#### d) Nuit du 05 au 06 décembre 1997 (arrêt de mistral, ciel clair)

La nuit du 05 au 06 décembre 1997, après l'arrêt de mistral vers 23h00, les températures baissent rapidement sur l'ensemble des points de mesures. Comparé aux situations radiatives analysées précédemment, les écarts thermiques entre chaque poste de mesures sont moins importants. Les températures moyennes des points de la Durance et de Mallemort sont homogènes. On remarque toutefois un petit écart proche de 0,5°C qui correspond sûrement à un ralentissement du vent généré par " l'effet régional " du réseau de laies. Avant l'arrêt du mistral, la température est plus froide (moyenne d'environ 1°C) à Mallemort ; cet écart entre les deux postes n'est pas comblé à la fin de la nuit.

Le poste de mesures placé entre Charleville et Mérindol obtient des valeurs moyennes plus froides d'environ 2°C avec une température minimale de la nuit de -6°C. Ce secteur, abrité par le Petit Lubéron, subit beaucoup moins intensément l'influence du mistral, le refroidissement d'origine radiatif est donc plus important (fig 2.56).

#### e) Nuits du 20 au 21 octobre 1998 et du 14 au 15 septembre 1998 (radiative, ciel clair)

Reprenons l'exemple de la nuit du 20 au 21 octobre 1998 où les conditions radiatives favorisaient l'établissement des brises nocturnes. On remarque parfaitement les deux secteurs délimités de part et d'autre du remblai. La partie nord-est, où la brise de vallée s'écoule suivant un axe est ouest. Au sud-ouest, les écoulements gravitaires suivent les lignes de pente des collines des Pas des Lanciers et de la Mascotte et s'orientent vers le remblai ainsi que vers les secteurs subhorizontaux en contre bas. Le blocage de la brise de vallée par l'obstacle ferroviaire ne s'observe que dans les secteurs où il atteint une hauteur d'environ 15m (remblai + merlon antibruit). Au nord-ouest du site (vers *les Iscles près Malespines*), là où l'ouvrage ne dépasse pas 5m de hauteur, la direction des écoulements observée correspond à la brise de vallée (fig 2.52). Les directions d'écoulements mesurées dans la nuit radiative du 14 au 15 septembre 1998 mettent également en évidence le comportement de l'air au niveau du sol au sud-ouest du remblai. Les brises de pente s'écoulent en direction du remblai. On remarque, qu'au niveau de l'ouvrage ferroviaire, les écoulements gravitaires empruntent les ouvertures. Des mesures réalisées à la sortie des ouvertures font apparaître la présence d'écoulements turbulents de faible vitesse (proche de 1 m/s) avec, par intermittence, des directions correspondant aux écoulements gravitaires et à la brise de vallée (fig 2.59).

## ANNEXE 9 : MESURES LIEES AU GEL A L'ECHELLE MESO-LOCALE (DETAILS DES NUITS DE MESURES)

---

### a) Nuit du 30 au 31 mars 1999 (temps radiatif, ciel clair, ensoleillé durant la journée)

La journée du 30 mars 1999, le sud-est de la France est soumis à l'influence d'une situation de type anticyclonique. Le ciel est ensoleillé la totalité de la journée (94% d'insolation à Marseille) et la température maximale sous abri atteint 20°C (à Marseille). Le vent d'ouest est modéré. Ces conditions atmosphériques n'ont pas évolué pendant la nuit du 30 au 31 mars où le ciel dégagé a provoqué un fort rayonnement nocturne.

La nuit du 30 au 31 mars 1999, les températures minimales relevées sur les points de mesures montrent un zonage thermique hétérogène de part et d'autre du remblai. Les données les plus basses, situées au niveau des Méjeans (point n°13) atteignent -2,2°C, alors que de l'autre côté de la ligne ferroviaire, la température minimale est proche de -1°C. Cette tendance est vérifiée pour l'ensemble des thermomètres à minima disposés sur les parcelles éloignées du remblai. Aux abords du remblai, les températures sont plus élevées ( $T_{min} = -0,6^{\circ}\text{C}$  sur les points 5 et 9). Il semble que le remblai accumule, durant la journée ensoleillée, une quantité d'énergie relativement importante (fort rayonnement direct) et qu'il la restitue durant la nuit, limitant ainsi le refroidissement sur les parcelles limitrophes. Pour les situations anticycloniques très stables, dès que l'on s'éloigne de l'ouvrage de quelques dizaines de mètres, les disparités thermiques sont à nouveau observables avec une variation de plus de 1°C (fig 2.61a). L'analyse des températures instantanées enregistrées toutes les 5 minutes fait apparaître des écarts atteignant 2,5°C à certains moments de la nuit. Au lever du jour, vers 07h00, moment critique pour le végétal, la différence de températures entre les deux côtés du remblai est d'environ 1 à 2°C (fig 2.61b).

### b) Nuit du 17 au 18 mars 1999 (temps radiatif, ciel clair, ensoleillé durant la journée)

La journée du 17 mars 1999, le temps est anticyclonique mais le ciel est couvert sur une partie de la Provence. La fraction d'ensoleillement à Marseille est de 26% alors qu'elle est de 64% à Nîmes (BHER Météo France). Nos observations visuelles, en soirée, démontrent que la situation atmosphérique sur le terrain expérimental s'apparente à celle de Nîmes puisque le ciel est clair.

La nuit du 17 au 18 mars 1999, le zonage des basses températures est similaire à l'exemple précédent. On observe la température minimale la plus faible ( $T_{min} = -1,8^{\circ}\text{C}$ ) dans le secteur plat des Méjeans alors que la température minimale sur les parcelles bordant le remblai est autour de 0°C (fig 2.63a). Le poste de mesures disposé volontairement en amont d'une haie imperméable fait barrage aux écoulements gravitaires et il enregistre des données comparables à celles relevées dans le secteur plat des Méjeans. Le blocage de l'air froid par un obstacle d'échelle microclimatique et la stagnation de l'air au niveau du sol dans un



secteur à topographie plane ont, dans ce cas, les mêmes conséquences sur les températures (fig 2.62a). L'analyse des moyennes thermiques réalisées toutes les 30mn montre une variation supérieure à 1°C entre les postes proches du remblai et celui du Méjeans (fig 2.62b).

### c) Nuit du 02 au 03 décembre 1998

La journée du 2 décembre 1998, le temps est influencé par une pellicule d'air froid et humide de très basses couches avec des conditions anticycloniques. Sur la Provence, le ciel est clair et quelque peu voilé par moment (69% d'insolation à Marseille). Le vent d'est est modéré et la température maximale relevée sous abri est de 13°C.

La nuit du 02 au 03 décembre 1998, l'utilisation d'un anémomètre (point n°16), d'un capteur d'humidité relative (point n°16) placés à 1m50 de haut et de capteurs de températures disposés de part et d'autre du remblai (point de mesures n°5 et n°9) ainsi que sur une parcelle témoin (n°11), a permis d'étudier la structure horizontale de l'air dans les premiers mètres au-dessus du sol. Les conditions atmosphériques de la première partie de la nuit (jusqu'à 01h00) sont favorables à un refroidissement radiatif (vent faible, ciel clair). La deuxième moitié de la nuit est marquée par l'apparition d'un couvert nuageux (entre 01h00 et 04h00) et de la formation de brouillard (entre 04h00 et 09h00). Le vent, très faible jusqu'à 04h00, a ensuite un peu augmenté jusqu'au lever du jour. Le taux d'humidité relative varie de 90 à 100% du coucher au lever du soleil, d'où l'apparition d'un brouillard de rayonnement (fig 2.63).

Durant la phase radiative avec vent inférieure à 1 m/s et ciel dégagé (de 19h00 à 01h00), la température mesurée à 1m50 du sol baisse de 3 à 4°C sur les trois postes expérimentaux. Les données relevées à proximité du remblai sont, en moyenne, supérieures de 0,5°C au sud et au nord du remblai entre 19h00 et 01h00 par rapport au poste témoin. La comparaison entre les données brutes relevées toutes les minutes sur les points n°9 (sud remblai) et 11(témoin) montre un écart atteignant souvent 1,3°C à 1,5°C (max=1,8°C) entre 21h00 et 01h00 (fig 3.63). L'analyse des profils verticaux de températures met en évidence la présence d'une stratification de l'air froid plus ou moins marquée sur les trois postes. C'est sur le mât témoin que la différence de température entre chaque niveau est la plus importante : moyenne de 0,9°C entre 1m50 et 3m, de 0,7°C entre 3m et 6m et de 0,8°C entre 6m et 8m (fig 2.64a). Au sud du remblai, l'amplitude moyenne de température entre 1m50 et 3m est proche de 1°C, mais elle diminue fortement entre 3m et 8m ( $t^{\circ}\text{cmoy}3\text{m}-t^{\circ}\text{cmoy}8\text{m}=-0,6^{\circ}\text{C}$ ) (fig 2.64b). Au nord du remblai, l'absence de données à 3m ne permet pas de donner un profil thermique précis mais celui-ci semble moins prononcé que sur les deux autres postes. En effet, la différence moyenne entre 1m50 et 8m dépasse à peine 1°C. L'utilisation des profils verticaux fait apparaître une stratification différente entre les points de mesures. L'épaisseur de la couche froide atteint 1m50 à proximité du remblai (au sud) alors qu'elle est plus importante sur la parcelle témoin située dans le secteur plat (La Pugère à 600m du remblai).

Entre 01h00 et 04h00, le ciel s'est couvert : les températures remontent sur les trois postes. A partir de 04h00, le ciel s'est à nouveau dégagé et fait place à une forte baisse de la température (-2°C en une heure) puis à une stagnation due à la formation d'un brouillard de rayonnement. « *La concentration de fines gouttelettes d'eau en suspension dans la couche voisine du sol* » piège une partie du rayonnement infrarouge et le réfléchit vers le sol (Beltrando, 1995). Cela se traduit par une homogénéisation de la structure thermique horizontale et verticale du secteur d'étude (fig 2.64).

**d) Nuit du 12 au 13 avril 1998 :**

La journée du 12 avril 1998 est soumise à une situation de type dépressionnaire. Les basses pressions sont centrées sur la France alors que l'alimentation en air froid se poursuit dans un flux cyclonique. Le pourtour méditerranéen connaît quelques éclaircies dues à un fort vent d'ouest entre la Corse et le continent, mais sur notre site expérimental, le couvert nuageux est important. Au cours de la nuit, le ciel se dégage et favorise de gel de rayonnement. Le lendemain matin, le mistral se lève et souffle durant toute la journée.

Après une journée nuageuse et fraîche (maximum de 13°C relevé à 2m sous abri sur la station météorologique « *la Pugère* »), le ciel se dégage en début de soirée, ce qui provoque un refroidissement de type radiatif sur le terrain expérimental.

**e) Nuit du 20 au 21 mars 2000 :**

Le 20 mars 2000, la moitié nord de la France est sous de hautes pressions avec un vent de nord-est. Au sud-est, une goutte froide favorise une instabilité, d'où un important couvert nuageux. En milieu de journée, de l'air frais des basses couches pénètre sur le sud-est et coupe l'instabilité. Le ciel est dégagé jusqu'au lendemain lorsque des conditions anticycloniques de surface et l'absence de nuages favorisent le rayonnement nocturne.

La nuit du 20 au 21 mars 2000, des capteurs électroniques de température sont disposés à 1m50 du sol sur l'ensemble du site ainsi que de 1m50 à 8m de haut sur des mâts au sud-ouest du remblai et sur une parcelle témoin. Cet exemple permet d'observer instantanément sur l'ensemble du site, l'influence du remblai sur les températures nocturnes au niveau de la structure horizontale et verticale de la couche limite. Les conditions atmosphériques sont similaires à l'exemple précédent - *nuit radiative après une journée nuageuse et fraîche* - mais quelques petits passages nuageux ont provoqué une remontée des températures entre 22h00 et 03h00. Les températures, enregistrées selon un pas de temps de 5 mn, atteignent -2,2°C sur une parcelle située immédiatement au sud du remblai (n°9) alors qu'elle est de -0,6°C au nord (n°5). En fin de nuit, l'écart atteint même 2°C. Le poste le plus froid correspond toujours au secteur plat où l'air froid est ralenti et stagne (les Méjeans n°13). En début de nuit, entre 19h00 et 22h00, la température baisse de 10°C en 3 heures. L'écart thermique de part et d'autre du remblai est également proche de 2°C avant la remontée des températures due au couvert nuageux.

Les mâts, munis de capteurs à 1,50 , 3 , 6 et 8m et disposés au sud du remblai (n°9) et sur une parcelle témoin (n°11) permettent d'analyser la structure verticale de l'air froid en contact avec le remblai. A côté de celui-ci, la stratification de l'air montre que la couche la plus froide se situe de 0 à 3m, le minimum étant proche de -2°C pour les deux capteurs présents à ce niveau. L'écart thermique moyen entre ces deux niveaux est très faible. On remarque une différence significative entre 3m et 6m. Par contre, la stratification n'est plus présente entre 6m et 8m. Le mât témoin ne dispose pas de données à 3m à cause d'une panne du capteur. Cependant, les valeurs relevées à 1m50 correspondent à celles mesurées à 6m aux abords du remblai. D'ailleurs, sur la parcelle témoin, on peut remarquer que les températures relevées à 1m50 et à 6m sont assez proches ce qui présume d'une faible stratification de l'air froid sur ce poste (fig 2.67).

**f) Nuit du 14 au 15 novembre 1998 :**

Le 14 novembre 1998, la situation est toujours dépressionnaire avec la présence d'un ciel nuageux sur l'ensemble de la Provence (fraction d'insolation de 8% à Marseille). En début de nuit, le ciel se dégage. Le lendemain, la zone dépressionnaire se décale vers l'est, ce qui engendre un fort mistral dans la vallée du Rhône.

Nous présentons les profils de températures réalisés à partir des moyennes horaires sur les deux points de mesures (n°9 et 11). Le contraste apparaît clairement entre le profil (a), qui correspond à l'empilement des couches d'air froid bloquées par le remblai et le profil (b) correspondant à la stratification de l'air dans le secteur subhorizontal. Sur le profil thermique (a), l'amplitude de l'inversion nocturne apparaît forte entre 1,5 et 6m ( $t^{\circ}\text{cmoy}_{6\text{m}} - t^{\circ}\text{cmoy}_{1,5\text{m}} = 2^{\circ}\text{C}$ ), elle semble disparaître au-dessus (fig 2.68a). Sur le profil (b), l'amplitude de l'inversion est moins importante ( $t^{\circ}\text{cmoy}_{6\text{m}} - t^{\circ}\text{cmoy}_{1,5\text{m}} = 1,2^{\circ}\text{C}$ ) mais elle ne s'annule pas à 8m (fig 2.68b). On remarque que les températures moyennes horaires relevées à 8m sur les deux mâts sont très proches (ex :  $t^{\circ}\text{cmoy}_{\text{n}^{\circ}9} = 3,1^{\circ}\text{C}$  et  $t^{\circ}\text{cmoy}_{\text{n}^{\circ}11} = 3,2^{\circ}\text{C}$ ). L'obstacle ferroviaire agit donc sur la stratification de l'air jusqu'à 6m au-dessus du sol.

**g) Nuit du 15 au 16 novembre 1998**

Le 15 novembre, la présence d'une zone de hautes pressions sur le nord-ouest de l'Europe et d'un minimum dépressionnaire sur l'Europe de l'Est génère un vent de nord-ouest sur l'ensemble de la France. La vitesse du vent atteint 20 nœuds (40 km/h) à Marseille et le ciel est dégagé (91% de fraction d'insolation). Cette situation atmosphérique ne change guère durant la nuit.

Au cours de l'épisode advectif du 15 au 16 novembre 1998, le mistral souffle la totalité de la nuit. La vitesse moyenne du vent, obtenue toutes les minutes sur une parcelle à proximité du remblai (poste n°9), est de 6,5m/s. La température est plus élevée aux abords du remblai par rapport à la parcelle témoin (n°11). L'écart moyen est de  $0,6^{\circ}\text{C}$  avec un maximum instantanée de  $2,4^{\circ}\text{C}$ . Le mistral, engouffré dans l'emprise ferroviaire, empêche la stratification de l'air froid au niveau de la couche limite. La compression de l'air entre le remblai et les haies provoque une déviation du vent sur les parcelles et accentue les turbulences. Le capteur disposé sur la parcelle témoin est sous l'influence du réseau de brise-vent. « L'effet régional » des haies qui se traduit par une réduction générale du vent sur toute la parcelle (Guyot, 1991) limite l'action de brassage de l'air au niveau du sol. La vitesse du vent, moins importante sur la parcelle n°11, crée une zone d'abri où le refroidissement radiatif est à nouveau prépondérant (fig 2.73).

**h) Nuit du 19 au 20 novembre 1998 :**

Le 19 novembre 1998, les conditions atmosphériques sont également favorables à l'établissement du mistral : anticyclone centré sur l'Europe du Nord et dépression au sud de l'Italie. Le flux d'altitude de nord-nord-ouest apportent de l'air froid sur l'ensemble de la France. Le ciel est clair dans le sud de la France (91% d'insolation). Le mistral, ayant soufflé toute la journée, ralentit fortement durant la nuit mais ne s'arrête pas complètement.

**i) Nuit du 23 au 24 mars 1999 :**

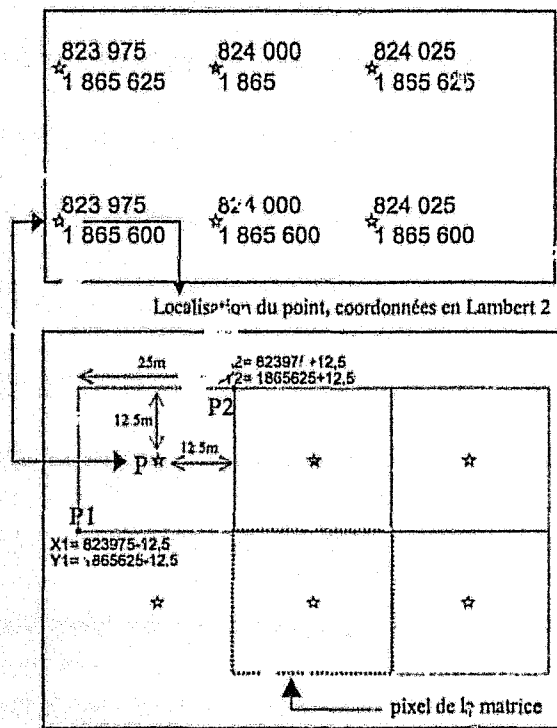
La journée du 23 mars 1999, une zone dépressionnaire est centrée sur l'Italie alors qu'une grande partie de la France est soumise à des conditions anticycloniques. Le mistral souffle fort (25 nœuds à Marseille à 12UTC) jusque en fin de journée où il faiblit pour s'arrêter en milieu de nuit. La fraction d'ensoleillement est de 95% à Marseille.

A la suite d'un arrêt de mistral au cours de la nuit du 23 au 24 mars 1999, les températures minimales sont plus clémentes sur les parcelles longeant le remblai. En effet, les températures sur l'ensemble du site varient entre  $-1,8^{\circ}\text{C}$  et  $-2,2^{\circ}\text{C}$ , alors que de part et d'autre du remblai, elles avoisinent  $-1^{\circ}\text{C}$ . Cet action de brassage de l'air par le vent n'est présente que quelques dizaines de mètres à côté de l'emprise (fig 2.80). Durant la phase advective (de 20h00 à 00h00), les variations thermiques entre chaque point de mesures sont faibles (maximum de  $0,5^{\circ}\text{C}$ ). Après l'arrêt du vent, vers 00h00, le refroidissement s'intensifie sur l'ensemble des points de mesures (en moyenne  $-6^{\circ}\text{C}$  en 3 heures). Cette forte baisse, induite par un air très sec et une forte déperdition énergétique d'origine radiative, est moins importante aux abords du remblai que sur les autres points de mesures (fig 2.79). De manière comparable aux situations radiatives, le remblai accumule le rayonnement solaire au cours de la journée et la restitue durant la nuit. Le point de mesures des « Méjeans », généralement le plus froid en situation radiative, enregistre la baisse la moins importante durant la phase advective, mais dès l'arrêt du vent, le refroidissement s'intensifie. Au lever du jour, les températures les plus basses relevées sur ce poste mettent en évidence la présence de l'air froid dans ce secteur subhorizontal. Si le vent s'arrête suffisamment tôt, le système d'écoulements gravitaires et d'accumulation d'air froid dans les secteurs plats ou en amont d'obstacles se reforme rapidement. C'est le cas du point de mesures n°12 qui se situe en amont d'une haie imperméable (fig 2.79).

**j) Nuit du 12 au 13 novembre 1998 :**

Le 12 novembre 1998, une perturbation traverse la France dans un flux de nord ouest. Son activité se réduit en arrivant dans le sud-est mais le ciel est couvert, cependant, après quelques éclaircies en fin de journée, le ciel se dégage durant la nuit (fraction d'insolation de 30% à Marseille). Le mistral noir souffle jusque en milieu d'après-midi.

## ANNEXE 10 : CONSTRUCTION DE LA « MATRICE VECTORIELLE »



### Dans le logiciel Surfer :

Il faut en premier lieu disposer d'un fichier d'altitudes où les points sont espacés de 25 mètres. Les opérations sont réalisées dans Surfer pour recalculer une grille d'un pas de 25 mètres à partir des données d'altitude provenant des données issues d'un satellite RADAR (Visu 1 Dem).

### Dans le tableur Excel :

On sait que chaque point est distant de ses voisins de 25 mètres. On peut donc créer une matrice couvrant l'espace d'étude où chaque pixel sera construit en prenant comme centre un point du fichier d'altitude. Pour chaque point P caractérisé par des coordonnées X et Y, on procède de la manière suivante pour calculer les coordonnées P1 et P2 d'un carré correspondant au point en bas à gauche (P1) et en haut à droite (P2) :

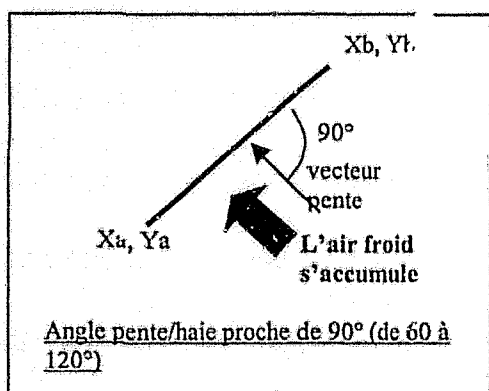
| X | Y | X1      | Y1      | X2      | Y2      |
|---|---|---------|---------|---------|---------|
| x | y | =x-12,5 | =y-12,5 | =x+12,5 | =y+12,5 |

A partir de ces coordonnées, on crée un fichier pour importer les carrés dans Mapinfo en générant un format MIF.

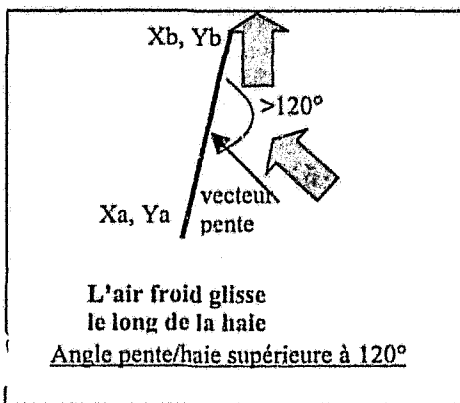
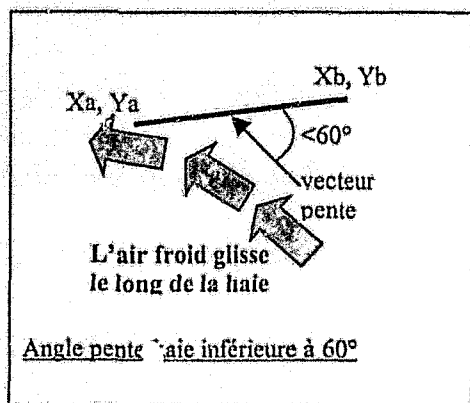
### Dans Mapinfo :

On importe le fichier, les carrés sont créés et forment une matrice.

## ANNEXE 11 : DÉTERMINATION DES ZONES D'ACCUMULATION D'AIR FROID EN AMONT DES HAIES IMPERMEABLES.



Toutes les haies sont construites de manière à ce que leur origine soit située à gauche (vers l'ouest) et leur fin soit située vers la droite (vers l'est). De ce fait, l'angle formée par la haie et la pente est compris entre  $0$  et  $180$  degrés. Lorsque la haie est orthogonale à la pente ( $90^\circ$ ), ou que l'angle haie/pente est compris dans une fourchette de  $30$  degrés de part et d'autre de l'orthogonalité ( $90 - 30 = 60$  limite inférieure ;  $90 + 30 = 120$  limite supérieure), l'air froid pourra s'accumuler contre la haie. Au de là de cette fourchette, l'air va glisser contre la haie et sera peut ralenti.



## ANNEXE 12 : DIFFERENTES PHASES DE LA CONSTRUCTION DE LA LGV.



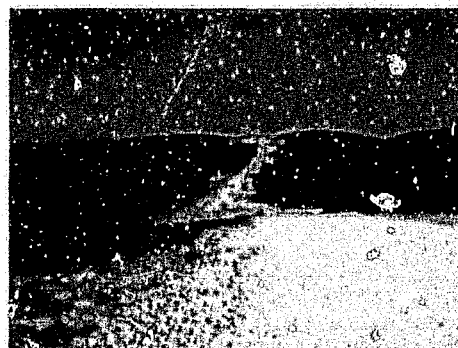
Secteur initial.



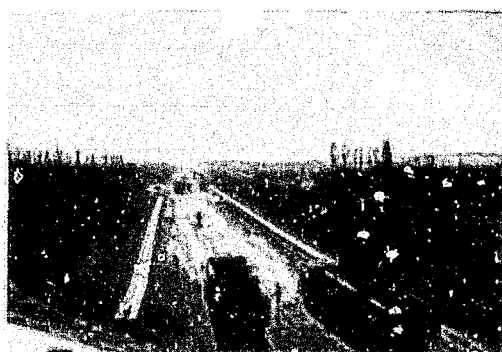
Arrachage des haies brise-vent  
et des cultures.



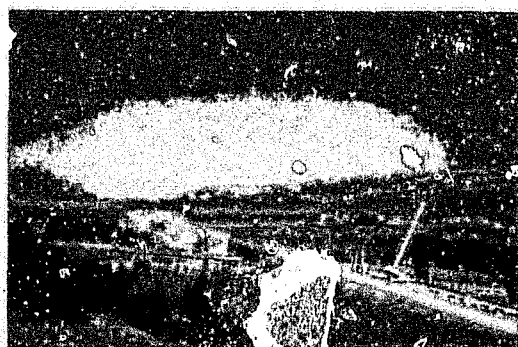
Emprise ferroviaire.



Début de la construction du remblai.



Remblai et merlons antibruit.



Ligne à Grande Vitesse, Méditerranée.



Merlon antibruit.

# FIN

