

50376
1989
305-1

EXCLU DU PRÊT

N° d'ordre: 384

50376
1989
305-1

Ecole Universitaire D'Ingénieurs de Lille (E.U.D.I.L.)

THESE
DE DOCTORAT

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DE LILLE FLANDRES ARTOIS

EN GENIE CIVIL

Option: cycle urbain de l'eau - pollution des eaux

par

Christian PREAUX



IMPACT DES PRATIQUES AGRICOLES
ET DU DEFAUT D'ASSAINISSEMENT
SUR LA TENEUR EN NITRATES
DES EAUX SOUTERRAINES :
APPLICATION A L'ARRONDISSEMENT
DE CAMBRAI (NORD - FRANCE)

DOCUMENT N° 1/5

Soutenu le 23 juin 1989 devant la commission d'examen

Président: J.-P. HENRY

Rapporteurs: P. CELET
B. GODFROY
A. LANDREAU

Examineurs: P. CAULIER
H. MAILLOT

LISTE DES DOCUMENTS

Document n° 1: Impact des pratiques agricoles et du défaut d'assainissement sur la teneur en nitrates des eaux souterraines: application à l'arrondissement de Cambrai (Nord - France). 131 p., 13 tabl., 24 fig. et 7 ann. (17 p., une fig.)

Document n° 2: Etude des moyens destinés à réduire la teneur en nitrates des eaux souterraines prélevées au champ captant d'Airon-Saint-Vaast (Pas-de-Calais) - Partie II: étude de la nappe d'eau souterraine. 61 p., 11 tabl., 10 fig., 12 ann. (22 p., 13 tabl., une fig.) et 12 pl. h.t. dont une en couleurs à 1/25 000.

Documents n° 3 à 5: Alimentation en eau potable de l'arrondissement de Cambrai (département du Nord) - Constat de l'état actuel de la distribution publique et prospectives d'aménagements.

Document n° 3: Rapport technique - Dossiers communaux. 671 p., 222 tabl., 116 plans, 88 graphiques.

Document n° 4: Rapport technique - Synthèse. 170 p., 28 tabl., 3 fig. et 17 ann. (129 p., 20 tabl., 16 fig.).

Document n° 5: Atlas des eaux souterraines de l'arrondissement de Cambrai. (format 61,5 cm x 34,5 cm) 20 p., 6 tabl., 14 fig., 7 encarts (6 fig.) et 6 pl. couleurs à 1/100 000.

1. INTRODUCTION

1.1. Cadre de l'étude

La dégradation de la qualité des nappes phréatiques par les nitrates inquiète de plus en plus les collectivités locales. Ce travail de recherche s'inscrit dans cette préoccupation.

Le phénomène de pollution nitratée a ainsi touché la nappe de la craie du Nord-Pas de Calais dans les zones où elle est libre. Cette nappe constitue le principal aquifère régional puisqu'elle fournit de l'ordre de 80 % de l'alimentation en eau potable pour laquelle le volume prélevé s'élève à 260 millions de m³/an. La carte schématique (pl.I du document n° 2) montre l'étendue des secteurs touchés et potentiellement vulnérables (zone de nappe libre). Le tableau I présente la situation par une quantification des unités de distribution et de la population concernées par la pollution azotée (Ministère chargé de la santé, 1988).

DIVISION ADMINISTRATIVE	TENEUR MAXIMALE MESUREE DURANT LA PERIODE 1985-1986					
	40 à 50 mg/l de nitrates			Plus de 50 mg/l de nitrates		
	Nombre d'unités de distribution affectées	Population concernée		Nombre d'unités de distribution affectées	Population concernée	
		Nombre (x 1000)	Part du total (%)		Nombre (x 1000)	Part du total (%)
Département du Nord	18	80	3	2	9	0,35
Département du Pas-de-Calais	47	274	19	30	153	11
Région	65	354	9	32	162	4

Tableau I : Nombre d'unités de distribution et population concernées par la pollution nitratée (Région Nord - Pas-de-Calais).

Vue l'ampleur de la dégradation et les risques de répercussions sur la santé des consommateurs, différents organismes ou administrations se sont préoccupés du problème. Ils ont lancé et financé des études pour mieux cerner les causes, l'évolution à terme et donc les conséquences à en tirer dans le but de définir la politique à tenir dans le futur. (Crémille L., 1985). Cette action nécessitait la prise en considération de l'ensemble des aspects de la pollution nitratée des eaux souterraines. Elle a été réalisée par un examen séparé des cycles de l'eau (véhicule) et de l'azote (polluant potentiel) puis par la possibilité de leur imbrication, cela afin d'aboutir à la quantification de la pollution résultante en surface et pour la nappe.

1.2. Présentation de la thèse

Cette thèse s'organise autour de différents documents que j'ai élaboré lors d'études confiées au Service Géologique Régional Nord-Pas de Calais du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (S.G.R./N.P.C. du B.R.G.M.).

La première est relative à un bassin versant souterrain de taille restreinte et s'intitule "Champ captant d'Airon-Saint-Vaast - Etude des moyens destinés à réduire la teneur en nitrates des eaux souterraines prélevées. Deuxième partie : étude de la nappe d'eau souterraine". Il s'agit d'une analyse hydrogéologique détaillée de ce site de captage d'eau potable et notamment de son bassin d'alimentation. L'aspect essentiellement agricole de la pollution nitratée y est mis en évidence ainsi que le cas particulier du ruissellement. Le bassin versant fermé permet de dresser un bilan des entrées et sorties d'azote. Cette étude est réalisée pour la Ville de Berck sur Mer (Pas de Calais) qui a reçu l'aide financière et technique de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (A.E.A.P.) et de la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (D.D.A.F.). Le caractère expérimental de cette première phase de recherche a en outre permis de collaborer avec des spécialistes d'autres disciplines: pédologues, agronomes... (document n° 2).

La seconde étude concerne une application des informations déduites de l'analyse précédente et une amplification de l'investigation (en particulier en ce qui concerne les eaux usées) à l'ensemble d'un arrondissement à prédominance agricole. Elle porte pour titre "Arrondissement de Cambrai - Alimentation en eau potable - Constat de l'état actuel de la distribution publique et prospectives d'aménagement". Ce travail a été réalisé pour le Conseil Général du Département du Nord aidé financièrement par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie.

La maîtrise d'oeuvre était confiée à une cellule technique qui, outre les 3 services cités ci-dessus, comprenait des représentants de la:

- Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (D.D.A.F.) initiatrice du projet;

- Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales (D.D.A.S.S.);
- Direction Départementale de l'Équipement (D.D.E.);

Les documents remis sont au nombre de trois:

- "Rapport technique - Dossiers communaux" (document n°3).

Les dossiers, au nombre de 115 (un par commune) abordent parmi de nombreuses rubriques la protection naturelle de la nappe, l'assainissement, la qualité de l'eau prélevée ... Ces sujets sont analysés et synthétisés à différentes échelles (commune, bassins versants, captage). Les dossiers regroupent essentiellement l'aspect qualitatif, la partie quantitative figure principalement en annexe du prochain document;

- "Rapport technique - Synthèse" (document n° 4).

Il présente la méthodologie mise en oeuvre, les résultats et analyses qui en découlent ainsi que les causes et remèdes éventuels à la pollution nitratée des ouvrages d'alimentation en eau potable les plus touchés;

- "Atlas des eaux souterraines" (document n° 5).

Il se compose principalement de 6 planches avec commentaires et schémas en vis à vis. Les éléments successivement examinés permettent d'aboutir à une carte des teneurs en nitrates (planche VI) sur l'ensemble de la zone d'étude.

Cette planche et certaines de celles qui précèdent, par leur côté synthétique et prévisionnel, fournissent aux responsables départementaux et acteurs locaux un outil d'aide à la décision. Ceci après les avoir sensibilisés aux problèmes de qualité de l'eau potable distribuée et plus particulièrement à l'évolution des teneurs en nitrates dans l'arrondissement.

Le présent document (n° 1) tente de faire le point grâce à une revue bibliographique, sur les connaissances actuellement acquises dans le domaine de la pollution nitratée et les remèdes possibles. Il détaille la méthode d'approche de l'émission d'azote en milieu agricole, urbain voire industriel. Après avoir rapidement expliqué les modalités d'application à l'arrondissement de Cambrai, et signalé les différents outils nouveaux introduits dans la démarche (infographie, télédétection...), ce document essaie d'envisager une prospective à moyen et long terme.

2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. Augmentation préoccupante de la teneur en nitrates de l'eau distribuée

Connu depuis 1945, l'effet nocif des nitrates sur la santé des nourissons peut se traduire par la méthémoglobinémie ou maladie bleue. Elle provoque une cyanose par la transformation d'une grande partie de l'hémoglobine en méthémoglobine. Cette dernière ne permet plus de fixer l'oxygène dans le sang pour le transporter des poumons aux tissus. Ce processus provient de la transformation bactérienne in vivo des nitrates en nitrites. Ceux-ci peuvent aussi réagir sur certaines amines ou amides pour former des composés N-nitroso qui seraient un facteur responsable de la formation de cancer de l'estomac. De nombreuses études soupçonnent également les nitrates d'être à l'origine ou de jouer un rôle dans l'hypertension artérielle, certains problèmes de fertilité, de grossesse, du système nerveux, de la thyroïde, de la synthèse des vitamines A et E... (Awad L., 1982 et Scrève A. 1984).

Suite à ces risques réels et potentiels, des normes ont été mises en place. La Concentration Maximale Admissible (C.M.A.) s'élève à:

- 44,3 mg/l de nitrates depuis 1978 pour l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.);
- 50 mg/l de nitrates depuis 1989 pour la France (Décret 89-3 du 03.01.1989) en conformité avec la directive européenne C.E.E. 778 du 15.07.1980.

Les nitrates sont l'une des formes de l'azote, le cycle de ce dernier est sous la dépendance de l'activité des microorganismes du sol et des eaux (Faurie M., 1983). Les différentes étapes, formes et origines sont détaillées par ailleurs (annexe X du document n° 2, chapitre 2.1. du document n° 4 et encart n° 2 du document n° 5), principalement à partir de l'ouvrage de Martin G. (1979).

Les nitrates ingérés par l'homme ne proviennent pas uniquement de l'eau (boisson et cuisson). La dose absorbée au travers de l'alimentation (légumes - 100 mg à 2 g/kg, charcuterie - 50 à 200 mg/kg, salaisons, fruits, pain, produits laitiers) est estimée entre 100 et 300 mg/jour. La dose journalière admissible est fixée par l'O.M.S. à 3,65 mg/kg de poids par jour. L'importance de l'apport hydrique apparaît clairement, compte tenu d'une consommation journalière de l'ordre de 0,7 l pour le nourrisson et de 2 l pour l'adulte (Duchemin J. et al., 1988).

L'augmentation de la teneur en nitrates est tout d'abord apparue problématique pour les eaux superficielles (Chedal M., 1975). Du fait de l'absence de filtration et de l'exposition à la lumière, de faibles teneurs en nitrates (5 à 25 mg/l) déclenchent des détériorations indirectes considérables de la qualité de l'eau et des graves difficultés de traitement. Pour les retenues, l'eutrophisation se produit avec des concentrations dix fois moindres, le stockage des eaux demande donc une qualité exceptionnelle (Lecuyer P., 1988).

Les eaux souterraines, moins vulnérables par la présence de terrains non saturés entre la surface du sol et la nappe, ne furent fortement touchées qu'ultérieurement. Les recommandations du groupe de travail "Activités agricoles et qualité des eaux" permirent la mise en oeuvre de structures spécifiques de lutte contre la pollution nitratée. Son animation et la présidence étaient confiées en novembre 1979 au Professeur Hénin, Directeur de Recherche à l'Institut National de la Recherche Agronomique (I.N.R.A.). L'année 1984 vit la création du Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates et les phosphates provenant des activités agricoles (C.O.R.P.E.N.) suite à une décision interministérielle (Environnement et Agriculture). Cette structure est soutenue par une mission "Eau-Nitrates" rattachée à la Direction de l'Eau et de la Prévention des Pollutions et des Risques (D.E.P.P.R.) du Ministère de l'Environnement. Cet ensemble est à l'origine de brochures, articles dans la presse spécialisée, lettre mensuelle "L'écho des nitrates"... (Billaudot F., 1988).

De nombreux bilans ponctuels et régionaux ont été effectués. Depuis une quinzaine d'années sont mis en évidence des taux de croissance de la teneur en nitrates variant de 1 à 6 mg/l/an (Collin J.-J. et Landreau A., 1984).

Si cette augmentation se poursuit, la situation deviendra délicate. Le cas de Caen est un exemple, cette ville est alimentée par de l'eau souterraine, de sources et de surface, les tendances enregistrées permettent de prévoir que la teneur en nitrates de l'eau distribuée atteindra le seuil de 50 mg/l vers 1995 (Bourgogne P., 1988). Si aucune mesure curative n'est engagé d'ici l'an 2000, 20 % de la population française recevra une eau dont la teneur en nitrates dépasse 50 mg/l (Landreau A. et Roux J.-C., 1984).

Devant ce constat, dans chaque département concerné a été élaboré un programme pour améliorer la qualité des eaux de distribution publique qui présentent des teneurs excessives en nitrates (Lheureux B. et Ballay D., 1982). Ainsi, entre 1981 et 1987 la population alimentée par une eau dont la **teneur moyenne** était supérieure à 100 mg de nitrates/l est passée de 32.000 à 2.000 et celle dont la concentration est comprise entre 50 et 100 mg de nitrates /l, de 1.130.000 à 860.000 (Foulouze R., 1988). Lorsqu'il est tenu compte de la **teneur maximale**,

les chiffres de 1987 sont respectivement de 10.000 et de 1.707.000 (Ministère chargé de la Santé, 1988).

Une prise en compte de l'ensemble des données disponibles a permis d'établir de manière classique une cartographie des teneurs en nitrates des nappes phréatiques de la France; état 1983 (Lallemand-Barres A. et al., 1985) et 1986 (Lallemand-Barres A. et al., 1987).

La représentation ne concerne pas les zones dépourvues de nappe, les montagnes et trois grands secteurs sans données synthétiques (la majeure partie du Massif armoricain, du Massif central et du Bassin aquitain).

Les nappes dans lesquelles sont rencontrées des zones à teneur supérieure à 50 mg/l de nitrates sont principalement:

- les nappes alluviales (vallées de l'Ariège, de la Garonne, du Rhône, du Rhin, etc;
- les nappes de la craie (Nord, Touraine, Centre, Charentes, Yonne);
- les eaux des calcaires jurassiques (Berry, Poitou);
- la nappe des calcaires de Champigny (Brie);
- la nappe des calcaires de Beauce (Beauce);
- des nappes locales en formations de socle (Bretagne).

De lecture aisée, une carte de concentration laisse clairement apparaître la répartition géographique du phénomène. L'accroissement du nombre des données analytiques conduit à accorder à la cartographie automatique une place de choix. Une représentation continue nécessite de traduire les variations par des courbes d'isovaleurs obtenues par interpolation:

- déterministe (uniras) avec une double interpolation linéaire plus une quadratique;
- probabiliste (krigeage).

Ces méthodes permettent des croisements d'informations et facilitent la mise à jour des documents (Seguin J.-J., 1986).

2.2. Transfert complexe dans les terrains non saturés au-dessus de la nappe

De nombreuses études ont été entreprises à diverses échelles (colonne de laboratoire, case lysométrique, site expérimental, bassin versant...). Ce paragraphe concerne les lieux dont les caractéristiques (géologie, climatologie) sont proches de celles rencontrées lors du présent travail.

2.2.1. Le site expérimental de Sainghin-en-Mélantois

Il est localisé dans le département du Nord, à environ 10 km au sud-est de Lille. Les terrains non saturés sont composés de:

- 2,80 m de limons;
- 0,80 m de limons argileux, de craie et de silex;
- 4,40 m à 9,40 m (suivant les fluctuations piézométriques) de craie.

La parcelle expérimentale est située sur un plateau dans un secteur qui correspond à un dôme piézométrique. Cela permet la compréhension des différents mécanismes qui interviennent dans l'acquisition du chimisme d'une eau souterraine alimentée exclusivement par les précipitations. L'équipement du site (figures 1 et 2) autorise l'investigation de la zone non saturée en perturbant le moins possible les phénomènes chimiques et les transferts d'eau (Bernard D. et al., 1977).

La présence d'une couche de limon argileux induit que l'infiltration peut être considérée comme la superposition de deux types d'écoulement (figure 3). L'un directement lié à la pluviométrie et l'autre quasi permanent dû au drainage de la couche limoneuse (Ausseur J.-Y. et al., 1979). De plus, au droit de sables limoneux et d'argiles limoneuses, l'existence de fentes de dessiccation permet une importante circulation d'eau que peuvent relayer les fissures de la craie. Cet aspect rend difficile l'application des lois de l'écoulement dans le milieu poreux (Lallemand-Barres A. et al., 1976). Des vitesses de l'ordre de 1 m/mois sont mesurées par traçage au cours de la phase de recharge et confirme l'existence de circulations préférentielles de l'eau (Bourg A. et al., 1984).

Du point de vue des concentrations chimiques, une distinction est à faire entre les eaux matricielles (eaux de porosité) et les eaux de circulation (eaux mobiles) (Bonnet M., Landreau A. et al., 1979). Ceci explique la croissance des teneurs obtenues après récupération de l'eau par centrifugation, bougies poreuses et lixiviation, ces valeurs peuvent être corrélées avec l'état d'énergie de l'eau prélevée (liaison avec le substrat) (Bourg A. et al., 1984).

2.2.2. Les sites de Champagne

Les profils verticaux de teneurs en nitrates présentent généralement des pics de concentration bien individualisés. Leur descente vers la nappe en relation avec la lame d'eau infiltrée permet d'apprécier la vitesse de transfert dans les terrains non saturés. Ceux-ci sont composés de rendzine (50 cm) puis de craie. La pluviométrie efficace moyenne est de l'ordre de 175 mm.

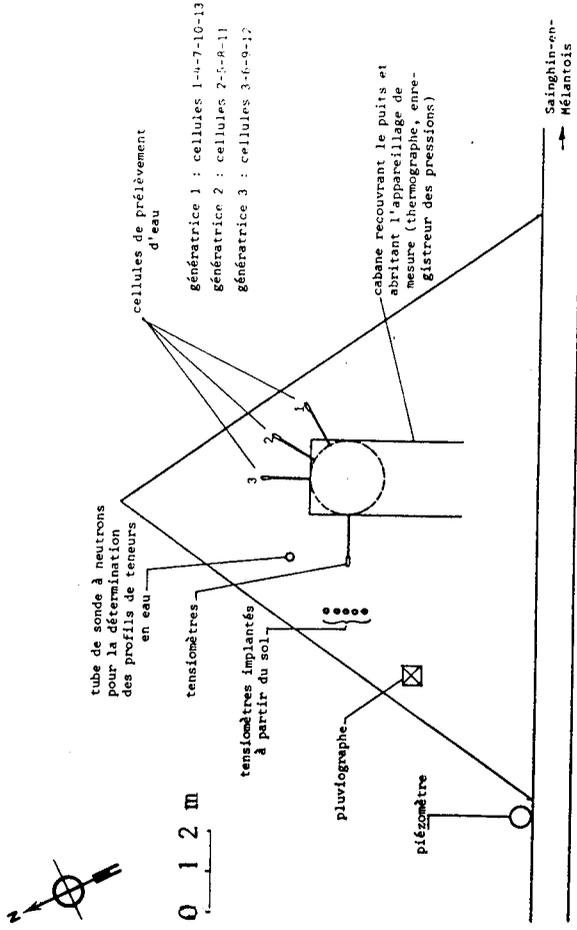


Figure 1 : Schéma d'implantation des équipements sur le site expérimental de Sainghin-en-Mélantois (Bernard D. et al., 1977).

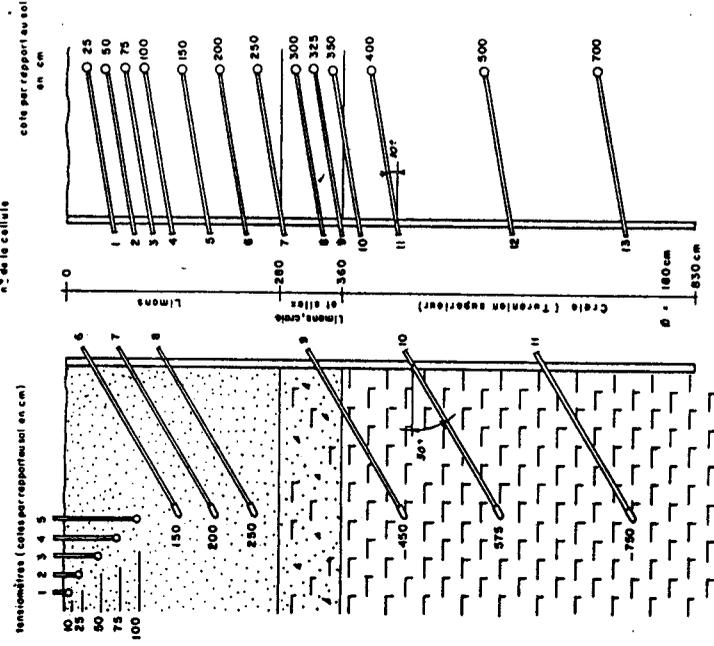


Figure 2 : Schéma d'implantation des cellules poreuses et des tensionmètres à l'intérieur du puits du site expérimental de Sainghin-en-Mélantois (Bernard D. et al., 1977).

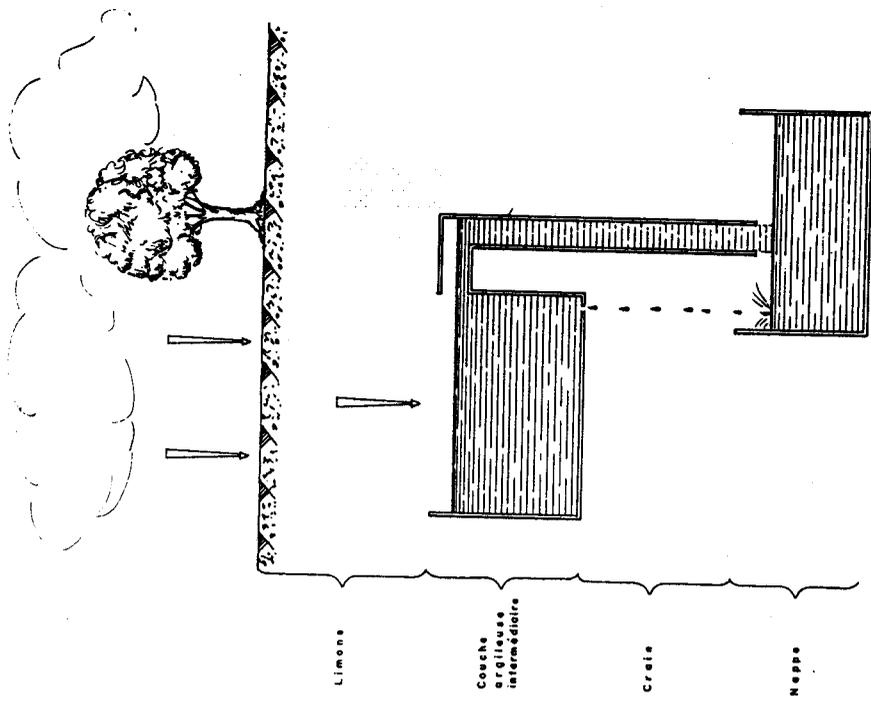


Figure 3 : Schéma du fonctionnement du système de pluie efficace du site expérimental de Sainghin-en-Mélantois. (Ausseur J.-Y. et al., 1979).

a) Environs de Châlons sur Marne (Kerbaul A. et al., 1979)

Les échantillons proviennent de carottages à la tarière. La technique employée pour l'extraction de l'eau est le lavage (leaching) comparable à la méthode par centrifugation.

Une parcelle cultivée ayant été soumise à deux épandages d'effluents de surcrerie présente deux pics (250 et 450 mg/l de nitrates) absents sur la parcelle témoin (15 à 90 mg/l de nitrates).

Compte tenu des dates d'épandage et de la profondeur des pics, la vitesse de transfert verticale est de l'ordre de 50 à 75 cm/an.

b) Connantre (Marne)

Les modalités d'obtention du profil sont analogues à celles de l'exemple précédent. La connaissance de l'historique des cultures et des fertilisations sur la parcelle depuis le déboisement de 1955 autorise l'usage du programme de simulation des transferts de nitrates dans la craie mis au point au Water Research Centre (W.R.C.) d'Angleterre. La vitesse moyenne de transfert déterminée est de 30 cm/an (Brossier G. et al., 1980).

La surveillance de l'évolution du profil à l'issue d'un épandage d'effluents d'industries agro-alimentaires de 80 mm s'ajoutant à l'apport issu de la pluviométrie fournit une vitesse de transfert variant entre 50 et 60 cm/an. La technique d'extraction de l'eau est la bougie poreuse (Landreau A. et al., 1981).

La réalisation d'une douzaine de profils dans la parcelle montre que la distribution verticale des teneurs en nitrates est invariante par translation horizontale. Les échantillons sont prélevés à la tarière ou au carottier, l'eau est extraite par lixiviation. Les vitesses de transfert obtenues s'étagent de 40 à 60 cm/an. Le meilleur calage est réalisé en admettant que 17 % de l'eau circule par la porosité de fissures (Seguin J.-J. et Moreau F., 1986).

2.2.3. *Les sites de Béthencourt-sur-Somme*

Trois carottages ont été réalisés afin d'effectuer des profils verticaux de teneurs en nitrates dans les terrains non saturés. Ceux-ci se composent de:

- 3,5 m de limons et 2 m de craie pour le site en bas de coteau;
- 4,5 m de limons et 8,5 m de craie pour le site de pente;
- 6 m de limons et 19 m de craie pour le site de plateau.

La connaissance des historiques (cultures, fertilisations) permet l'utilisation du programme de simulation cité ci-dessus. Les vitesses de transfert moyennes déterminées sont de 35 et 50 cm/an. Le calage optimum nécessite de prendre en compte la valeur de 8 à 12 % pour la fraction d'eau infiltrée dans la porosité de fissures (Seguin J.-J., 1984). Les concentrations de nitrates en transfert varient de 2 à 100 mg/l.

2.2.4. Conclusion

Il apparaît nettement dans les cas envisagés que la majeure partie de l'eau infiltrée s'écoule par la porosité matricielle (92 à 83 %) avec une vitesse verticale moyenne dans les terrains non saturés variant de 30 à 75 cm/an.

Les concentrations en transit peuvent atteindre 100 mg/l de nitrates.

2.3. Fertilisation et croissance des teneurs en nitrates

Dans de nombreux cas, la pollution d'origine agricole est mise en évidence. Dès 1966, des examens réalisés dans plusieurs régions des Etats-Unis d'Amérique montraient l'importance de la dégradation de la qualité des eaux souterraines liée à l'épandage d'engrais azotés et de résidus de l'élevage sur les cultures (Lallemand-Barres A., 1974). En France, l'accent était mis sur le rôle des engrais, en particulier au niveau des serres (Albinet M., 1972) et de la grande culture où la part minérale de l'azote est prépondérante (70 %) à la différence des secteurs forestiers où la fraction organique représente 84 % (Seux R. et al., 1985). Le problème de l'augmentation des teneurs en nitrates est également sensible en République Fédérale Allemande, Pays-Bas, Suisse (Bosset E., 1981), Royaume-Uni (Young C.-P. et al., 1979). Dans ces quatre pays, l'agriculture intensive est mise en cause mais les enjeux agricoles apparaissent déterminant; une remise en question de certaines pratiques néfastes pour l'environnement ne se fera que lentement (Lavoux T., 1987).

S'il est aisé de connaître la quantité d'azote apportée sous forme d'engrais artificiel, il en est tout autrement pour les rejets provenant d'installations classées agricoles car la traduction en terme de nitrate est fonction de différents facteurs (système d'élevage, durée et mode de stockage, condition d'épandage...) (Poher J., 1988). L'étude des déchets a montré des différences importantes de composition entre phases solide (organo-minérale) et liquide (Dutil P. et Muller J.-C., 1979). Des moyens portatifs d'analyse apparaissent depuis quelques années à l'image du "pot d'azote" mis au point en Suède (Dunn N., 1985). Afin de réduire le lessivage potentiel, il existe même des inhibiteurs de nitrification (Guenault B., 1985). Au droit des champs d'épandage d'effluents agricoles, la surveillance chimique de la migration des nitrates

fournit des maxima pouvant atteindre 500 mg/l de nitrates (extraction par lavage) dans l'eau intersticielle de la zone non saturée (Kerbaul A. et al., 1979).

D'autres facteurs sont à l'origine de la présence de nitrates en quantité importante dans les eaux souterraines. Bien que plus local, le processus de ruissellement (I.G.N., 1983) peut, après la période d'épandage, entraîner vers les zones basses d'importantes concentrations d'azote qui, lorsque les terrains sont perméables rejoignent rapidement la nappe (Douay F. et al., 1985).

Un grand nombre de facteurs rendent délicat le calcul exact de la fumure azotée. Le coefficient de variation de la teneur en nitrates dans le sol est d'environ 30 % , cette valeur est largement plus grande que celle des autres éléments chimiques et physiques du sol (Lindemann Y., 1986). Il est utile de distinguer la forme ammoniacale (NH_4^+) car celle-ci ne risque guère d'être entraînée vers la nappe (Bernhard C., 1985). Le coefficient d'utilisation de l'engrais est fortement affecté par des facteurs limitants (la sécheresse de 1976 par exemple) (Boniface R. et al., 1987). Pour vérifier la bonne alimentation azotée de certaines cultures, la notion de rendement global qui intègre de nombreux effets est moins adaptée que les paramètres "nombre de grains par unité de surface" (pour le maïs en première phase et le blé) et "poids de 1 000 grains" (pour le maïs après floraison) (Lehrmann P., 1984).

L'utilisation de l'abondance isotopique naturelle de l'azote 15 permet de mieux comprendre les phénomènes complexes qui s'opèrent dans le sol. Utilisée depuis 1970 aux Etats-Unis d'Amérique, cette technique permet également de caractériser les sources de nitrates d'un bassin versant agricole puisque les valeurs de ce paramètre sont bien différenciées en fonction de l'origine de l'azote.

Les résultats sur le bassin de Mélarchez (Brie - Seine et Marne) mettent l'accent sur la part importante des engrais artificiels (Mariotti A. et al., 1975). Sur la base de 21 prélèvements sont mis en évidence diverses sources de nitrates à partir de la valeur du delta (paramètre permettant d'analyser l'abondance en azote 15) (Mariotti A. et al., 1976):

- minéralisation de la matière organique (sols de prairies ou mis en culture) (+ 8 à + 9‰);
- engrais artificiels (voisin de + 3 ‰);
- minéralisation de la matière organique (sols forestiers) (+ 4 à + 5 ‰);
- eaux usées domestiques (supérieur à + 10 ‰).

Pour parvenir à une bonne gestion de la fertilisation au regard de la teneur en nitrates des nappes, deux types d'actions ont été engagées en Normandie:

- mise en oeuvre de pratiques culturales susceptibles d'engendrer une amélioration

de la qualité des eaux souterraines, ceci au niveau des bassins versants bien délimités;

- information sur l'état de l'azote dans le sol (Allain G., 1988).

Dans ce dernier cas, la presse agricole spécialisée fournit de nombreux renseignements pour un calcul optimal de la fertilisation artificielle (Vasseur G., 1986) tout en soulignant la difficulté de l'opération (Viaux P., 1983).

Une cartographie du "risque nitrate" a été élaborée, ce terme "risque nitrate" est pris dans le sens de "potentialité d'augmentation significative de la teneur en nitrates des eaux souterraines". La représentation est basée sur la superposition de:

- l'occupation du sol;
- l'intensité de la fertilisation azotée;
- la vulnérabilité des aquifères.

Cette méthodologie a été appliquée sur un secteur de l'Indre et Loire (Landreau A., 1983), puis sur l'ensemble du département (Desprez N. et al., 1983) et enfin à l'échelle nationale (Landreau A. et Morissot A., 1983).

Afin de posséder des outils de gestion prospectifs, des modèles de transfert de nitrates dans un bassin versant ont été mis au point:

- l'un d'entre eux, "Bilan CHimique des Eaux" (BICHE) adopte une démarche identique à celle des modèles globaux de simulation hydrologique (Thiery D. et Seguin J.-J., 1985). La principale difficulté réside dans les données agricoles (épandage, besoins des plantes, résidus culturaux...) qui ne sont toujours que des approximations très grossières. Cependant, ce modèle permet des extrapolations correctes des teneurs en nitrates en un point à l'image de celle effectuée entre 1976 et 1986 sur la source de Provins (Seine et Marne - Brie) après une phase de calage réalisée avec les données de 1948 à 1976. L'analyse de sensibilité du modèle souligne le rôle important du volume d'eau liée, l'influence des périodes sèches et humides... (Seguin J.-J., 1988). Les simulations basées sur un scénario de fertilisation identique à celle de la situation actuelle aboutissent pour des sites de la nappe des calcaires de Champigny et de Beauce à des concentrations plafonnant entre 80 et 115 mg/l de nitrates dans des périodes de temps de 40 à 100 ans (Thiery D. et Seguin J.-J., 1986);
- un autre modèle permet la prise en compte de l'hydrodynamique souterraine et souligne le problème de la représentativité des piézomètres ainsi que la difficulté de posséder des données agricoles et hydrologiques à la hauteur des capacités du modèle (Geng Q.-Z., 1988).

2.4. Rejets urbains et industriels et croissance des teneurs en nitrates

Le premier maillon de l'assainissement consiste en une bonne conception du réseau. Pour les secteurs anciens, des améliorations notables peuvent être obtenues grâce à des actions ou des travaux limités, à condition d'être bien adaptés aux problèmes rencontrés. Cela nécessite au préalable une étude de diagnostic du système réseau - station d'épuration - milieu naturel récepteur (A.E.A.P., 1986).

L'épuration et le rejet représentent les derniers éléments des systèmes d'assainissement, cependant il est logique de moduler les niveaux de traitement à imposer aux différents rejets en fonction du pouvoir d'autoépuration du récepteur, c'est à dire la capacité d'accueil du milieu naturel (Bazin M., 1979).

Vers 1970 est apparu le souci d'éliminer l'azote des eaux usées (Martin G. et Bontoux J., 1981). En 1979, l'intérêt de la dénitrification des eaux usées est davantage envisagé dans l'amélioration de la clarification finale que pour préserver la qualité de l'environnement (Bedin J. et Picard M., 1979). Une station prévue pour dénitrifier n'est pas seulement une installation plus grande que la "normale", mais nécessite une entière modification de ses circuits internes, de la conception du clarificateur, de la répartition des flux, du cloisonnement des bassins, etc (Bedin J., 1976).

Les différentes modalités d'évacuation des eaux usées ou épurées sont les suivantes:

- le rejet dans les eaux superficielles, que celles-ci drainent ou alimentent la nappe;
- l'infiltration par bassin, mais 68 à 91 % du flux d'azote ammoniacal migrent dans l'eau de nappe (Blake G. et Tiso G., 1985). Dans des bassins sur des dunes de sables nues, le pouvoir épurateur pour l'azote est cependant de l'ordre de 40 % (Ringuelet R., 1983);
- l'épandage sur les terres labourables. Cette technique a permis la mise en valeur agricole de terres très peu fertiles grâce à l'irrigation et à l'enrichissement en matière organique. Par contre, cela induit une augmentation notable des teneurs en azote dans les eaux de la nappe phréatique (élévation de 12 à 33 mg/l dans le cas d'un champ d'épandage en République Fédérale Allemande) (Beauvois F. et al., 1984).

L'épuration des eaux usées produit toujours une quantité importante de boues organiques. L'utilisation agricole est la solution économiquement la plus adéquate. L'emploi

liquide apparaît simple, mais il conduit à une complexité importante dans son organisation. La transformation en boues essorées ou en compost demande des moyens techniques (Pitot J., 1983). Dans le département du Nord, un programme informatique a été mis au point afin de faciliter l'interprétation et l'accessibilité des données concernant les boues des stations d'épuration. Ce logiciel permet d'éditer un tableau récapitulatif sur produit brut et sur matière sèche, une fiche agronomique, un tableau récapitulatif pour les éléments-traces métalliques, une analyse statistique et une représentation graphique. Les documents devraient permettre d'éviter les problèmes sur l'environnement à court et à long terme, en particulier pour les métaux lourds (Six P. et al., 1989).

Pour ce qui est de l'épandage souterrain, le devenir des composés azotés n'est pas facile à établir, du fait de phénomènes de nitrification et de dénitrification très actifs. L'excès d'ammonium semble inhiber la dénitrification (Cathelain M. et Demiautte J.-P., 1985).

A terme, le développement de l'assainissement autonome concernera près de 20 % des français. Les schémas départementaux d'élimination des matières de vidange ont été lancés en 1978 afin d'éviter des transferts de pollution réduisant à néant les efforts accomplis par cette filière. Les évacuations recensées sont l'épandage sur les terres agricoles, le dépotage en station, en déposante, en réseau d'assainissement (Chalot F., 1988).

Le rejet des matières azotées industrielles est interdit dans les eaux souterraines. Il existe cependant des sources réelles (décharges), potentielles (bassin de décantation) et accidentelles. Pour l'épandage, des règles strictes sont en vigueur (Gouze J.-R., 1988). Pour l'étude des panaches de pollution des nappes souterraines à partir de décharges..., la prospection électrique s'est révélée être un excellent outil. Les deux techniques employées sont l'investigation verticale par sondage électrique et l'étude horizontale par profil de résistivité (Barres M. et al., 1980).

2.5. Dénitrification de l'eau potable en vue de sa potabilisation

Lorsqu'aucune mesure curative ne peut être proposée ou efficace, que ni une interconnexion de réseau ou un nouvel ouvrage de captage d'eau n'est envisageable, la seule solution, au cas où la pollution est seulement nitratée, consiste en une dénitrification de l'eau prélevée avant distribution.

De telles installations existent aux Etats-Unis d'Amérique depuis plusieurs années. L'une d'elles fonctionne depuis 1974 (Long Island - N.Y.) et ramène le taux de nitrates situé entre 90

et 130 mg/l à 2 mg/l avec un débit nominal de 270 m³/h (Sibony J., 1979). Ce paragraphe présente les principaux procédés et ouvrages expérimentés ou mis en service en France.

De nombreuses techniques permettent d'abaisser le taux de nitrates. Le choix de celle à retenir doit intégrer la présence ou non d'un exutoire pour les rejets générés par le traitement (De Larminat G., 1977).

2.5.1. Procédés physico-chimiques

Quatre techniques existent:

- la permutation d'ions;
- la déminéralisation partielle;
- l'osmose inverse;
- l'électrodialyse.

Les deux premières (les plus pratiquées) mettent en oeuvre des procédés d'échanges d'ions et les deux dernières des procédés membranaires, mais ceux-ci modifient la minéralisation totale de l'eau et sont réservés au traitement des cas particuliers.

La permutation d'ions permet l'élimination des nitrates sur résines. Les nitrates et sulfates sont fixés, en contre partie, la résine libère des chlorures et des hydrogencarbonates qu'elle a intégrés préalablement lors d'une régénération. Il convient donc de vérifier la teneur en chlorures et l'équilibre calco-carbonique. Contrairement à ce qui peut se produire dans une filière biologique, les nitrates ne sont pas éliminés sous forme d'azote gazeux mais temporairement adsorbés par la résine. Les nitrates éliminés de l'eau traitée se retrouvent intégralement dans le faible volume des rejets, mêlés à l'excès de sel de régénération. L'exutoire peut être:

- le milieu marin;
- un récepteur naturel d'un débit suffisant;
- un réseau d'égout.

Les trois exemples présentés ci-dessous concernent ce procédé de permutation d'ions sur résine:

- le brevet de la Société d'Aménagement Urbain et Rural (S.A.U.R.) "Nitracycle" est particulièrement bien adapté aux installations rurales de petites et moyenne tailles du fait d'une exploitation simple (figure 4). Il utilise une résine Rohm et Haas Imac HP 441 qui est anionique et fortement basique. Sept unités sont en service (Plounevey-Lochrist et Plouenant dans le Finistère, Reignac-sur-Indre dans l'Indre et Loire, Crépy-en-Valois dans

Figure 4 :
Schéma de principe du
procédé NITRACYCLE
(Deguin A., 1985).

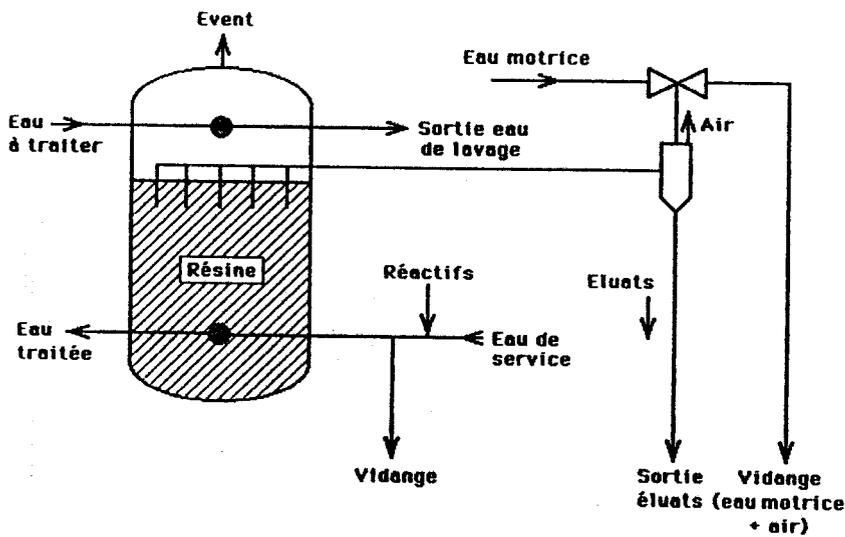
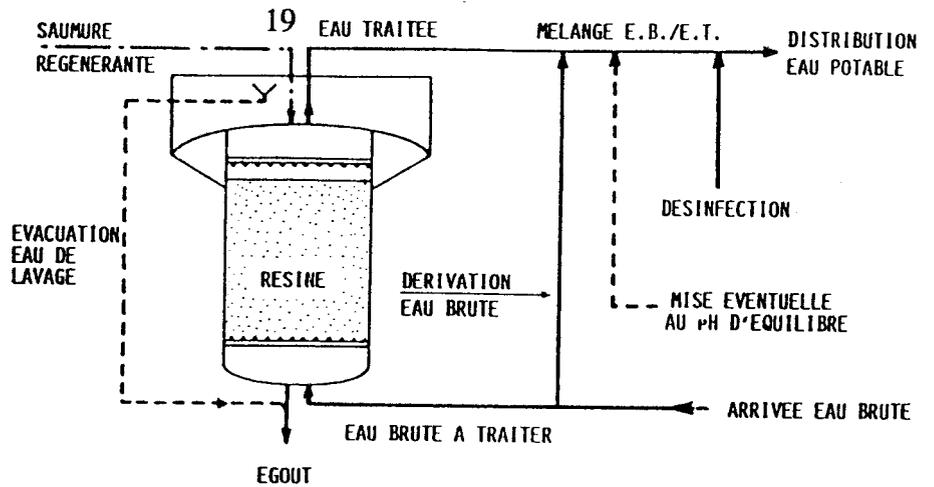
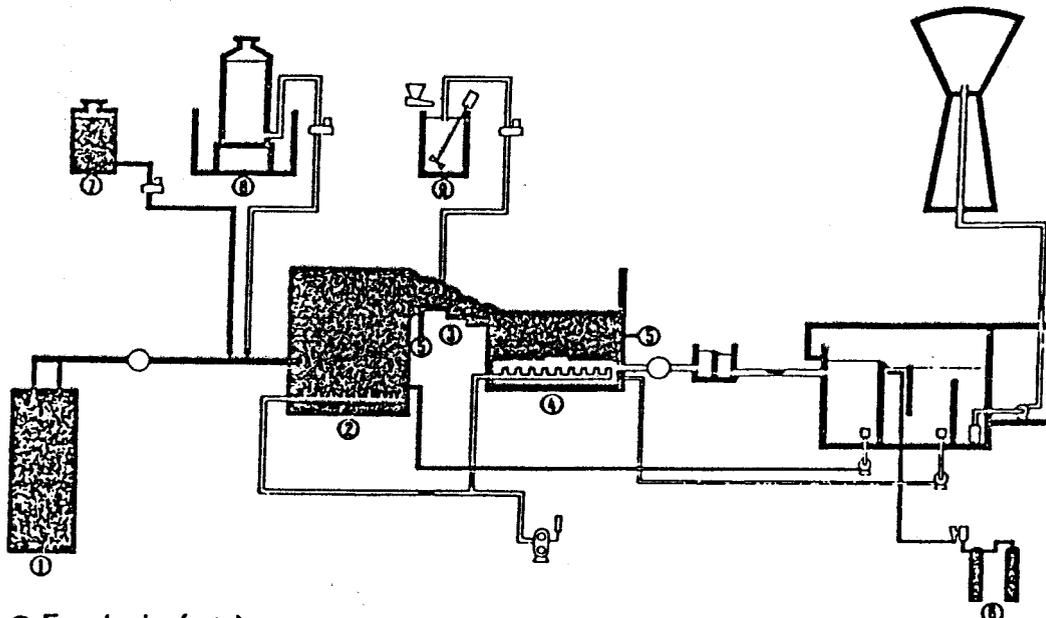


Figure 5 :
Schéma de principe du procédé
AZURION employé à l'usine de
Plouenant
(Richard Y. et Burriat J., 1988).



- ① Eau brute (NO_3)
- ② Réacteur biologique Nitrazur
- ③ Aération
- ④ Filtre Médiazur à charbon actif
- ⑤ Sorties d'eau de lavage

- ① Chlore
- ② Réactif phosphoré (PO_4)
- ③ Réactif carboné
- ④ Coagulant (FeCl_3)

Figure 6 :
Schéma de la ligne de
traitement utilisant
le réacteur NITRAZUR
(Richard Y. et
Partos J., 1986).

l'Oise, La Jarrie en Charente maritime...).

Celle de Crépy-en-Valois amène une teneur en nitrates située entre 125 et 160 mg/l à 5 mg/l pour un débit de 20 m³/h (Deguin A., 1985 - Deguin A., 1988);

- l'entreprise Degrémont a développé le procédé "Azurion" à partir de la résine Dowex SBR.P.

Deux usines sont réalisées (Plouenant dans le Finistère et Ormes-sur-Voulzie en Seine et Marne).

En Bretagne (figure 5), la concentration maximale en nitrates de 80 mg/l est réduite à 2 mg/l pour un débit de 420 m³/h . Les éluats sont placés en lagune au cours de la saison sèche ; ils sont ensuite pompés en continu durant la période pluvieuse pour dilution dans la rivière qui se jette dans la mer à proximité. Pour l'usine de la région parisienne, à chaque régénération les éluats sont stockés puis envoyés à débit constant vers le réseau d'égouts urbains (Richard Y. et Burriat J., 1988);

- la firme Omnium de Traitement et de Valorisation (O.T.V.) a mis au point le procédé "Ecodenit" à partir d'une résine anionique base forte Dowex SBRP.

Deux installations sont en service (Craon en Mayenne et Binic dans les Côtes du Nord). Cette dernière permet d'abaisser la teneur en nitrates de 70 à moins de 25 mg/l avec un débit de 160 m³/h. La solution adoptée pour le devenir des rejets de régénération est le transfert vers la station d'épuration. Les nitrates (148 kg/j - 5,5 g/l) y sont réduits en azote gazeux. Les sels non éliminés par la station d'épuration, chlorures (155 kg/j - 5,8 g/l), sodium (247 kg/j - 9,25 g/l) et sulfates (125 kg/j) - 4,7 g/l) sont rejetés dans le milieu marin. Leur impact est nul du fait de la salinité moyenne de l'eau de mer (35 g/l) (De Larminat G., 1987).

2.5.2. Procédés biologiques

Les techniques biologiques sont les seules susceptibles de fonctionner sans problèmes d'éluats (Richard Y. et Leprince A., 1980). Il en existe deux:

- hétérotrophe (substrat organique);
- autotrophe ou chemolithotrophe (substrat minéral).

Les quatre procédés présentés ci-dessous sont hétérotrophes:

- l'entreprise Degrémont a développé le réacteur "Nitrazur" (figure 6) utilisant

comme substrat carboné soit l'acide acétique (Chateau-Landon en Seine et Marne), soit l'éthanol (Champfleur dans la Sarthe).

A partir d'une eau brute de concentration variant entre 72 et 87 mg/l de nitrates, et pour des débits de 30 à 70 m³/h, la teneur en nitrates à la sortie des installations n'est plus que de 20 à 30 mg/l. La production de boues varie en fonction du substrat puisque 1 g de boue permet l'élimination de 5,1 à 5,9 g de nitrates pour l'éthanol contre 9,5 g pour l'acide acétique (Richard Y. et Partos J., 1986) ;

- la firme O.T.V. a mis en oeuvre le procédé "Biodenit" utilisant une argile spécialement étudiée pour favoriser l'accrochage des bactéries dénitrifiantes. Deux unités sont en service, l'une à Eragny (Val d'Oise), et l'autre à Dennemont (figure 7) (Yvelines) (Ravarini P. et al., 1988). Cette dernière permet la diminution:
 - . des nitrates: de 40-65 mg/l à 15-17 mg/l;
 - . des nitrites: de 0,1 mg/l à 0 mg/l;
 - . de l'ammoniaque: de 2-3,5 mg/l à 0,01-0,02 mg/l;
 pour un débit de 400 m³/h. Le poids journalier de Matières En Suspension (M.E.S.) produites est de 48 kg/j soit une concentration de 50 mg/l (Coutelle J. et al., 1988);

- la SOciété Générale Eau Assainissement (SO.G.E.A.) utilise également l'éthanol comme substrat, son procédé permet une régénération continue par élimination de la biomasse en excès (figure 8). Cette technique permet de traiter de très fortes charges en nitrates (de 100 à 300 mg/l). A titre d'essais, le rendement est de 100 % pour une eau dont la teneur s'élève à 100 mg/l avec un débit de 5 à 20 m³/h (Hanus F. et Bernard C., 1988);

- le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) étudie un procédé rustique s'adressant aux petites structures, par exemples les 400 unités françaises qui comptent moins de 1 000 habitants et dont la teneur moyenne de l'eau distribuée dépasse 50 mg/l. Cela représente 68 % de l'ensemble des cas du pays. Dans un premier temps, le mélange maërl-paille a été sélectionné car il permet une bonne dénitrification (83 %) et possède une durée de vie importante (Landreau A. et al., 1984). D'autres expériences de laboratoire montrent l'intérêt de la cellulose du fait d'une faible consommation

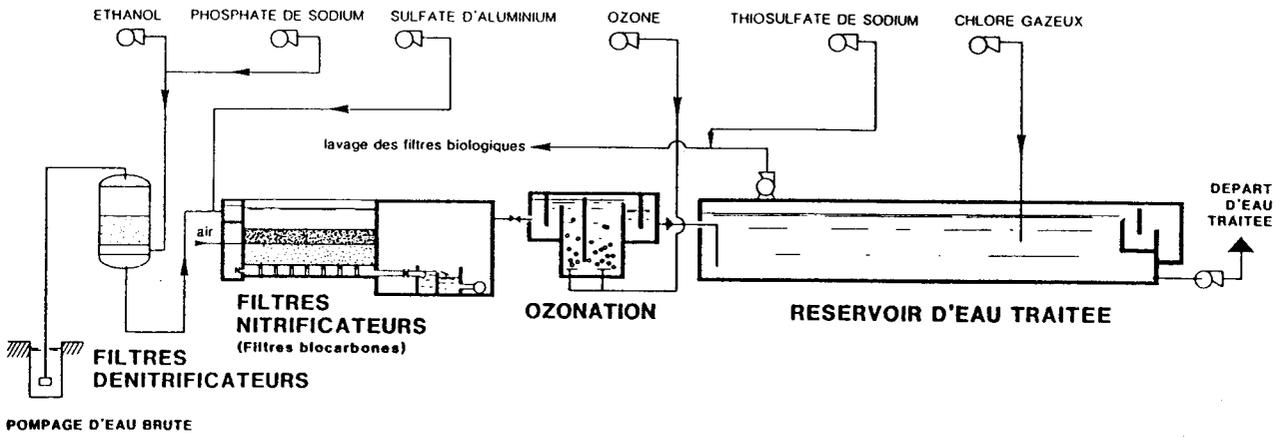


Figure 7 : Schéma de la filière de traitement de l'usine de Dennemont utilisant le procédé BIODENIT (Ravarini P. et al., 1988).

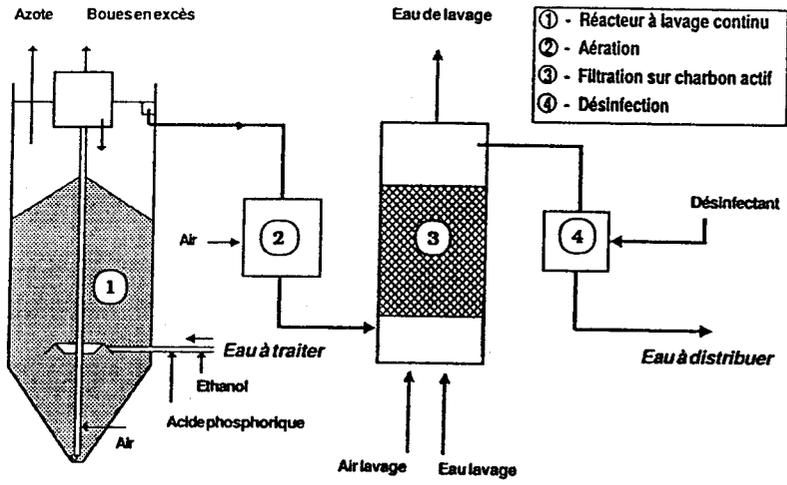


Figure 8 : Schéma de principe de la ligne de traitement de la S.O.G.E.A. (Hanus F., 1988).

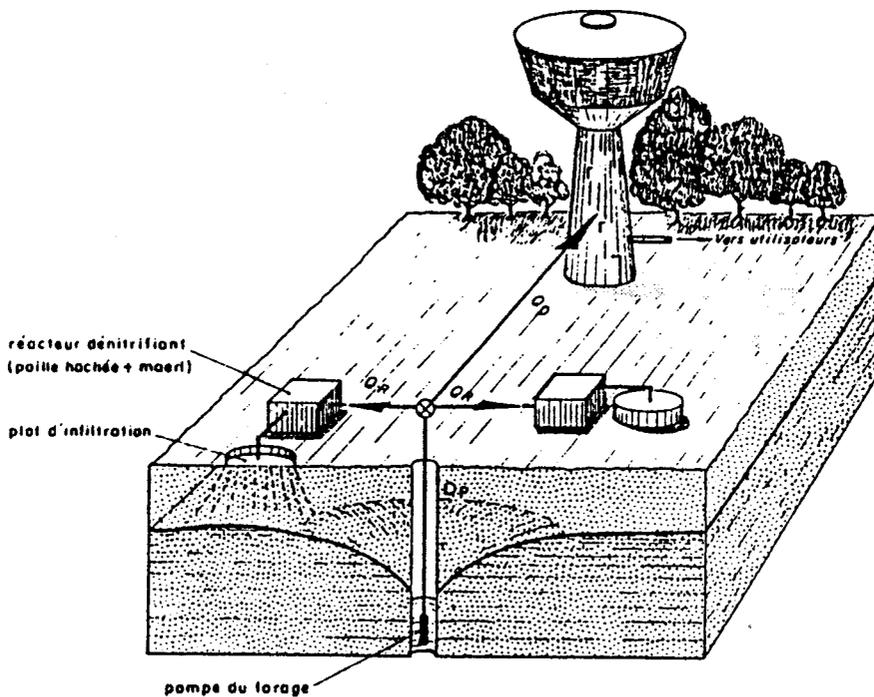


Figure 9 : Principe du procédé de dénitrification expérimenté par le B.R.G.M. (Landreau A. et al., 1986).

du support et une stabilisation du taux d'abattement en nitrates à des valeurs élevées (100%) (Boussaïd F. et al., 1988). Le procédé en est actuellement au stade des essais (figure 9).

2.5.3. Dénitrification naturelle

Le phénomène de dénitrification dans les eaux souterraines est étudié depuis plusieurs années (Mariotti A., 1986).

De nombreuses observations, comme dans le Nord de la France, sur l'évolution géographique des teneurs en nitrates conduisant à envisager l'existence d'un processus naturel de dénitrification au passage nappe libre - nappe captive (Caulier P. et Préaux C., 1983). En Champagne crayeuse, une chute significative des concentrations se produit lorsque l'eau provient des alluvions ou de la craie sous jacente dans les conditions suivantes:

- alluvions épaisses (4 à 6 m), argileuses en tête;
- profondeur de nappe très faible (1 m);
- sol peu évolué (forte teneur en matière carbonée).

Les effets biologiques et chimiques semblent prendre une part fondamentale dans cette diminution des teneurs en nitrates (Bouton D. et Froment P., 1985).

L'abondance isotopique naturelle en azote 15 est un paramètre chimique traceur d'évolution de la dénitrification. Cette dernière s'accompagne d'un très fort fractionnement isotopique. Les nitrates résiduels (non dénitrifiés) s'enrichissent en isotope lourd (^{15}N). A l'inverse, une diminution de la teneur en nitrates par une simple dilution n'entraîne aucune modification notable de la composition isotopique du mélange (Mariotti A. et Landreau A., 1986).

L'application de la technique isotopique a permis de mettre en évidence des phénomènes de dénitrification dans deux champs captant de l'agglomération lilloise (Emmerin et La Carnoye). En plus de l'enrichissement en ^{15}N , les analyses lithologiques, minéralogiques, chimiques et bactériologiques (de l'eau et/ou de la matrice) permettent de déterminer l'intervention de deux mécanismes (Simon B., 1986):

- le premier processus est envisagé suite à la présence:
 - . de pyrite;
 - . de bactéries à métabolisme énergétique chéolithotrophe du genre *Thiobacillus denitrificans* qui oxydent les substances minérales (le soufre par exemple);
 - . de sulfates.

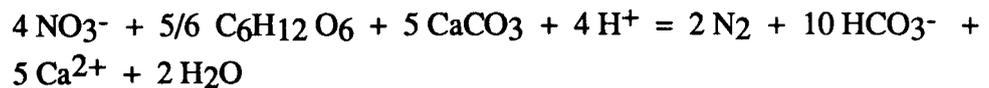
La réaction suivante est proposée:



- le second mécanisme est déduit de l'existence:

- . de matière organique;
- . d'une microflore hétérotrophe.

La dénitrification est schématisée par:



Cette dénitrification est marquée par une augmentation des bicarbonates (cité dans Landreau A. et Seguin J.-J., 1987).

Sur ce site d'Emmerin, le gradient de concentration correspond à un abaissement d'environ 0,1 mg/l de nitrates par mètre (Landreau A. et al., 1988).

La méthode isotopique a également démontré l'existence d'une dénitrification dans un forage du Finistère (Simon B., 1986). Des expériences de laboratoire confirment la possibilité d'une dénitrification sur pyrite avec les microorganismes (Thiobacillus dénitrificans et Ferrobacillus ferroxydans) comme catalyseur (Haïder N. et al., 1988 a). Une approche par modélisation permet de calculer les charges pratiques et les hauteurs de matériaux pour un rendement d'épuration désiré (Haïder N. et al., 1988 b).

Les travaux de terrain corroborent ces observations et permettent de parler de "réacteur naturel". Sa durée de vie dépend de la quantité de nitrates à faire disparaître et de celle de pyrite présente (Talbo M., 1987).

L'implantation de futurs captages dans de telles conditions est intéressante. La biogéochimie devient un outil très utile dans la recherche d'une eau de bonne qualité. Cet aspect ne concerne que le problème des concentrations en nitrates et ne peut être suffisant dans le cas où l'eau contient d'autres polluants.

3. APPROCHE DE L'EMISSION D'AZOTE EN MILIEU AGRICOLE

3.1. Introduction

Le but de ce chapitre est de traiter de la pollution des eaux souterraines par l'azote d'origine agricole. Ce thème est examiné sur la base d'un exemple choisi suite à l'aspect expérimental que revêt le bassin versant du champ captant d'Airon-Saint-Vaast (Pas de Calais) (document n° 2) (Préaux C., 1985).

L'aire d'alimentation est caractérisée par:

- une superficie restreinte de l'ordre d'une vingtaine de kilomètres carrés;
- une absence d'écoulement superficiel permanent qui souligne l'importance de l'infiltration due à une sol très sableux.

3.2. Forte augmentation de la teneur en nitrates de l'eau captée

Les résultats des analyses chimiques sur les prélèvements semestriels réalisés au champ captant d'Airon-Saint-Vaast dans le cadre de la surveillance départementale effectuée par la Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales (D.D.A.S.S.), permettent de constater un rapide accroissement des teneurs en nitrates. Celles-ci s'élèvent de 33 à 49 mg/l entre 1979 et 1981 (figure 10).

Naturellement, le cycle de l'azote est toujours l'équilibre entre les formes gazeuses, minérales (ammoniacque, nitrite, nitrate) et organiques (végétale, animale). Seule une action extérieure à pu le rompre, celle-ci ne peut donc provenir que des activités humaines. Il convient donc de rechercher les causes de l'importance des concentrations en nitrates rencontrées dans le bassin d'alimentation du champ captant d'Airon-Saint-Vaast.

L'absence de formation imperméable entre la surface du sol et le toit de la nappe explique la vulnérabilité des eaux souterraines au regard des infiltrations.

3.3. Plusieurs sources d'azote possibles

A partir du constat effectué ci-dessus, il convient d'énumérer les sources potentielles d'azote dans les eaux. Elles représentent d'hypothétiques causes de la pollution nitratée et seront discutées et quantifiées dans le paragraphe 3.4.

Figure 10 : COURBES DE L'EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES SUR LES FORAGES

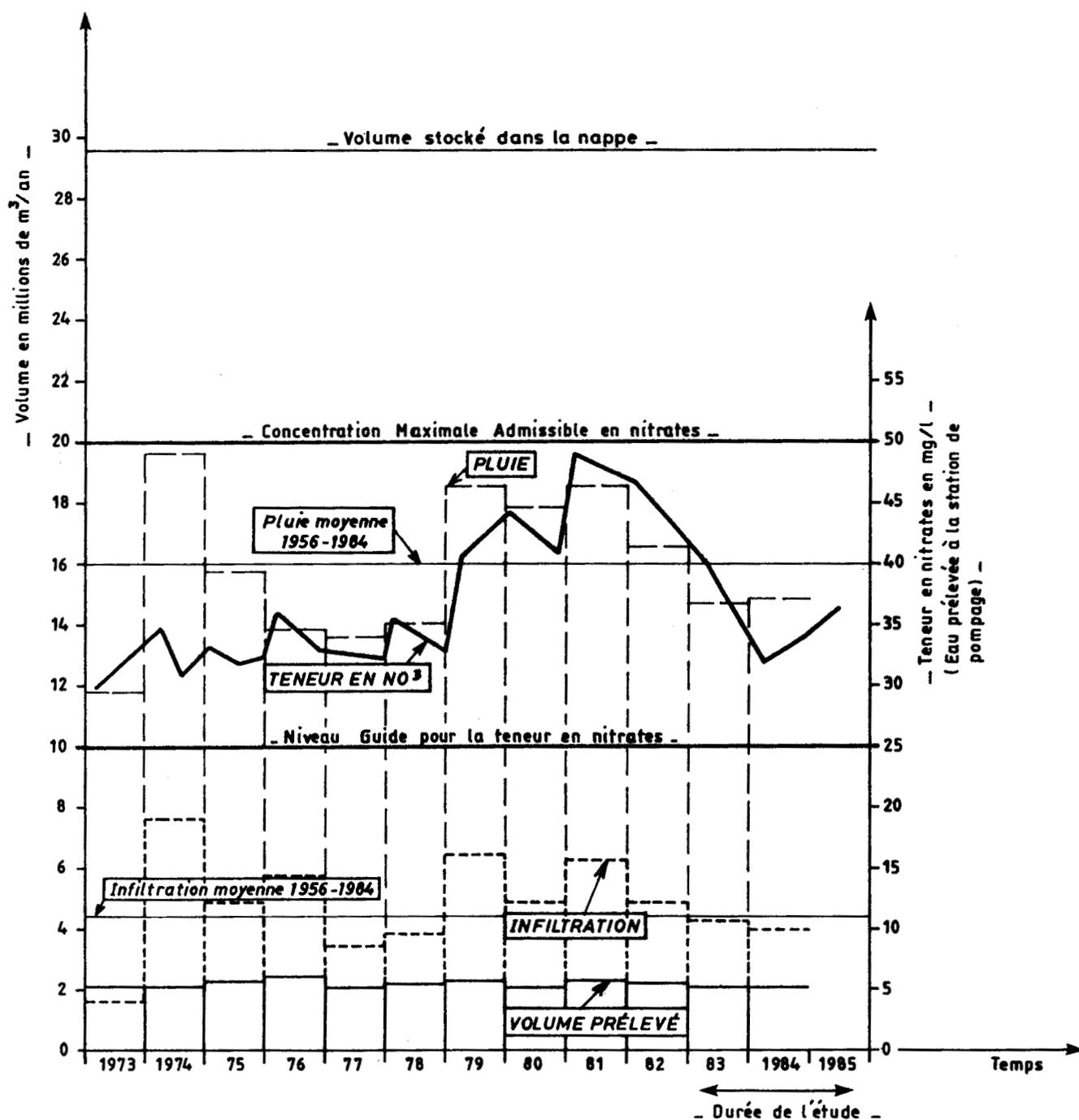
DU CHAMP CAPTANT D'AIRON-SAINTE-VAAST:

- RELATION AVEC L'INFILTRATION;

- IMPORTANCE RELATIVE DES DIFFERENTES MASSES D'EAU

(PLUVIOMETRIE - INFILTRATION ET PRELEVEMENTS),

1973 - AVRIL 1985.



3.3.1. Eau de pluie

Les précipitations contiennent de l'azote dont l'origine est triple:

- naturelle, suite à la fixation chimique de l'azote gazeux atmosphérique. La réaction s'effectue par l'action de l'énergie électrique libérée lors des orages;
- agricole du fait de la dissolution de l'ammoniac volatilisé au-dessus des terres;
- urbaines et industrielles avec les retombées d'oxydes d'azote contenus dans les fumées rejetées (chauffage, pot d'échappement...). Dans ce dernier cas, il convient de signaler le lessivage des chaussées, en particulier les pointes de concentration rencontrées au début de l'épisode pluvieux.

3.3.2. Rejets d'eaux usées domestiques et d'eaux résiduaires industrielles

Les eaux usées humaines ont une composition globale de 15 g de N/hab./jour (Inter-agences, 1980).

De nombreuses activités industrielles (bois, papier, engrais, produits chimiques, textile, agro-alimentaire) émettent des eaux chargées en azote.

3.3.3. Lessivage des terres agricoles

De par la présence d'un tapis racinaire dense, permanent et profond, les pertes d'azote au droit des sols forestiers représentent, sauf en cas de déforestation, l'état "0" par excellence.

En comparant les apports d'azote artificiel (engrais) et les exportations par les cultures, les statistiques départementales révèlent une surfertilisation. L'importance de la fertilisation artificielle entraîne la non utilisation, par la culture, de l'azote contenu dans le sol (minéralisation des résidus de culture, de la biomasse, de la matière organique stable). L'azote potentiellement en transit vers la nappe (la conséquence) comprend l'ensemble de ces sources. Dans ce travail, l'accent sera placé sur la cause, c'est à dire la fertilisation artificielle à l'origine de cette émission plus complexe. De plus, la valeur fertilisante des résidus de l'élevage et domestiques, ne participe pas, en moyenne, au besoin des cultures. Il en résulte que les apports en azote correspondants sont comptabilisés directement dans les quantités lessivables.

Les épandages sur les pâtures font exception à cette règle car un tapis racinaire permanent et dense utilise tout l'azote disponible. Par contre, le retournement des prairies

entraîne une minéralisation importante de l'azote contenu dans le sol ; il en est de même pour la mise en jachère et l'urbanisation des terres labourables.

Le cas de potagers faisant l'objet d'une surfertilisation (déversement de tinettes...) est également à prendre en compte.

Les tableaux II et III présentent les flux spécifiques utilisés pour la quantification des émissions d'azote à la surface du sol, les chiffres utilisés dans cette étude correspondent à l'estimation basse des fourchettes (BUR.GE.AP. et B.R.G.M., 1983-1984).

Ces valeurs sont issues de mécanismes et différenciations complexes détaillées en annexe XI du document n° 2. Dans ce cadre, le sol peut être comparé à une "boite noire" (paragraphe 2.2.1. et 2.2.2. du document n° 4).

OCCUPATION DU SOL		FLUX SPECIFIQUE (kg de N/ha/an)
Zone boisée, broussailles, friche		0 à 5
Prairies permanentes (S.T.H.)		0 à 5
Grande culture	Céréales	10 à 30
	Plantes sarclées	
	Cultures fourragères	
	Cultures industrielles	
Cultures à perte d'azote plus importante	Légumes frais en plein champ	50 à 100
	Légumes secs	
	Vergers	
	Cultures ornementales	
	Légumes frais en maraichage	
	Jachère	
Potager		
Mutations foncières	Retournement de pâtures / Urbanisation des terres labourables / Défrichement	80* à 200*
Serres		100 à plus

Tableau II : Flux spécifiques d'azote émis en fonction de l'occupation agricole du sol.

* Amortissement au rythme de 20 % l'an.

ANIMAL	FLUX SPECIFIQUE (kg de N/individu/an)
Bovins, équidés	17,5
Porcins	3,0
Ovins	2,2
Volailles, lapins	0,18
HOMME	3,65

Tableau III :

Flux spécifiques d'azote émis en fonction du type de résidus d'élevage et domestiques épandus.

3.3.4. Infiltration localisée de quantités d'eau importantes suite au ruissellement

a) Cause

Dans le cadre de la zone étudiée, le point de départ du processus de ruissellement se situe au niveau des plateaux où se trouvent des limons éoliens ayant évolué en sols lessivés. L'infiltration de l'eau météorique est empêchée par trois types d'obstacles:

- les argiles, initialement réparties parmi les éléments sableux, limoneux et calcaires, ont migré en profondeur (70 à 110 cm) pour former un horizon homogène et donc plus imperméable;
- en surface, subsiste donc un véritable squelette minéral limoneux finement sableux. Ce terrain, peu stable, est sujet à la battance (formation d'une croûte superficielle sous l'effet de "splash" des gouttes de pluie);
- cet horizon supérieur se compacte facilement du fait des contraintes des pratiques culturales (passage répété des engins...), il s'ensuit la formation d'une semelle de labour entre la croûte de battance et le niveau plus argileux.

b) Processus

Lors d'une pluie importante, une lame d'eau turbide se forme en surface des plateaux. L'écoulement se fait suivant une pente alors faible. Les éléments azotés disponibles, et en général solubles, sont entraînés.

Lorsque l'eau atteint le versant, sa vitesse et donc sa capacité de transport s'accroissent. Le fluide creuse alors une rigole linéaire qui entaille souvent le sol peu profond du sommet du versant jusqu'au substrat crayeux.

En aval, dans la partie de pente correspondant aux limons de lavage très épais, la rigole devient ravine. Le ravinement est la manifestation la plus spectaculaire de l'érosion.

En fond du vallon, la vitesse diminue et les éléments transportés se sédimentent pour former la zone d'atterrissement. A ce niveau, le sol présente une granulométrie grossière, la perméabilité qui en découle est supérieure à celle des plateaux et versants. Les importantes quantités d'eau amenées par le ruissellement s'infiltreront rapidement. Les éléments solubles transportés, en particulier les fertilisants azotés, sont également entraînés dans le sous-sol.

Le processus de ruissellement induit un transfert de l'infiltration. En effet, à la place d'une percolation lente et réduite concernant de vastes surfaces, se produit une infiltration massive et rapide sur un secteur très localisé entraînant un lessivage brutal du sol et des terrains non saturés.

Les quatre sources principales d'azote énumérées, (l'eau de pluie, les eaux usées domestiques et les eaux résiduelles industrielles, le lessivage des terres agricoles et l'infiltration suite au ruissellement), il convient de quantifier leur impact respectif au niveau du bassin versant considéré.

3.4. Quantification des différentes sources d'azote

3.4.1. Azote apporté par l'eau de pluie

Parmi les trois origines envisagées en 3.3.1., le constat suivant est effectué:

- les rejets atmosphériques industriels sont inexistantes sur le secteur d'étude;
- les rejets atmosphériques urbains sont extrêmement réduits du fait de la faible population (de l'ordre de 900 habitants). La quantité d'azote provenant des gaz d'échappement des véhicules et du lessivage des chaussées est limitée suite au peu de densité de la circulation (4 km de route nationale et 19 km de route départementale soit moins de 1 % de la superficie du bassin d'alimentation);
- l'azote contenu dans l'eau de pluie provient donc essentiellement de l'action des orages et de la volatilisation au-dessus des terres agricoles.

Compte tenu des vents dominants de secteur SW provenant de la Manche, les pluies ne sont pas chargées d'azote d'origine plus lointaine.

Les données utilisées sont issues du site le plus proche présentant une situation analogue (Fruges, à 34 km). La teneur moyenne en azote mesurée sur 2 ans (1979 - 1981) est de 1,34 mg/l (67 % d'azote ammoniacal, 25 % de nitrates et 8 % de nitrites) (Beckelynck J. et al., 1982).

La pluviométrie efficace annuelle moyenne calculée pour le secteur d'étude est de 202 mm/an. Pour une superficie de 21 km², le volume d'eau de pluie infiltrée s'élève à 4,2 . 10⁶ m³/an. Connaissant la concentration moyenne, le flux annuel d'azote d'origine pluviale est donc de 5,7 t.

3.4.2. Azote issu des rejets d'eaux usées domestiques et d'eaux résiduaires industrielles

L'exportation des effluents hors du bassin d'alimentation est inexistante du fait de l'absence d'écoulement superficiel et d'Ouvrage de Transport des Eaux Usées (O.T.E.U.). De plus, l'abattement en azote est réduit par le manque de processus d'épuration. C'est donc la quasi totalité de l'azote produit et rejeté qui gagne la nappe:

- pour les eaux usées domestiques est retenue l'hypothèse maximaliste et indifférenciée de 15 g de N/hab./jour, (en zone rurale, cette valeur peut inclure le lessivage des chaussées). Compte tenu de la population de l'ordre de 900 habitants, le tonnage annuel d'azote s'élève à 4,8;
- pour les eaux résiduaires industrielles, la seule activité du secteur concerne la construction métallique qui n'est pas émettrice d'azote supplémentaire par rapport à celui contenu dans l'eau utilisée.

3.4.3. Azote provenant du lessivage des terres agricoles

A partir des flux spécifiques à prendre en compte (détaillée en 3.3.3.), la quantité d'azote émise annuellement par le lessivage des terres s'élève à 29,2 t. La répartition sommaire est la suivante:

- 19,5 t induites par la fertilisation artificielle et déduites de l'occupation du sol (type de culture, superficie);

- 8,6 t produites par l'épandage des résidus de l'élevage (type d'animaux, système d'élevage, nombre de bêtes);
- 1,1 t dues à la surfertilisation au droit des jardins.

3.4.4. Azote infiltré suite au ruissellement

L'impact du ruissellement est difficile à quantifier du fait de l'inexistence de moyens de mesure spécifiques. Les marques spectaculaires sont visibles sur les terres agricoles (une vingtaine de traces principales de ruissellement, une dizaine de zones d'atterrissement) et sur les voies de communication (ensablement). Les effets sur la teneur en nitrates des eaux souterraines sont mis en évidence indirectement par les prélèvements effectués dans les secteurs d'infiltration. Dans l'un d'entr'eux sont déterminées des concentrations situées entre 60 et 70 mg/l de nitrates. Le paragraphe 4.4.3.2. (document n° 2) présente une tentative de quantification sur cette zone.

Une pluie au droit de terres agricoles non sujettes au ruissellement n'occasionne qu'une infiltration de quelques centimètres. Une partie de l'azote entraîné les 2 à 3 années précédentes reste dans la zone de préhension des racines et peut ainsi être encore utilisé. Au contraire, les fortes quantités d'eau qui s'infiltrent ponctuellement suite au ruissellement pénètrent profondément et gagnent rapidement des niveaux hors d'atteinte des plantes.

Il ne s'agit donc pas que d'un simple transfert d'infiltration et de pollution des points hauts vers les zones basses. Dans le cas particulier du bassin versant, l'impact est encore multiplié car la percolation ne s'opère plus au droit des plateaux et versants où la nappe est profonde et serait alimentée par une eau peu chargée en nitrates car infiltrée il y a longtemps (faibles épandages de fertilisants). A l'inverse, des infiltrations importantes s'opèrent lorsque l'épaisseur des terrains non saturés est la plus fine. De plus, l'eau qui parvient à la nappe est plus nitratée puisque en transit depuis moins de temps (surfertilisation).

3.5. Cause principale : les pratiques agricoles récentes

Le tableau IV présente un bilan des principaux apports en fonction de l'origine de l'émission d'azote.

ORIGINE DE L'AZOTE	FLUX	
	(t de N/an)	(%)
Eau de pluie	5,7	14
Eaux usées	4,8	12
Fertilisants (jardins)	1,1	3
Fertilisants artificiels (champs)	19,5	49
Résidus de l'élevage (champs)	8,6	22
Ruissellement	Variable selon la pluviométrie	

Tableau IV :

Bilan des émissions annuelles d'azote en fonction de l'origine.

Bassin versant du champ captant d'Airon-Saint-Vaast.

Le document n° 2 (4.4.) récapitule les émissions d'azote à partir de l'occupation du sol. Les terres labourables peuvent, en effet, cumuler les apports provenant de l'eau de pluie, des fertilisants artificiels, de résidus d'élevages et domestiques.

La part de l'agriculture apparaît à hauteur d'environ 70 % du total sans tenir compte du phénomène de ruissellement.

La course vers la rentabilité financière entraîne surfertilisation, appauvrissement en matière organique des sols, élimination des obstacles (haies, talus...) au ruissellement...

Les remèdes généraux concernant le lessivage des terres agricoles et le ruissellement seront développés dans le chapitre 6 du présent document.

3.6. Traitement informatique des données

Un programme de calcul a été élaboré dans le cadre de ce travail afin de prendre en compte, à l'aide de ratios issus de la bibliographie, un maximum de facteurs à l'origine des émissions d'azote.

Il s'intitule E.N.G.R.A.I.S. "Evaluation des Nitrates Générés en Relation avec l'Agriculture et Infiltration dans le Sous-sol".

Il permet une quantification, au droit d'une aire géographique donnée (la commune par exemple):

- du flux et du flux spécifique d'azote produit par:
 - . l'occupation du sol;
 - . l'épandage des résidus de l'élevage et domestiques;
 - . la pluie;
 - . l'ensemble des trois éléments précédents;
- de la part respective des différentes origines mentionnées ci-dessus;
- de la concentration moyenne de nitrates potentiellement en percolation.

Outre la phase de calcul, deux fiches sont éditées, l'une comporte les données (annexe A1), l'autre les résultats (annexe A2).

L'organigramme présenté en annexe B permet de visualiser la structure de ce programme qui autorise les modifications au niveau des données, cas par cas ou en groupe (avec les fichiers F. I B et F. II B concernant les flux spécifiques).

3.7. Conclusion

Ainsi, l'émission en provenance de l'agriculture représente l'essentiel de l'apport d'azote concernant le bassin d'alimentation du champ captant d'Airon-Saint-Vaast.

Compte tenu des valeurs issues du paragraphe 2.2.:

- vitesse de transfert dans les terrains non saturés de 30 à 75 cm/an (50 cm/an en moyenne);
- porosité matricielle de 83 à 92 %,

il est important d'envisager l'évolution des teneurs en nitrates pour les années à venir.

Deux éléments sont à considérer:

- la surfertilisation actuelle a débuté il y a une quarantaine d'années;
- sur 95 % de la superficie du bassin versant, la nappe se situe à plus de 20 m de profondeur.

A partir de ces données, il découle que l'essentiel de l'impact des pratiques agricoles récentes n'est pas encore parvenu au niveau des eaux souterraines. A terme, la qualité de l'eau prélevée ne pourra que se dégrader.

Trois éléments peuvent activer le processus:

- la nature sableuse des formations superficielles;
- la dissolution de la couche crayeuse (une douzaine de cuvettes d'effondrement recensée par Douay F. et al., 1985);
- l'infiltration faisant suite au ruissellement.

Même si des fluctuations à la baisse peuvent se produire suite aux variations pluriannuelles de la lame d'eau infiltrée, la concentration moyenne de l'eau du champ captant devrait se stabiliser et approcher 50 mg/l de nitrates. Cependant, la mise en oeuvre des solutions proposées dans le chapitre 6 permettrait d'éviter cette échéance.

4. APPROCHE DE L'EMISSION D'AZOTE EN MILIEU URBAIN

4.1. Diversité des cheminements des eaux usées

Dans le chapitre 3, la quantification de l'émission d'azote d'origine urbaine n'a été évoquée que très succinctement. Le problème ne fut qu'envisagé dans sa globalité en considérant une valeur maximale et indifférenciée de 15 g de N/habitant/jour (l'ensemble des eaux usées collectées ou non étant rejetées dans la nappe).

Cette simplification ne répond pas au constat issu des observations de terrain effectuées lors de l'étude concernant l'arrondissement de Cambrai (documents 3, 4 et 5) (Préaux C., 1988) qui sert de support pour le présent chapitre.

En effet, l'enquête sur la destination des eaux usées effectuée pour chaque commune de l'arrondissement de Cambrai montre une multitude de cheminements possibles. La figure 11 n'en présente qu'une schématisation sommaire.

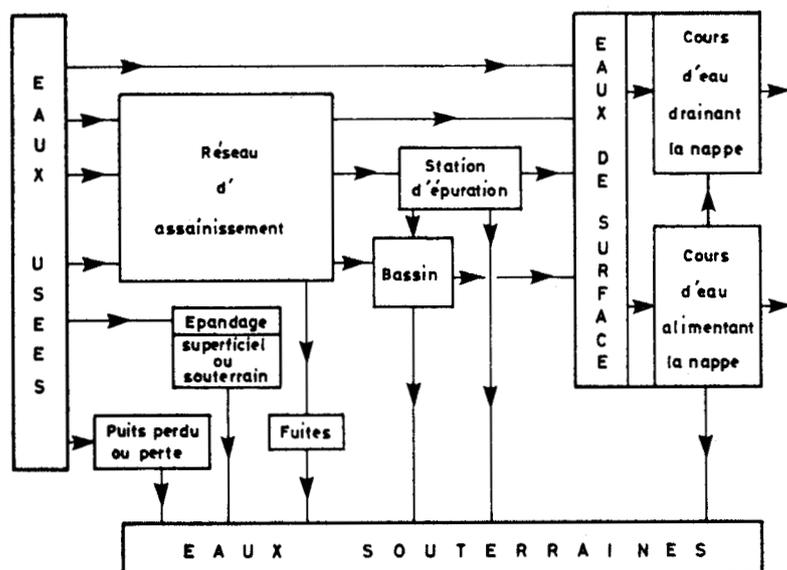


Figure 11 :
Combinaison des différents cheminements constatés pour l'azote contenu dans les eaux usées dans l'arrondissement de Cambrai.

Cette représentation ne prend pas en compte la distinction entre les eaux:

- ménagères (5 g de N/hab./jour) figurées par E.M.;
- vannes (10 g de N/hab./jour) figurées par E.V.

Il convient également d'établir une hiérarchisation des pertes potentielles vers la nappe pour chacun des cas envisagés.

4.2. Elaboration de la démarche

A partir des cas rencontrés sur le terrain, un organigramme exhaustif des combinaisons a permis d'individualiser 200 cheminements différents pour l'ensemble des eaux usées.

Selon les modalités de transit, l'évaluation du taux d'abattement en azote est variable et dépend:

- du séjour superficiel qui autorise une volatilisation et/ou une utilisation par les végétaux;
- des potentialités de dénitrification des processus d'épuration.

Une grille des taux d'infiltration est également établie.

L'ensemble des valeurs retenues est présenté en tableau V, le pourcentage complémentaire concerne la part d'azote exportée. Ceci mis au point, il est possible de quantifier les 200 cheminements évoqués ci-dessus.

TYPE DE TRANSIT	TAUX D'ABATTEMENT EN AZOTE (%)	TAUX D'INFILTRATION POTENTIEL EN AZOTE (%)
Puits perdu, perte	0	100
Fosse septique, fixe	0	10
Réseau d'assainissement	0	15
Caniveau	2,5	22,5
Eaux superficielles (fossé, cours d'eau, bassin...)	5	0 à 95
Epandage superficiel (tinette sur potager, fosse fixe sur surface agricole)	5	95
Lagunage	20	-----
Station d'épuration classique	25	-----
Epandage souterrain	40	60

Tableau V : Taux d'abattement et d'infiltration de l'azote en fonction du mode de transit des eaux usées.

Les valeurs choisies recèlent un certain nombre d'approximations, il s'avère alors inutile de conserver des cas dont la distinction n'est plus significative. Une simplification peut être apportée en adoptant des classes de flux de 2 en 2 g de N/hab./jour résultant d'une erreur estimée à $\pm 10\%$ sur l'ensemble eaux ménagères et eaux vanes, le flux considéré étant alors la valeur médiane. Une grande partie des cas peuvent ainsi être regroupés et le nombre de cheminements s'établit à 30 (annexe C). Le dépouillement des données de terrain s'en trouve grandement facilité.

4.3. Développement de la méthode à l'aide d'un traitement informatique

Un programme de calcul a été élaboré afin de prendre en compte l'ensemble des éléments présentés ci-dessus.

Il s'intitule URBI et ORBI, car il quantifie les flux d'azote émis à l'intérieur (URBI) et à l'extérieur (ORBI) des zones urbaines de chaque commune:

- au droit de la zone urbaine.

Le logiciel estime les flux (kg de N/an) et flux spécifique (kg de N/ha/an), ce dernier est cartographié sur la planche II de l'Atlas - (document n° 5), en tenant compte:

- . des 9 possibilités d'infiltration des eaux usées (y compris le déversement de tinettes afin de fertiliser les potagers) retenues (annexe C1);
- . des jardins considérés comme composés pour une moitié de pelouses (Surface Toujours en Herbe dont le tapis racinaire dense et permanent forme écran à la propagation de l'azote) et pour l'autre, de potagers (surfertilisation à l'image des cultures maraîchères);
- . de la pluie tombée sur les jardins. *La valeur est celle utilisée pour le domaine agricole (cf. 3.4.1.). L'azote de l'eau tombée sur les surfaces imperméabilisées (toitures, routes...) ainsi que de l'eau potable libérée par les fuites du réseau d'adduction est considéré comme pris en compte dans la valeur de 15 g de N/hab./jour;*

- à l'extérieur de la zone urbaine:

Sont ici distingués les effluents qui s'infiltrent de façon totale (10 cas - annexe C2) et ceux qui sont exportés par l'écoulement superficiel permanent (10 cas - annexe C3) ou sur les terres agricoles.

Deux fiches peuvent être éditées, elles comportent:

- les données concernant la population répartie en 30 rubriques regroupées en 4 parties (annexe D1, la signification des différents cas étant explicitée par l'annexe C);
- les résultats sous forme de deux tableaux, l'un pour l'émission d'azote au droit de la zone urbaine, l'autre relatif aux 5 grandes destinations de l'azote émis par les eaux usées (annexe D2).

Un sous-programme d'exploitations diverses autorise la réalisation d'autres calculs et sorties, tant sur tout ou partie d'une zone urbaine que sur une fraction ou l'ensemble des communes traitées.

L'organigramme présenté (annexe E) permet de visualiser la structure du programme, celui-ci autorise la saisie à partir du clavier ou de fichiers ainsi que divers affichages et modifications des données.

Deux traitements "manuels" sont néanmoins nécessaires dans le cas, pour une même commune, d'une distinction entre:

- des lieux de rejet d'eaux usées multiples et distants;
- l'écoulement superficiel permanent sujet ou non à infiltration.

4.4. Exemple de la commune de Villers-Outréaux

4.4.1. Justification du choix

Cette commune permet la comparaison entre les données obtenues lors de l'enquête de terrain et celles déduites de flux mesurés à l'entrée de la station d'épuration.

La sélection de cette unité de traitement est motivée par deux raisons:

- l'absence d'effluents industriels importants ; en effet, ceux-ci, dont le volume et la teneur en azote ne sont pas toujours connus, empêcheraient la comparaison entre les flux calculés et mesurés;
- l'épuration des eaux usées de la seule commune de Villers-Outréaux autorise un ajustement optimum car celui-ci porte sur une entité unique.

Les raisons du choix étant avancées, il convient tout d'abord de calculer un flux théorique d'arrivée d'azote à la station d'épuration, puis, compte tenu du flux mesuré, est élaborée une démarche à partir de laquelle sont dénombrées les différentes situations,

concernant le cheminement des eaux usées, prises en compte dans le paragraphe 4.3. Les chiffres avancés ci-dessous sont arrondis afin de rendre compte de l'ensemble des approximations.

4.4.2. Phase de calage

a) Dépouillement de l'enquête communale

La population agglomérée de Villers-Outréaux est de l'ordre de 2560 habitants répartis en 900 logements, soit 2,86 personnes par unité d'habitation:

- 700 habitations sont desservies en matière d'assainissement collectif, cela signifie qu'une canalisation d'évacuation des eaux usées existe dans la chaussée face au logement. Le réseau est en bon état et relativement neuf (moins de 10 ans pour la majeure partie de la localité, une vingtaine d'années pour le reste sauf pour une rue où une conduite vieille de 25 ans est dépourvue de boîtes de branchement). De plus, le nombre élevé de logements récents et une active politique municipale de raccordement peuvent laisser espérer un taux de raccordement élevé.

La commune estime ce dernier à:

- . 100 % pour les eaux ménagères soit 700 logements. Pour le bilan en station d'épuration, il convient de retrancher les 25 habitations d'une rue dont le réseau n'est pas encore reliée à la station d'épuration, reste donc 675 logements à prendre en compte;
 - . 95 % pour les eaux vannes soit 665 habitations, la différence avec les eaux ménagères s'explique par le constat que le raccordement des toilettes lorsqu'elles sont situées à l'arrière de l'habitation, occasionne des travaux importants et onéreux pour le particulier. De plus, dans bien des cas, l'absence de liaison au réseau de collecte n'est pas une gêne pour l'habitant qui évacue ses eaux vannes par divers moyens (puits perdu, tinette, fosse fixe...). Dans le cas présent, il s'agit de fosses fixes dont les matières de vidange sont dépotées en station d'épuration.
- 200 logements ne sont pas desservis par l'assainissement collectif. Les eaux ménagères sont alors rejetées au caniveau puis s'infiltrent à l'extérieur de la zone urbaine, très peu d'effluents rejoignent le réseau. Pour ce qui est des eaux vannes, la fosse fixe avec vidange puis traitement en station est de règle.

b) Estimation du flux d'azote à l'entrée de la station

A partir des éléments ci-dessus, sont établis les valeurs suivantes.

E.M.: 675 logements de 2,86 habitants à 5 g de N/hab./jour, soit 9,7 kg de N/jour et

E.V. : 665 logements de 2,86 habitants à 10 g de N/hab./jour, soit 19,0 kg de N/jour.

L'ensemble représente 28,7 kg de N/jour qu'il convient de réduire de 15 % (fuites de réseau), soit un flux de 24,4 kg de N/jour.

A cette valeur s'ajoutent les matières de vidange (10 g de N/hab./jour) de 235 logements soit 6,7 kg de N/jour ramenés à 6,1 kg de N/jour (10 % de fuites). La quantité d'azote arrivant en station s'élève donc à 30,5 kg/jour.

c) Comparaison entre les valeurs du flux d'azote calculé et mesuré

La moyenne des flux mesurés trimestriellement par le Service d'Assistance Technique à l'Exploitation des Stations d'Épuration (S.A.T.E.S.E.) à l'entrée de la station s'élève, pour la même année, à 10,7 kg de N/jour.

Cette valeur ne représente que 35 % du flux calculé et peut atteindre 44 % s'il n'est pas tenu compte des matières de vidange (les responsables de la station affirment recevoir très peu de ce type d'eaux vannes). Cette comparaison démontre la nécessité d'appliquer un important abattement (55 %) sur les renseignements fournis par la commune pour les taux de raccordement au réseau d'assainissement.

A partir de ce constat, il faut imaginer un mode d'évacuation des eaux usées non apparent (puisque non signalé), la démarche retenue consiste à expliquer la différence par des rejets dans des puits perdus.

4.4.3. Etablissement des valeurs du flux d'azote à cartographier

Ce préliminaire établi, une analyse sur le "devenir" des eaux usées est entreprise en tenant compte des flux présentés en annexe C et D 1.

a) Au droit de la surface urbaine

1) Emission d'azote à partir des eaux usées

Deux classes de logements sont distingués en fonction de la desserte par un

assainissement collectif:

- logements desservis par un assainissement collectif.

L'application de la démarche énoncée permet de constituer le tableau VI. Les données de base utilisées sont celles recueillies lors de l'enquête communale.

Le total de l'émission se monte à 6,2 t/an.

EFFLUENT	CHEMINEMENT	CAS DE L'ANNEXE C1	NOMBRE DE LOGEMENTS	FLUX (g de N/hab./jour)
EAUX MENAGERES	Puits perdu	5	380	5
	Réseau	2	320	1
EAUX VANNES	Puits perdu	8	380	9
	Réseau	2	300	1
	Fosse fixe	-	20	1

Tableau VI : Logements desservis par un réseau d'assainissement: quantification et émission d'azote au droit de la zone urbaine
Commune de Villers-Outréaux (arrondissement de Cambrai).

- logements non desservis par un assainissement collectif.

L'analyse est ici plus complexe car il convient de distinguer les logements récents car ceux-ci sont équipés d'un assainissement individuel, des plus anciens. Parmi les 300 habitations signalées, 200 sont groupées en lotissements de 10 à 80 unités et sont raccordées au réseau d'assainissement. Les 100 autres habitations neuves sont considérées comme réparties de façon homogène dans le tissu urbain. Le secteur non desservi par l'assainissement collectif représentant le quart du parc immobilier, cela conduit à prendre en compte 25 logements récents, équipés d'un assainissement individuel tant pour les eaux ménagères que pour les eaux vannes.

L'application du coefficient de 55 % de puits perdus (cette valeur est minorante car il est probable qu'en secteur non desservi par l'assainissement collectif, le taux de puits perdus est supérieur à celui déterminé en zone desservie) fournit 95 ouvrages par lesquels est éliminé l'ensemble des eaux usées. Une étude topographique de la zone urbaine montre que pour les 3/4

des logements non desservis par un réseau de collecte des eaux usées, les eaux ménagères rejetées au caniveau regagnent le réseau par le biais des avaloirs (système unitaire). Compte tenu des 80 logements non encore analysés, ce cheminement concerne 60 habitations, les eaux ménagères des 20 autres maisons se dirigent hors de la zone urbaine. Les eaux vannes sont stockées dans des fosses fixes avant d'être dépotées en station d'épuration ou épandues sur les terres agricoles.

Le dépouillement terminé, il est possible de quantifier l'émission d'azote au droit de la zone urbaine en utilisant les rubriques et la grille proposées en annexe C 1 et D 1. Le tableau VII résume les cas pris en compte.

Le total de l'émission s'élève à 1,8 t/an d'azote.

EFFLUENT	CHEMINEMENT	CAS DE L'ANNEXE C1	NOMBRE DE LOGEMENTS	FLUX (g de N/hab./jour)
EAUX MENAGERES	Puits perdu	5	95	5
	Caniveau / réseau	1	60	1
	Epannage souterrain	3	25	3
	Caniveau	1	20	1
EAUX VANNES	Puits perdu	8	95	9
	Fosse fixe	-	80	1
	Epannage souterrain	7	25	5

Tableau VII : Logements non desservis par un réseau d'assainissement: quantification et émission d'azote en droit de la zone urbaine.

Commune de Villers-Outréaux (arrondissement de Cambrai).

- Additionnée du flux émis par les logements desservis par un assainissement collectif, le bilan est de 8,0 t/an d'azote ($\pm 0,8$ t pour être conforme aux approximations retenues).

2) Emission d'azote issue des jardins

Deux autres sources sont à mentionner, l'eau de pluie et l'occupation du sol:

- l'eau de pluie

A partir de la concentration prise en compte en 3.4.1. (1,34 mg/l de N), d'une

pluviométrie efficace moyenne de 170 mm/an et d'une superficie déterminée statistiquement à 28 ha, le flux résultant s'élève à 65 kg de N/an ;

- l'occupation du sol

Conformément à la composition évoquée au paragraphe 4.3., le flux spécifique émis au droit des pelouses est nul et celui issu des potagers s'élève à 50 kg de N/ha/an. Sa valeur moyenne s'établit donc à 25 kg de N/ha/an, soit un flux de 700 kg de N ;

- l'émission totale au droit des jardins est donc de 765 kg de N/an.

3) Bilan sur l'ensemble de la surface urbaine

Le flux émis au droit de la zone urbaine s'élève donc à 8,8 t de N/an ($\pm 0,9$ t).

Compte tenu de la superficie urbaine planimétrée à 80 ha, le flux spécifique résultant est de 110 kg de N/ha/an (± 11 kg de N) (coloration brune sur la planche II de l'Atlas - document n° 5).

Cette analyse ne concerne que les eaux usées qui s'infiltrent au droit de la surface urbaine, une part des effluents collectés ou non quittent cette zone, il convient maintenant d'en examiner la destination.

b) A l'extérieur de la zone urbaine

Une quantification de l'émission d'azote au droit de l'écoulement superficiel et de bassins est entreprise lorsque les eaux usées évacuées hors de la localité s'infiltrent. C'est le cas pour la commune de Villers-Outréaux à partir de laquelle ce paragraphe expose la démarche mise en oeuvre.

La majeure partie des effluents collectés est admise à la station d'épuration de la commune; après traitement, les eaux sont rejetées dans le Ruisseau de Sargrenon et s'y perdent sur plusieurs kilomètres.

Le développement qui suit quantifie le flux émis et propose un flux spécifique qui permet une comparaison avec les émissions diffuses (agricole...). Le tableau VIII présente le bilan à la sortie de la station d'épuration.

EFFLUENT	CHEMINEMENT	CAS DE L'ANNEXE C 1	NOMBRE DE LOGEMENTS	FLUX (g de N/hab./jour)
EAUX MENAGERES	Réseau/station	3	310 (1)	3
	Caniveau/réseau/station	3	60	3
EAUX VANNES	Réseau/station	8	300	7
	Fosse fixe/station	8	50 (2)	7

Tableau VIII : Quantification du flux d'azote rejeté après transit par la station d'épuration.
Commune de Villers-Outréaux (arrondissement de Cambrai).

(1) ≠ 320 car le réseau d'une rue n'est pas relié à la station.

(2) L'autre moitié est considérée épanchée sur les terres agricoles.

Le bilan s'élève à 3,7 t de N/an, ce tonnage disponible est à diluer dans un volume d'eaux usées et pluviales:

- calcul du volume d'eaux usées.

Compte tenu d'une production de 5,5 kg de N/humain/an, 3,7 t de N/an correspondent à près de 700 personnes.

En se basant sur un rejet d'eaux usées de 100 l/personne/jour, ce sont 26 000 m³ qui transitent annuellement par la station.

- calcul du volume d'eau pluviale.

De la superficie totale de la zone urbaine (80 ha), il faut déduire:

. 28 ha de jardin;

. 8 ha de surface urbanisée dont les eaux n'aboutissent pas au niveau de la station d'épuration (pente inverse, déversoir d'orage).

Sur les 44 ha restant est appliqué un coefficient de ruissellement de 45 %, (Guerrée H. et al., 1978) la surface à considérer est donc de 20 ha.

La pluviométrie brute est de 695 mm/an (Beckelynck J., 1981) , il en résulte un volume de 139 000 m³/an.

Le volume total à infiltrer s'établit donc à 165 000 m³/an.

Compte tenu des jaugeages qui ont procuré un débit d'infiltration de $49,2 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$ linéaire pour une largeur moyenne de cours d'eau de $0,67 \text{ m}$. Ce ne sont pas moins de 4 km qui sont nécessaires pour infiltrer l'ensemble.

Ces valeurs permettent de calculer une surface d'infiltration de $2,6 \text{ ha}$ de laquelle est déduit un flux spécifique de $15\,000 \text{ kg de N/ha/an}$.

Ce chiffre illustre nettement l'importance de l'infiltration au droit de l'écoulement superficiel au regard de la valeur rencontrée pour le tissu urbain ($110 \text{ kg de N/ha/an}$).

Quatre rejets périphériques à la zone urbaine (sans collecte et/ou épuration) procurent après application de la même démarche des longueurs d'infiltration s'étaguant de 30 à 600 m et des flux spécifiques compris entre 700 et $18\,000 \text{ kg de N/ha/an}$. Les flux spécifiques les plus faibles sont rencontrés lorsque les eaux usées sont fortement diluées (déversoir d'orage).

4.5. Conclusion

Ce chapitre permet de préciser le nombre d'éléments pris en compte pour l'analyse des données d'une commune de moyenne complexité (pas de tinettes avec épandage sur les jardins, sans sani-broyeur ou fosse septique suivi de déversement en écoulement superficiel, point d'écoulement superficiel permanent infiltrant, absence d'interconnexion avec d'autres communes...).

L'apport de la méthode proposée est double:

- une proposition de taux d'abattement et d'infiltration relatifs à l'azote pour l'ensemble des cheminements rencontrés;
- une approche permettant d'appréhender la réalité du "devenir" des eaux usées à partir de renseignements divers (communaux, administratifs...).

Il demeure néanmoins l'introduction d'hypothèses et de valeurs moyennes qu'il conviendrait de moduler en fonction de chaque localité (état du réseau, des fosses, longueur des parcours...).

Ce travail aboutit à l'obtention d'un bilan sur les eaux usées d'une entité urbaine tant du point de vue qualitatif que quantitatif. La finalité est matérialisée par la planche II de l'Atlas (document n° 5) qui permet d'apprécier la situation de l'assainissement de chaque commune. La notion de classement devrait susciter une prise de conscience, il s'agit également d'une aide

à la décision en vue d'une programmation des travaux à mener. Ainsi, dans l'absolu, en considérant la nappe dans son ensemble, il conviendrait de traiter en premier lieu les communes émettrices du flux d'azote le plus élevé. Dans la réalité, seul un secteur d'une zone urbaine est en général responsable de la pollution nitrée d'un captage. Cet aspect est analysé en prenant en compte le sens d'écoulement de la nappe en amont de l'ouvrage d'alimentation en eau potable. Ce travail est effectué pour chaque captage dans la fiche "Bilan" des dossiers communaux (document n° 3) et pour les ouvrages les plus touchés dans le chapitre 4 du rapport de synthèse (document n° 4).

5. APPLICATION DE LA DEMARCHE DE QUANTIFICATION DES EMISSIONS D'AZOTE A L'ECHELLE D'UN ARRONDISSEMENT

5.1. Les outils nécessaires

L'ensemble de la méthodologie utilisée est maintenant connu (chapitres 3. et 4.).

Deux exemples ont été présentés, l'un concerne un secteur agricole de 21 km² (chapitre 3.), l'autre une zone urbaine de 2 600 habitants (chapitre 4.). Le présent chapitre envisage l'application de cette même démarche à la totalité de l'arrondissement de Cambrai. Essentiellement rural, il compte 170 000 habitants répartis en 115 communes sur une superficie de 882 km² (documents n° 3, 4 et 5) (Préaux C., 1988).

5.2. Une situation préoccupante

Dans l'arrondissement de Cambrai, les nitrates sont depuis plusieurs années le seul paramètre chimique analysé couramment dont la présence est inquiétante. Cet état est préoccupant pour plusieurs raisons:

- une tendance générale à l'accroissement des teneurs en nitrates;
- certains ouvrages dont l'eau, destinée à l'alimentation humaine, avoisine ou dépasse la Concentration Maximale Admissible (C.M.A.) de 50 mg/l de nitrates (Directive de la Communauté Economique Européenne du 15-07-1980, Décret de la République Française du 03-01-1989);
- l'absence de connexions suffisantes entre réseaux permettant l'arrêt des ouvrages les plus atteints compensé par l'augmentation des prélèvements à partir des captages sains;
- la quasi-totalité de l'eau captée provient d'une seule nappe, dite de la craie, (car localisée dans les pores et fissures de cette roche) dont l'extension est presque continue sous l'ensemble de l'arrondissement;
- la protection naturelle de la nappe assurée par les terrains sus-jacents n'est que très localisée;

- la présence d'activités humaines responsables d'importantes émissions d'azote:
 - . l'agriculture, l'arrondissement de Cambrai est une grande région agricole où dominent les cultures de céréales (blé, orge) et de plantes sarclées (betterave sucrière, pomme de terre);
 - . les eaux usées, les rejets sont nombreux car seules 30 communes sur 115 évacuent leurs effluents sans risque pour les eaux souterraines.
- l'accumulation des arrivées d'eau nitratée au fil de l'écoulement souterrain, de l'amont (au sud) à l'aval (au nord).

Ces diverses constatations expliquent la situation inquiétante actuelle.

5.3. Un bilan chiffré

Le bilan est établi à la suite d'un recueil d'informations auprès d'une trentaine d'Administrations et Services divers, des responsables de chacune des 115 communes et après divers travaux de terrain.

5.3.1. Domaine agricole

Le tableau IX présente le bilan des émissions d'azote au droit des terres agricoles.

ORIGINE	FLUX		FLUX SPECIFIQUE
	(t de N/an)	(%)	(kg de N/ha/an)
Fertilisants artificiels (grande culture)	563	36	10
Résidus de l'élevage traditionnel	352	22	6
Résidus de l'élevage industriel	185	12	3
Pluie	165	10	2
Retournement de pâture	143	9	29
Fertilisants artificiels (culture à plus fortes pertes)	92	6	50
Matières de vidange	81	5	1,4
T = TOTAL / M = MOYENNE	1581 = T	100 = T	19,3 = M

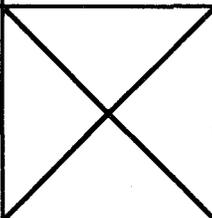
Tableau IX : Bilan des émissions d'azote au droit des terres agricoles de l'arrondissement de Cambrai.

Le lessivage potentiel d'azote issu de la fertilisation artificielle et celui provenant de la non prise en compte de la minéralisation des résidus de l'élevage et domestiques induisent 80 % de l'émission d'azote au droit des terres agricoles avec un tonnage annuel de près de 1270 t.

5.3.2. Domaine urbanisé

L'azote émis provient de deux grands ensembles:

- le tableau X résume ce que devient l'azote contenu dans les eaux usées produites par l'ensemble des habitants de l'arrondissement, ainsi que par une partie des activités industrielle.

DESTINATION DE L'AZOTE CONTENU DANS LES EAUX USEES			FLUX		
			(t de N/an)	(%)	(%)
INFILTRATION	AU DROIT DE LA SURFACE URBAINE	Puits perdus, fossés...	212	22,3	31,7
		Fuites des réseaux d'eaux usées	70	7,4	
		Epandage sur potager	11	1,2	
		Epandage souterrain	8	0,8	
	A L'EXTERIEUR DE LA SURFACE URBAINE	Epandage sur terres labourables	81	8,6	20,1
		Cours d'eau permanent non drainant	54*	5,7	
		Cours d'eau à infil- tration totale	27*	2,9	
		Bassin aménagé	14	1,5	
		Fossés, points bas...	13	1,4	
	EXPORTATION		Cours d'eau permanent drainant	294	31,0
Epandage sur pâtures			22	2,3	
Cours d'eau permanent non drainant			16	1,7	
ELIMINATION: dénitrification - volatilisation			112	11,8	
NON ANALYSÉ (logements isolés)			13	1,4	
TOTAL PRODUIT			947	100	

Tableaux X : Destination de l'azote contenu dans les eaux usées de l'arrondissement de Cambrai.

* Cette valeur comprend une part d'azote d'origine industrielle.

Il résulte que plus de la moitié de l'azote contenu dans les eaux usées est susceptible de gagner la nappe à raison de 490 t /an. Près de 44 % de ce tonnage est induit par l'évacuation des effluents dans les puits perdus, caniveaux ou fossés au droit de la surface urbanisée.

Dans le chapitre 4. était souligné l'importance du flux spécifique lors de l'infiltration d'eaux usées au droit de l'écoulement superficiel (15 000 kg de N/ha/an). Cette valeur est cependant à relativiser car ce type de perte ne représente que 20 % du potentiel d'infiltration;

- une soixantaine de tonnes supplémentaires proviennent de la fertilisation des potagers (hormis le cas de l'épandage du contenu des tinettes pris en compte ci-dessus), du lessivage de l'humus suite à l'urbanisation des terres agricoles ainsi que de l'azote contenu dans l'eau de pluie qui tombe sur les jardins.

5.3.3. Bilan

L'azote provenant des activités agricoles est actuellement responsable de 65 % du flux potentiel d'azote émis à la surface du sol. Le flux spécifique moyen est de 19,3 kg de N/ha/an; compte tenu de la dilution par la pluviométrie efficace, cette valeur correspond à 50 mg/l de nitrates. La concentration actuellement observée dans la nappe, de l'ordre de 25 à 35 mg/l de nitrates, (*de façon naturelle, les nitrates ne sont présents en nappe qu'en quantité réduite, soit 15 mg/l au maximum*) n'est que la résultante partielle de l'émission d'azote produite ces dernières années. Quatre facteurs dont les deux premiers développés dans le paragraphe 2.2. expliquent ce constat de retard:

- la vitesse de transfert dans les terrains non saturés est de l'ordre de 50 cm/an;
- la porosité matricielle (plus de 80 %) est nettement plus importante que la porosité de fissures;
- la surfertilisation actuelle a débuté il y a une quarantaine d'années;
- la profondeur de la nappe est supérieure à 20 m pour plus de la moitié de la superficie de l'arrondissement.

De ce fait parviennent encore à ce jour à la nappe des eaux infiltrées il y a plus de quarante années, époque à laquelle les pratiques agricoles n'engendraient pas la surfertilisation présente. Cette notion de retard était déjà observée avec l'utilisation du tritium pour la datation de l'eau (Bernard D., 1979).

Une dénitrification partielle dans le sous-sol peut également intervenir.

L'azote issu des eaux usées représente 25 % du flux total émis. Cependant, l'aspect plus ponctuel et immédiat de l'infiltration occasionne un impact souvent à l'origine de fortes teneurs en nitrates.

A terme, si la situation est inchangée au niveau agricole, les trois quarts des apports d'azote subsisteront et un assainissement complet ne les diminuerait que de 25 %. De plus, même si le flux émis par l'agriculture baissait, les quantités importantes d'azote en percolation entraîneraient, en arrivant à la nappe, une dégradation inéluctable.

5.4. Démarche pour l'élaboration d'une cartographie de la teneur en nitrates de la nappe

5.4.1. Résultat

Le présent paragraphe n'envisage plus le bilan azoté en terme d'émission à la surface du sol mais traite de la répartition géographique de la teneur en nitrates au niveau des eaux souterraines. La planche VI de l'Atlas (document n° 5) illustre cet aspect sur l'ensemble de l'arrondissement de Cambrai.

Le constat est relativement positif puisque la majeure partie de la nappe présente une concentration comprise entre 20 et 35 mg/l de nitrates, il existe même une vingtaine de secteurs où l'eau contient moins de 20 mg/l de nitrates.

Cependant, l'ensemble des zones urbaines et un grand nombre de cours d'eau sont à l'origine de concentrations supérieures à la norme de 50 mg/l de nitrates. A partir de ces zones fortement polluées s'étendent des panaches de pollutions pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres.

5.4.2. Démarche: les différents facteurs

Ce paragraphe explique la démarche de superposition d'informations entreprise manuellement pour réaliser la carte de synthèse de l'Atlas (planche VI du document n° 5).

Pour chaque facteur, encore appelé descripteur est proposé un aperçu des coefficients multiplicateurs pris en compte.

a) Le flux émis à la surface du sol

Celui-ci est figuré sur la planche II de l'Atlas, commune par commune, avec des représentations différentes pour les domaines agricoles et urbains, les cours d'eau infiltrant et les émissions ponctuelles diverses (bassins, décharges...). Les valeurs de départ des coefficients multiplicateurs (C.M.) de ce descripteur s'étagent donc de 1,5 kg de N/ha/an (zone boisée) à 125 kg de N/ha/an (secteur urbanisé) puis de 500 à 50 000 kg de N/ha/an pour les pertes issues de l'écoulement superficiel.

b) La protection naturelle de la craie

Celle-ci est cartographiée sur la planche III de l'Atlas. La possibilité d'infiltration est régie par la nature des terrains sus-jacents à l'aquifère. L'argile, écran imperméable, empêche toute propagation (C.M. = 0) (*cela n'est que partiellement vrai en milieu urbain où les pertes et puits perdus atteignent la craie*). alors que la craie affleurante n'assure aucune protection (C.M. = 1). Les facteurs suivants ne concernent donc que les secteurs dépourvus d'argile.

c) La dilution par la pluviométrie efficace

Celle-ci est représentée sur la figure 12. Un même flux peut être entraîné par dilution dans un volume d'eau variant presque du simple au double. Le C.M. de ce descripteur fluctue de 2,4 (forte dilution) à 4,1 (faible dilution). Ces valeurs tiennent compte de la transformation d'unité induite par le passage de kg de N/ha/an à mg/l de NO_3^- (le détail de cette opération est présenté au paragraphe 3.1.2. b du document n° 4).

d) Le retard induit par l'épaisseur des terrains non saturés

La profondeur de la nappe est illustrée par la figure 13. Le transit vertical au travers de quelques mètres de terrain non saturés entraîne un retard restreint (C.M. proche de 1) alors que la traversée de 50 m de ces formations peut demander plus de 100 années (C.M. proche de 0) (cf. le paragraphe 2.2.).

En domaine agricole, cette considération n'aurait pas lieu d'être dans le cas d'une émission, au cours du temps, d'un flux spécifique constant. Or, ce n'est que depuis moins de 40 années que l'activité agricole, devenue intensive et utilisatrice d'engrais artificiels, occasionne d'importantes pertes d'azote.

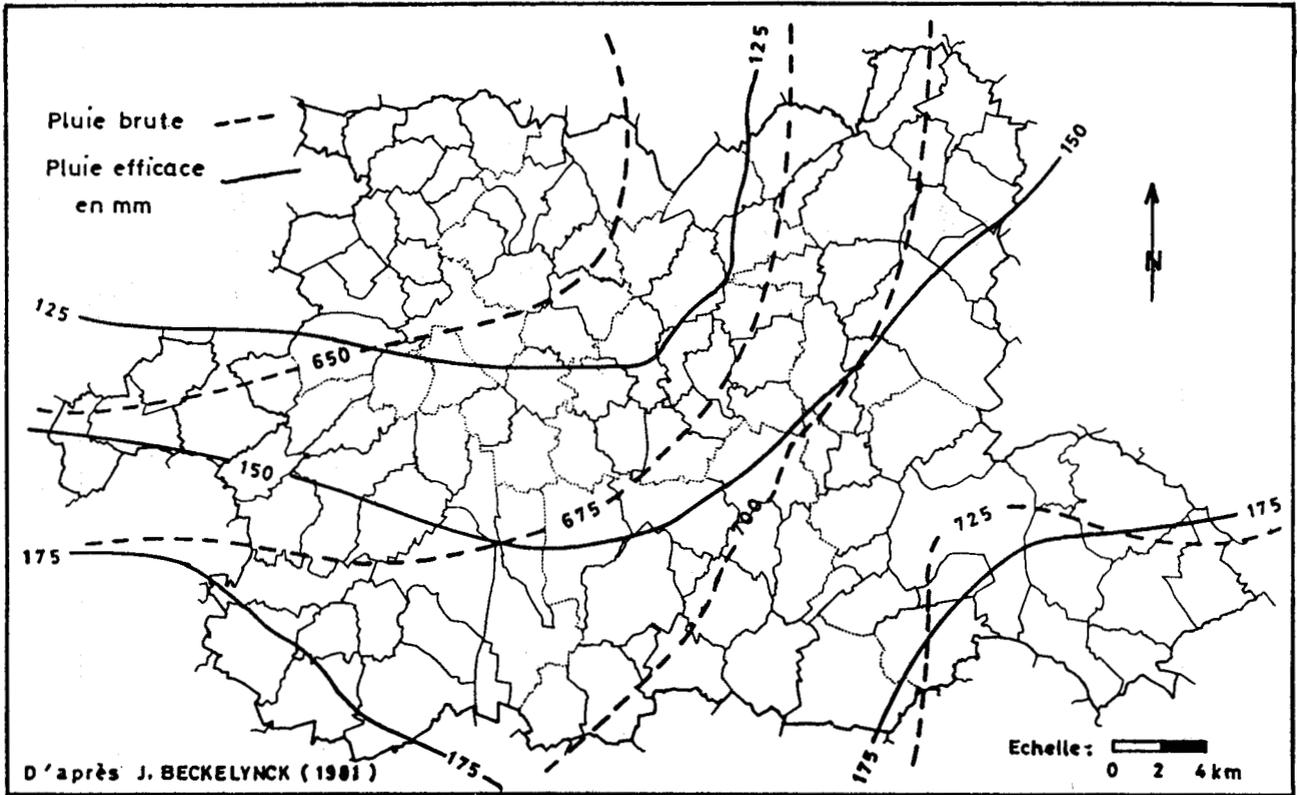


Figure 12 : Pluie brute et pluie efficace. Moyennes 1956 - 1976 pour l'arrondissement de Cambrai.

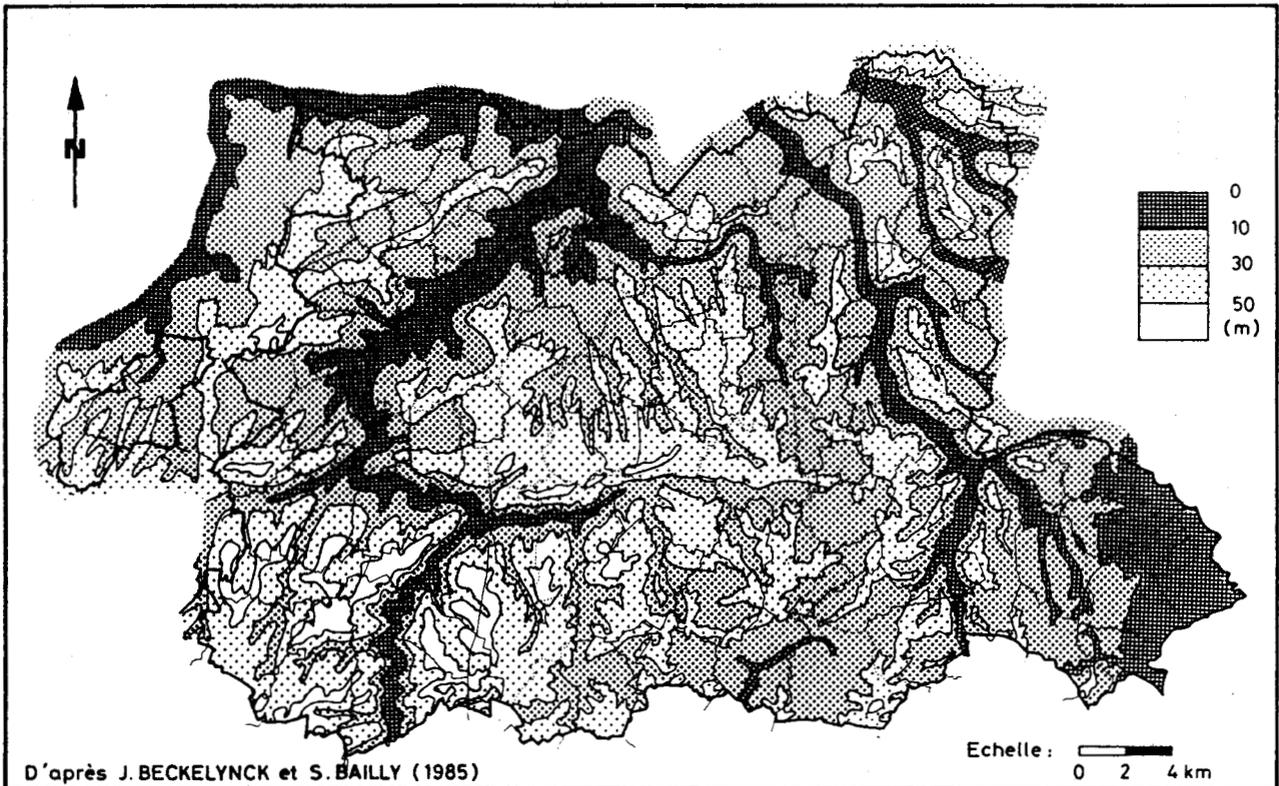


Figure 13 : Profondeur de la nappe par rapport au sol dans l'arrondissement de Cambrai.

En domaine urbain, cette distinction n'est pas à retenir en ce qui concerne les eaux usées. La permanence de l'infiltration (comparativement à la pluviométrie efficace) assure un transfert rapide (instantané en ce qui concerne les puits perdus, de l'ordre de 70 m/an au droit de l'écoulement superficiel, cf. le paragraphe 2.4.1. du document n°4).

Les modalités de transit de l'azote entre le sol et la nappe sont ainsi établies. Il convient maintenant d'analyser l'évolution dans la nappe.

e) La dilution dans les eaux souterraines

Plusieurs paramètres sont ici à prendre en compte:

- l'épaisseur de craie mouillée.

Celle-ci varie entre une valeur proche de 0 m d'où une faible dilution (C.M. voisin de 1) et près de 45 m (C.M. inférieur à 1). En général, l'épaisseur de l'aquifère est supérieure à 10 m;

- le sens d'écoulement.

Celui-ci entraîne un décalage vers l'aval entre le lieu de l'impact de l'infiltration et la manifestation tangible sur la teneur en nitrates des eaux souterraines.

Par exemple, au droit d'une zone urbaine à l'origine d'une forte émission d'azote, ce n'est qu'après avoir parcouru une certaine distance sous le tissu urbain et dans le sens de l'écoulement que la concentration en nitrates de la nappe devient forte. A l'inverse, à l'aval du village, la décroissance des teneurs s'opère suite à l'infiltration d'une eau moins chargée;

- la facilité de circulation des eaux souterraines (transmissivité).

Ce paramètre est délicat à prendre en compte car permet, d'une part une plus grande dilution suite à un mouvement plus facile, et, d'autre part, une progression plus rapide occasionnant un impact de l'azote infiltré plus lointain.

Ces trois paramètres sont figurés sur la planche IV de l'Atlas. L'épaisseur de craie mouillée se déduit de la différence entre la cote piézométrique et celle du substratum de l'aquifère.

f) Les concentrations en nitrates relevées dans la nappe

Les teneurs en nitrates ponctuellement mesurées ont une signification différente selon le débit d'exploitation de l'ouvrage concerné:

- dans le cas d'un faible prélèvement, la représentativité est locale et caractérise une situation donnée des 5 facteurs précédemment évoqués. A partir de ce constat, il est possible de travailler par analogie avec des sites présentant les mêmes conditions et pouvant être distants de plusieurs kilomètres;
- inversement, lorsque le prélèvement est important, la représentativité concerne une aire plus étendue. Dans ce cas, l'analogie présentée ci-dessus est impossible à établir, l'utilité de tels points est dans la caractérisation d'une zone plus ample autour du lieu de prélèvement. La teneur en nitrates mesurée est cette fois la résultante d'un ensemble de situations souvent diverses des facteurs envisagés pour réaliser une cartographie de la variable chimique "nitrate".

Ces deux paramètres, la concentration en nitrates et le prélèvement, sont cartographiés sur la planche V de l'Atlas.

5.4.3. Conclusion

Cette démarche montre combien il est illusoire de procéder par interpolation que celle-ci soit simple (linéaire, quadratique) ou plus complexe (ajustement polynomial, krigeage ...). La réalisation automatique d'une carte de représentation continue d'une variable chimique ne prend en compte que les valeurs mesurées ponctuellement dans la nappe sans considérer l'ensemble des facteurs présentés dans ce paragraphe.

A titre d'exemple: sous un village, l'absence de point d'analyse ne permettrait pas d'obtenir une forte concentration en nitrates. La solution serait d'imposer des valeurs pour la cartographie automatique. Cette dernière perd alors son intérêt car la démarche se rapproche du travail effectué manuellement.

5.5. Utilisation de l'infographie

Les planches évoquées ci-dessus ont été réalisées par un procédé de cartographie assistée par ordinateur (C.A.O.). Le moyen utilisé est le système Intergraph qui emploie un ordinateur VAX 11/730 de la Digital Equipment Corporation basé au centre scientifique du B.R.G.M. à Orléans.

Les caractéristiques du système et les modalités de réalisation des planches de l'Atlas sont décrites en annexe F.

Les avantages de la méthode sont nombreux, à savoir:

- la saisie des données à partir de bases de données, par scanérisation, d'où un gain de temps considérable;
- l'interactivité entre le dessinateur et l'auteur du document. La possibilité des restitutions (affichage écran - sortie brouillon, électrostatique) facilitent l'élaboration et les corrections. Ces dernières sont toujours à éviter aux niveaux ultérieurs de la gravure et du pelliculage et plus encore sur les films;
- la fusion de cartes de tailles et d'échelles différentes en une carte ininterrompue;
- la mise à jour et la réécriture de n'importe quelle portion d'une carte;
- la division de la carte de base;
- le changement d'échelle;
- le choix de restitution à partir d'un ensemble d'informations saisies pour aboutir à des sous produits cartographiques (regroupement, suppression de détails);
- les cartes sont facilement extraites de la base de données pour être manipulées interactivement et ainsi:
 - . aider à analyser des problèmes précis;
 - . faciliter la prise de décision;
- la visualition en trois dimensions à partir de divers systèmes de projection, de l'utilisation du Modèle Numérique de Terrain (M.N.T.)... Le relief peut être représenté par des courbes de niveau, ombrages, profils et les altitudes montrées en différentes couleurs;
- le calcul automatique de surfaces comprises dans des périmètres fermés;
- l'existence d'une interface entre les données raster satellitaires qui une fois traitées sont transmises au système Intergraph à base de graphique vectoriel;
- les statistiques géographiques... et autres données spatiales liées aux éléments graphiques sont enregistrées dans les fichiers du système de gestion et de recherche de données (D.M.R.S.). Le D.M.R.S. intégré avec les fichiers du logiciel de conception graphique interactive (I.G.D.S.) produit une base de données cartographique numérique complète.

L'infographie se révèle donc un procédé cartographique d'une grande souplesse qui autorise la réutilisation, la mise à jour des documents... Le temps d'exécution d'une carte est divisé par un facteur trois par rapport à la cartographie classique. Le travail peut encore être simplifié avec l'acquisition automatique de données à l'aide d'un scanner.

Cependant, cet aspect de simplification ne concerne que les étapes de saisies et de restitutions intermédiaires. En cas d'impression, le document est alors "figé" et les mises à jour nécessitent de nouvelles opérations de burinage, pelliculage, film...

6. SOLUTIONS ACTUELLEMENT PROPOSEES ET LEURS LIMITES

6.1. En milieu agricole

L'aspect prépondérant de la pollution d'origine agricole est souligné dans les chapitres 3 et 5. La cause principale relève de l'activité agricole moderne avec les types de cultures, la fertilisation, que celle-ci soit artificielle (engrais minéraux) ou naturelle (résidus de l'élevage et domestiques), les pratiques culturales...

Une démarche, toute théorique, de fertilisation raisonnée est avancée ci-dessous. Son but consiste à diminuer, voire annuler l'azote entraîné par la pluie efficace vers les eaux souterraines. Pour ce faire, il convient de prendre en compte:

- le besoin exact de la culture;
- le stock résiduel contenu dans le sol (en particulier lors de retournement de pâtures, déboisement...) avant la fertilisation;
- l'apport par le biais des résidus de l'élevage, matières de vidange, boues de station d'épuration...;
- le reliquat après la récolte dans le cas où le sol doit rester non couvert durant les périodes automnales et hivernales. Pour ce faire, des cultures dérobées peuvent être mises en place entre deux cultures principales afin d'utiliser l'azote excédentaire;
- la dénitrification dans le sol (plutôt pour les jardins).

L'application de ces mesures est difficile car elle se heurte à une multitude de cas particuliers et de phénomènes naturels dont la maîtrise est souvent délicate, voire actuellement impossible. Les paragraphes ci-après montrent cet aspect et proposent une analyse critique des solutions.

6.1.1. *Quantification du besoin exact de la culture en azote*

Celui-ci dépend:

- de la culture considérée;
- du type et de l'épaisseur du sol;
- de la date de semis.

Plusieurs paramètres entraînent des risques d'erreurs:

- le type et l'épaisseur du sol peuvent présenter, même au niveau de la parcelle,

une hétérogénéité. Cet aspect est particulièrement développé dans le bassin versant du champ captant de la ville de Berck sur Mer où trois voire quatre types de sols différents existent sur une même parcelle. La quantité d'azote restant dans le sol après la récolte est plus importante pour un sol profond que pour un sol superficiel, la différence peut être de l'ordre d'une quinzaine de kg de N/ha/an;

- la date de semis est importante, mais interviennent ensuite les conditions climatiques. Or, malgré la mise à la disposition des agriculteurs de prévisions locales, il n'est pas possible, avec les moyens techniques actuels de les étendre à plus de cinq jours. Une période pluvieuse qui se développe suite à l'épandage d'engrais de février occasionne un important lessivage de l'azote. Au contraire, de fortes températures entraînent une "surproduction de nitrates" par minéralisation de la matière organique du sol. De plus, le climat intervient également sur la cinétique des transformations des différentes formes de l'azote.

Ces quelques observations induisent une surfertilisation de précaution à l'origine d'un lessivage potentiel vers la nappe.

L'équation **besoin du blé = fourniture du sol + engrais** n'est donc pas réellement applicable puisque l'azote mis à la disposition de la plante n'a pas une efficacité identique quelle que soient les conditions (implantation, type de sol...). Une partie du problème de surfertilisation provient de l'équation:

Azote absorbé par le blé + azote non utilisable = fourniture du sol + engrais

Il faut donc augmenter la concentration d'azote dans le sol bien au-delà de ce qui est nécessaire pour alimenter correctement la plante. Ainsi est définie la notion d'efficience comme le rapport:

Azote absorbé par la plante
Fourniture du sol + engrais

La figure 14 permet de comprendre l'importance de ce facteur et met en évidence, pour un même rendement, une différence significative dans les doses d'azote. L'excédent en question est donc disponible pour un entraînement vers la nappe.

Trois paramètres font varier l'efficacité de l'azote:

- la structure du sol;
- la date de l'apport;
- l'action de certains parasites.

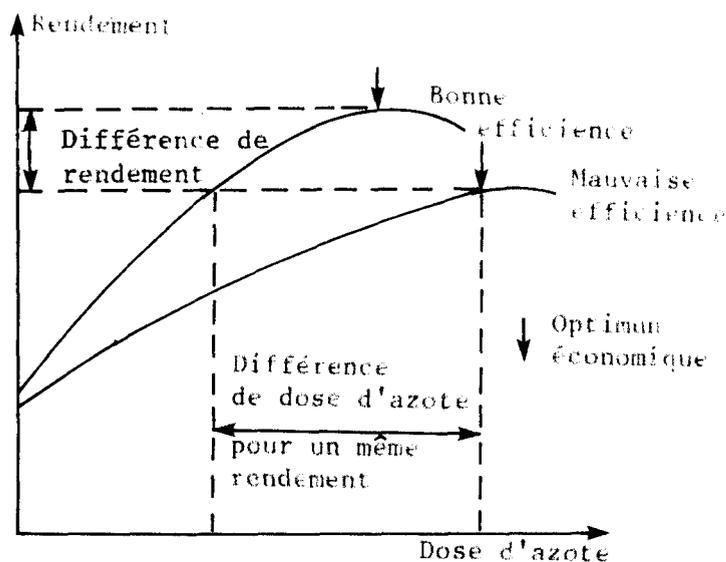


Figure 14 : courbe théorique de réponse à l'azote pour deux types d'efficacité (Viaux P., 1983).

6.1.2. Quantification du reliquat d'azote disponible dans le sol

Celui-ci est fonction:

- de l'effet des résidus de la récolte précédente;
- du reliquat "sortie hiver" de la culture antérieure;
- de la minéralisation de l'humus;
- de l'effet des apports de matières organiques (résidus de l'élevage et domestiques);
- de l'effet d'anciens retournements de prairies.

Ces éléments peuvent être estimés à l'aide des tables d'analyses, abaques et plaquettes. Cependant, les valeurs sont générales et ne tiennent pas compte des particularités de l'exploitation et de la parcelle.

Ici aussi le facteur climatologique est prépondérant car la minéralisation ne s'opère que pour des températures supérieures à 5 °C.

Une amélioration de la détermination du stock d'azote contenu dans le sol peut être apportée par des prélèvements de terre et dosages. L'analyse peut s'effectuer, soit au laboratoire (Institut National de la Recherche Agronomique - I.N.R.A.- par exemple), soit sur

le terrain avec un appareillage dit "du bout du champ". L'aspect financier peut être un frein à la généralisation de ce remède.

Les résultats obtenus sont à utiliser avec précaution, il convient de réaliser un nombre élevé de sondages car:

- le coefficient de variation des répartitions des nitrates dans le sol est important;
- l'incertitude sur la moyenne de la teneur en azote varie en fonction du nombre de sondages effectués.

Ces notions montrent l'hétérogénéité de la répartition de l'azote dans le sol d'une parcelle. Cela s'explique par le caractère négligeable de la diffusion latérale, cette dernière induirait une certaine égalité des concentrations en nitrates au niveau d'une petite surface. Cette variabilité provient des techniques d'épandage et de l'action différentielle de la population bactérienne.

Un autre problème est à considérer, il concerne l'incohérence entre le résultat brut de l'analyse (le $\mu\text{g/l}$) et l'unité de fertilisation (le kg/ha).

6.1.3. Apport fractionné d'azote

Cette technique, maintenant très répandue, donne le moyen de réduire les risques de pertes importantes d'azote par une répartition dans le temps des épandages d'engrais. Cela permet d'adapter l'apport et la disponibilité de l'azote aux besoins variables de la culture en phase de croissance.

En général, la fertilisation s'effectue en deux épandages (février et avril pour le blé d'hiver, mars et avril pour la betterave sucrière). Cependant, un passage supplémentaire d'engrais augmente le coût financier (carburant...) et accentue le damage en cas de sol sensible.

6.1.4. Utilisation des cultures dérobées

Le but est d'éviter le lessivage dans le cas où le sol doit rester nu en périodes automnales et hivernales. Ces cultures sont destinées à l'alimentation du bétail ou à l'unique fonction d'engrais verts.

Dans le premier cas, l'intérêt est limité suite à la politique des quotas laitiers. Dans le second, cette technique permet également de reconstituer le taux de matière organique du sol.

Cette pratique nécessite l'épandage d'engrais (jusqu'à $300 \text{ kg d'azote/ha/an}$). Il convient donc de prendre en compte les points précédemment évoqués (besoin exact de la culture,

reliquat disponible dans le sol, apport fractionné) pour éviter que le remède soit pire que le mal qu'il veut combattre. Cet apport de fertilisant et les passages d'engins agricoles représentent un coût que l'exploitant doit rentabiliser.

6.1.5. Remèdes contre le ruissellement

L'aspect particulier de l'étude concernant le bassin versant du champ captant d'Airon-Saint-Vaast (chapitre 3) réside dans l'ampleur du phénomène de ruissellement. Ce dernier peut être combattu par diverses mesures:

- l'utilisation des cultures dérobées;
- la suppression du compactage et du tassement des sols;
- le rétablissement d'un bon taux de matières organiques et de calcium dans les sols;
- l'orientation du parcellaire perpendiculairement à la pente;
- la mise en prairie permanente de fonds de vallons et autres zones très sensibles;
- le rétablissement des obstacles au ruissellement (haies, bandes enherbées, talus);
- la disposition des cultures à haut risque de ruissellement (betteraves, pommes de terre, maïs...) en damier à l'intérieur des cultures à moindre risque.

Bien évidemment, il s'agit de propositions théoriques dont l'application stricte relève de l'utopie. Cependant, elles représentent un but vers lequel il convient de se diriger.

Certaines solutions à l'image de l'orientation du parcellaire peuvent être mises en oeuvre par un "simple" remembrement.

D'autres, comme l'utilisation des cultures dérobées, nécessitent des études de rentabilité car l'aspect financier est prépondérant.

Que dire de la mise en prairie permanente des surfaces sensibles alors que la politique européenne des quotas laitiers va à l'encontre d'une partie de l'élevage.

6.1.6. Aspect économique

La contrainte financière a déjà été soulignée à plusieurs reprises.

Comme la plupart des actions au niveau de l'environnement, l'aspect financier est toujours l'élément moteur. L'azote qui ne participe pas à la croissance des cultures représente pour l'agriculture une perte qu'il devient de plus en plus nécessaire d'éviter suite:

- au renchérissement du prix des engrais artificiels;
- à l'augmentation des coûts de production;
- à la réduction des marges bénéficiaires.

Des décisions économiques à un niveau national, voire international, peuvent aller à l'encontre d'une diminution des pertes d'azote. A titre d'exemple, la politique européenne des quotas laitiers entraîne des retournements de pâtures, les conséquences sont alors diverses:

- une libération importante et durable d'azote suite à une diminution du taux d'humus, une prise en compte dans le calcul de la fertilisation est ici capitale;
- une disparition d'une surface toujours en herbe qui forme écran à l'infiltration des nitrates au profit d'une occupation du sol sujette au lessivage et parfois à la surproduction;
- un moindre épandage de résidus de l'élevage dont la quantification est toujours difficile. Cependant, sous la forme de fumier, cela peut apporter de la matière organique dont l'intérêt est bénéfique pour la structure du sol.

Un autre exemple, la politique de gel des terres (jachère) induit un lessivage important car l'azote produit par la minéralisation de l'humus n'est plus exporté par les cultures.

De nos jours, l'internationalisation des marchés est telle qu'une décision prise de l'autre côté de la planète peut avoir une incidence sur les cours locaux des produits agricoles. De plus, la protection de l'environnement n'est pas encore une priorité capable de remettre en cause la course à la production.

6.2. En milieu urbain

Dans le cadre de l'arrondissement de Cambrai, le chapitre 4 a permis d'apprécier la multitude de cheminements par lesquels les eaux usées gagnent la nappe. En outre, la part des effluents produits rejoignant les eaux souterraines y est estimée à 50 % (chapitre 5.).

Devant ce constat négatif, il convient d'aborder les remèdes dans l'ordre logique.

6.2.1. Desserte des logements par un réseau d'assainissement

La première opération consiste à poser des conduites dans l'ensemble des artères de la

zone urbaine. Il faut en même temps équiper chaque logement d'une ou de plusieurs boîtes de branchement permettant l'évacuation des eaux usées.

La réalisation de ces travaux est envisageable mais entraîne des investissements importants. Une décision politique volontaire peut être à l'origine d'un tel programme. C'est le cas du Conseil Général du Nord qui en fait une de ses priorités. Il est ainsi prévu que l'ensemble du département soit couvert d'ici la fin de la prochaine décennie.

Cet équipement n'est pas toujours possible dans les secteurs où les habitations sont situées à l'écart des zones urbaines, compte tenu des distances à parcourir et du faible débit à évacuer. Les techniques d'assainissement individuel comme l'épandage souterrain sont alors nécessaires. Le choix du système d'épuration est fonction de divers paramètres comme la perméabilité du terrain.

Il convient également de considérer le type de collecte le mieux adapté. Par exemple, pour un secteur humide, obligeant le captage de nombreuses sources, il est préférable de ne pas installer un réseau unitaire.

6.2.2. Raccordement des logements au réseau d'assainissement

Le chapitre 4. a montré que le taux de raccordement est loin d'atteindre ce que la desserte en réseau permet d'espérer.

Il est évident que tant que subsisteront des modes d'évacuation sans contrainte financière et n'occasionnant aucune gêne pour le particulier (par exemple les puits perdus), il sera difficile d'obtenir un taux de raccordement maximum.

Plusieurs moyens peuvent être préconisés:

- un contrôle rigoureux par un agent assermenté de chaque lieu d'évacuation d'eau usée (évier, lave-linge, toilettes...). Cela serait particulièrement utile dans le cas de réseaux anciens non équipés de boîtes de branchement. Ceci pourrait être accompagné d'une obligation de mise en conformité avec visite ultérieure;
- de manière plus "douce", la prise en charge totale des travaux à effectuer et ceci en liaison étroite avec la réalisation du réseau outre propriété. Actuellement, des aides au raccordement sont allouées ; pour le département du Nord, elles proviennent de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et du Conseil

Général, directement ou par l'intermédiaire d'associations de réhabilitation des logements. Or, suite au nombre restreint de sollicitations, l'offre doit être jugée insuffisante par les particuliers potentiellement bénéficiaires;

- la sensibilisation de l'opinion publique à l'aide de campagnes d'information par les média (spots télévisés...). En effet, parfois seule l'ignorance des effets engendrés est à l'origine du non raccordement au réseau;
- pour l'avenir, il est permis d'être optimiste, car avec le temps les logements anciens seront rénovés par des générations d'habitants plus jeunes, soucieuses de bien-être.

6.2.3. Entretien du réseau d'assainissement

L'utilité d'un réseau de collecte peut être fortement diminuée par l'existence de cassures, mauvaises réalisations...

Il est nécessaire qu'il y ait des inspections par passage de caméra et/ou des essais d'étanchéité. Ces contrôles sont déjà pratiqués lors de la réception des travaux ou en cas de soupçon sur le bon état d'une conduite mais doivent être étendus à l'ensemble du réseau et durant toute sa "vie". A cet égard, l'état de l'équipement actuel ne pourra que se dégrader à l'image de ce qui est constaté dans les centres-villes anciens à l'origine de rejets polluants importants.

6.2.4. Regroupement et traitement des eaux usées

Il ne suffit pas de recueillir les effluents, il convient de les traiter avant de les rejeter dans le milieu naturel.

En premier lieu, il faut les diriger vers un lieu de traitement.

Dans de nombreux cas, la topographie des zones urbaines nécessite la mise en place de stations de relèvement internes afin de regrouper les eaux usées en un seul lieu.

En général, les unités de traitement concernent plusieurs communes, les effluents des zones éloignées sont alors refoulés par d'autres stations de relèvement et parcourent des distances pouvant atteindre plusieurs kilomètres dans des Ouvrages de Transport des Eaux Usées (O.T.E.U.).

L'équipement cité ci-dessus nécessite un coût d'investissement, d'entretien et d'exploitation important. Il faut en particulier surveiller les déversoirs d'orages (seuil trop bas, colmatage...).

En second lieu, il convient d'épurer les effluents recueillis; les stations actuelles ne sont pas conçues pour éliminer l'azote. Une partie de celui-ci (20 %) est toutefois utilisée par les boues activées. Avec les stations dont la charge hydraulique est proche de 100 %, il est encore possible d'obtenir un coefficient d'abattement de l'ordre de 40 % pour l'azote.

Pour améliorer ce pourcentage, il est envisageable de surdimensionner les unités classiques. Cet état existe lorsqu'une station, récemment mise en activité, est encore sous chargée. L'azote éliminé peut alors atteindre les deux tiers du total admis à l'entrée de l'ouvrage mais il ne s'agit que d'une période transitoire. Avec le temps, les raccordements au réseau s'intensifient et la charge en azote devient normale au regard d'un dimensionnement classique.

Les unités permettant un traitement satisfaisant nécessitent:

- une masse de boues activées 5 fois plus importante que celle utile pour éliminer la seule pollution carbonnée (base du dimensionnement des stations classiques), ceci induit la multiplication par le même facteur du volume des bassins;
- des zones dépourvues d'oxygène (anoxiques);
- une alimentation étagée des effluents (50 % dans la première zone anoxique, 35 % dans la seconde et 15 % dans la troisième).

6.2.5. Lieu de rejet dans le milieu naturel

Dans le cas où l'élimination de l'azote est réalisée, le lieu de rejet importe peu ; cette affirmation ne concerne que l'azote car d'autres polluants (cf. certains toxiques) peuvent transiter par la station sans être épurés. Dans l'hypothèse inverse, les solutions proposées permettent de préserver la qualité des eaux souterraines mais cela ne s'opère qu'au dépend des eaux superficielles. Il s'agit :

- d'étanchéfier les cours d'eaux qui alimentent la nappe où, de façon plus réaliste, de transporter les eaux épurées jusqu'au niveau où la rivière devient drainante ;
- d'implanter les futures stations dans des secteurs où les cours d'eau drainent la nappe. Cela nécessitera d'importants linéaires d'O.T.E.U.

6.3. Conclusion

La lutte contre la pollution nitrée s'avère donc particulièrement délicate à mener.

En agriculture, la confrontation avec les éléments naturels rendra probablement toujours difficile d'adéquation parfaite entre les besoins des cultures et les fournitures d'azote. De plus, l'agriculture pratiquée actuellement n'est pas compatible avec la protection des nappes phréatiques.

Les pertes d'azote induites par l'évacuation des eaux usées peuvent être considérablement diminuées, voire totalement éliminées. Si techniquement l'obtention d'un tel résultat est envisageable, cela nécessitera néanmoins d'importants moyens financiers, du temps et/ou peut être un contrôle des installations de rejet de la population. Les effets escomptés seront développés dans le dernier chapitre de ce document.

7 . APPORT DE LA TELEDETECTION

La télédétection est ici considérée comme outil d'aide à l'implantation de captages pour l'alimentation en eau potable. Une nouvelle réalisation peut être motivée par:

- le remplacement d'un ouvrage dont l'eau polluée (du fait des nitrates par exemple) ne répond plus aux normes relatives à la distribution publique. Il faut également qu'il ne soit pas envisageable de mettre en oeuvre un remède (cause de pollution non déterminée, coût excessif, effet à trop long terme) ou de proposer une interconnexion de réseau;
- la nécessité de renforcer la distribution.

La télédétection est principalement utilisée dans le but de déterminer des structures linéamentaires. Celles-ci peuvent être la manifestation de zones fracturées qui permettent l'obtention de meilleurs débits suite à une circulation facilitée des eaux.

7.1. Revue bibliographique

Dès 1829, date de la découverte de la photographie, les topographes s'intéressent au procédé. Dix années plus tard, Niepce et Daguerre mettent au point la technique de la photographie aérienne. Cette dernière est réalisée pour la première fois en 1844 par G.-F. Tournachon, le vecteur est alors le ballon actif.

A. Laussedat effectue un levé phototopographique en 1861, la première photographie prise d'avion aura lieu 48 ans plus tard par Wright. En 1936 se déroule les premières applications géologiques (recherche pétrolière).

L'ère de la photographie spatiale débute en 1959, l'année suivante voit le passage de la photo-interprétation à la télédétection. Se succèdent alors satellite à mission bien définie (militaire, météorologique...) et prises de vue à partir d'engins habités.

En 1972, rentre en service le premier satellite destiné à l'observation de la Terre : E.R.T.S. A, Earth Resources Technology Satellite, rebaptisé Landsat 1.

(D'après Paul S., 1973 - Foin P., 1982 - Scanvic J.-Y., 1983 et Simon N., 1987).

C'est donc depuis moins de 20 ans qu'a commencé l'essor de la télédétection spatiale.

Au début des années 1970, n'étaient opérationnelles en France que les émulsions panchromatiques, infrarouge (I.R.) noir et blanc, couleur, I.R. couleur et les enregistrements I.R. thermiques (thermographies). L'intérêt géologique porte principalement sur les critères indirects (géobotanique...). Des expériences sont alors en cours sur les scanners multispectraux, radars... (Weecksteen G., 1973).

Les domaines d'application sont multiples, trois d'entr'eux seront successivement analysés dans les lignes qui suivent. Chacun faisant par la suite l'objet d'un développement personnel.

7.1.1. Application à la recherche d'eau

L'une des premières approches a porté sur la constitution de logiciels informatiques concernant le traitement d'images issues de détecteurs multispectraux. La prospection était alors axée sur l'occupation du sol et, en particulier les zones de drainance (Cairo L. et al., 1976).

La télédétection apporte ensuite une contribution non négligeable à la recherche d'eau en milieu crayeux. Des alignements contrôlés par des failles sont mis en évidence par une cartographie du réseau hydrographique et des vallées sèches à partir des photographies aériennes. Les images satellitaires permettent la détermination de discontinuités majeures qui correspondent fréquemment à des passages de failles. Cette complémentarité des observations a été remarquée en Haute Normandie (Scanvic J.-Y. et Weecksteen G., 1978).

La méthode des "équidensités colorées" permet, à partir d'un cliché noir et blanc de Landsat 1, la multiplication des couleurs à la place des cinq intensités de gris discernables par l'oeil. Plusieurs linéaments superficiels inconnus sont ainsi fixés dans le Nord de la France (Laumondais A. et al., 1983).

L'intérêt est encore plus perceptible en zone aride du fait de l'affranchissement des contraintes liées à la biosphère (quasi absence de sol, végétation et influences humaines). A partir d'une scène de Landsat 4, en mode multispectral, l'eau est mise en évidence lorsqu'elle est en inhibition dans les formations poreuses. En aucun cas, il n'est perçu un indice d'eau sous la surface du sol ; seul le croisement des informations radiométriques avec les résultats d'une analyse géomorphologique permet de raisonner en terme d'hydrogéologie (Georges M. et al., 1983).

Sous un climat océanique et en zone de socle, l'étude des données issues de S.P.O.T. permet d'orienter une campagne de forages à l'aide de critères de potentialités aquifères portant sur:

- les paquets de linéaments révélés par une étude géostatistique;
- l'orientation relative de ces linéaments par rapport à la contrainte régionale principale la plus récente.

Les techniques de réhaussement d'image par filtrage directionnel ne sont pas intéressantes car les discontinuités mises en évidence correspondent au parcellaire et créent un bruit de fond important préjudiciable à l'interprétation géologique (Castaing C. et al., 1987). C'est pour cette raison que la méthode utilisée dans ce chapitre ne sera basée que sur des observations visuelles.

A l'issue de plusieurs études linéamentaires réalisées dans le Nord-Ouest de la région Nord - Pas-de-Calais sur des clichés Landsat 1 - 2 et S.P.O.T. se dégagent plusieurs conclusions:

- de fortes convergences malgré près d'une décennie d'écart, cela prouve la pérennité des objets observés. A ce jour, la validité géologique n'est faite que très ponctuellement (Dutartre P. et King C., 1987);
- une confirmation des informations recueillies avec d'autres outils tels que gravimétrie, cartographie géologique... (Ricour J. et Dutartre P., 1988).

7.1.2. Occupation du sol

La répétitivité des prises de vue autorise la réalisation d'études diachroniques qui montrent:

- l'aspect permanent de certaines régions dû à la prédominance des caractéristiques de pierrosité;
- à contrario, l'aspect variant de secteurs qui reflètent principalement la végétation (Dutartre P. et al., 1983).

Le système Thematic Mapper de Landsat 4 et 5 permet de disposer de bandes spectrales supplémentaires. Leur complémentarité et les fréquences de moyen infrarouge se révèlent intéressants en région de grande culture. Cependant, une réponse spectrale traduit à la fois l'aspect "normal" d'un couvert végétal et le caractère indicateur des conditions géologiques et pédologiques (King C. et al., 1986 - King C., 1986).

Les données S.P.O.T. alliées à des différences radiométriques mesurées au sol autorisent une cartographie rapide des sols nus battant. Cependant, toute généralisation nécessite de la prudence du fait de la variabilité des conditions climatologiques (Aumonier F., 1987).

Sur la façade maritime, les clichés S.P.O.T. montrent l'utilité différentielle des 3 capteurs pour l'étude des superficies aqueuses, l'examen du domaine intertidal et de la zone infratidale (Simon N., 1987) ainsi que la végétation en milieu dunaire (King C., 1988).

Le système S.P.O.T. est intéressant pour la localisation des points d'eau en zone marécageuse. Cependant, la résolution spatiale et les imprécisions dues aux franges d'eau en végétation ne permettent pas une délimitation exacte des rives. Les eaux de forte turbidité sont par contre facilement repérables (cf. Guines - Pas de Calais) (B.R.G.M., 1988 a).

Pour l'étude des décharges, la taille réduite des sites pose problème malgré l'amélioration sensible de la résolution apportée par S.P.O.T. ; de plus, les déchets ne semblent pas avoir une réponse spectrale spécifique (B.R.G.M., 1988 b).

7.1.3. Hydromorphisme des sols

Des travaux américains ont montré la relation existant entre l'émittance du sol en hyperfréquence et sa teneur en eau. Dans le même ordre d'idée, il semble envisageable d'évaluer l'évapotranspiration (Bossard R. et Vuillaume Y., 1975).

En conclusion, l'outil de télédétection devient de plus en plus performant. Cependant, il requiert toujours une phase de terrain pour l'étalonnage et, dans bien des cas, une coordination interdisciplinaire afin d'aboutir à une exploitation optimale (Ricour J., 1989).

7.2. Historique du choix des sites d'implantation des ouvrages d'alimentation en eau potable

Il est possible de distinguer trois étapes.

7.2.1. Sur les plateaux

De la fin du XIXème siècle au milieu du XXème siècle, la préoccupation était de remplacer les puits particuliers. Pour des raisons économiques (conduite de refoulement de faible longueur), les ouvrages étaient généralement réalisés à côté ou sous les châteaux d'eau. Les réservoirs se trouvant le plus souvent sur les plateaux (points hauts permettant la desserte

optimale), les captages étaient donc implantés là où l'aquifère est peu fracturé. Les débits étaient cependant suffisants pour l'époque (besoins restreints).

7.2.2. Dans les vallées

Avec l'augmentation de la consommation, certains de ces captages ne pouvaient subvenir aux nouveaux besoins. La tendance observée à partir du milieu du XX^{ème} siècle fut de placer les ouvrages dans les secteurs où la craie est davantage fracturée. Il s'agit des axes de vallons et vallées où l'infiltration des eaux météoriques a facilité la dissolution d'un aquifère souvent fragilisé tectoniquement. Mais ces zones, se trouvant, par nature, dans les points topographiquement bas, reçoivent préférentiellement les pollutions émanant des localités. Le volume des eaux usées rejetées, croissant avec celui des eaux distribuées, ces captages qui permettent généralement l'obtention de bons débits, voient la qualité de leur eau de plus en plus dégradée.

7.2.3. Compromis entre l'implantation sur les plateaux et en vallée

Actuellement, l'hydrogéologue se trouve donc devant un dilemme : trouver une ressource abondante et de bonne qualité (bactériologique et physico-chimique). Cette nécessité suppose de mieux connaître la fracturation de l'aquifère, les rejets et l'infiltration des effluents, etc.

Ainsi, dans certains cas, il est encore possible d'implanter un captage dans une vallée. Dans d'autres situations, cela n'est pas envisageable et il convient alors de rechercher des lieux à l'écart. Ses sites se trouvent donc plutôt dans des secteurs de flancs de vallons ou vallées, voire de plateaux suffisamment fracturés pour permettre une bonne circulation des eaux souterraines. C'est dans cet impératif que s'inscrit ce chapitre.

7.3. But de l'étude

Il est donc essentiel de bien définir les orientations principales de la fracturation ainsi que de situer les linéaments de façon précise afin de faciliter leur localisation sur le terrain.

En outre, le positionnement des sources de pollution et l'évolution ou la mesure de la perméabilité des sols doivent permettre de mieux implanter les ouvrages d'alimentation en eau potable.

Dans les buts présentés ci-dessus sont examinées les données issues de l'analyse des clichés satellitaires provenant des vecteurs Spacelab. et S.P.O.T.

La démarche conduit à distinguer deux types d'informations:

- recenser les principaux linéaments interprétables en terme de discontinuités du sous-sol. Les comparer avec les éléments déjà connus, issus des cartes géologiques, tectoniques et de l'exploitation des données Landsat;
- déterminer rapidement l'occupation et la perméabilité du sol. Complété par la connaissance des écoulements souterrains, cela permettra de proposer une localisation heureuse des futurs captages.

7.4. Satellites et leurs informations

7.4.1. Spacelab

D'après Ducher G., 1982 - E.S.A. /A.S.E., 1984 - I.G.N., 1982 à 1985 - I.G.N., 1985.

a) Le vecteur

Le système de prise de vue est embarqué à bord du laboratoire européen Spacelab, lui-même logé dans la soute de la navette américaine Columbia (6ème vol., 9ème de ce type d'engin spatial).

Pour cette mission qui s'est déroulée du 28-11 au 9-12-1983, l'altitude de vol était de 250 km avec une orbite circulaire inclinée de 57°.

b) Le cliché

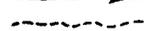
Le cliché référencé 01 - 277 - 07 (1ère mission du laboratoire, 277ème photo de la 7ème trace) provient de l'une des 72 expériences réalisées à bord.

La photo est issue de l'utilisation d'une chambre photogrammétrique dérivée d'un appareil de prise de vues aériennes modèle Zeiss RMK A 30/23 équipé d'un objectif Zeiss Topar A de 305 mm de focale permettant des visées stéréoscopiques et une résolution de 20 m. Le film employé lors du survol de la région Nord-Pas de Calais est le Kodak-aérochrome infrarouge (jusqu'à 0,9 μm) couleur 2.443. La prise de vue date du 02-12-1983 à 11 h 06 G.M.T. et concerne un quadrilatère (figure 15) centré 3 km à l'est de Carvin (F, Pas de Calais) dont les sommets sont respectivement:

- l'île de Walcheren (NL) au nord (51° 31' N, 3° 28' E);

Figure 15 : CARTE DE LOCALISATION
DES PRISES DE VUE DE
SPACELAB.

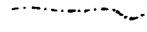
Escaut



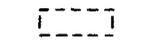
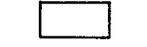
Fleuve



Limite d'état



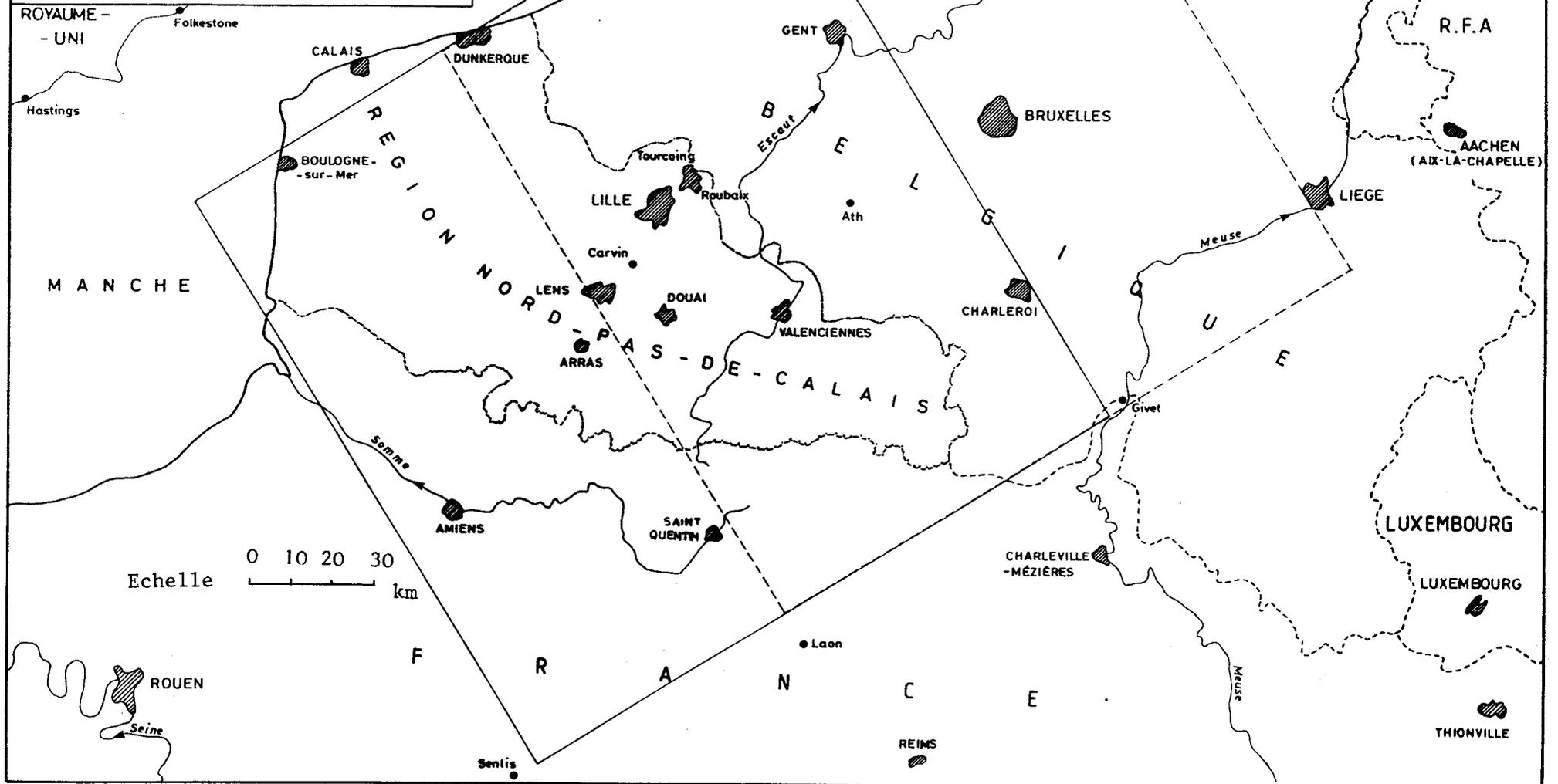
Limite de la région
Nord - Pas-de-Calais



Ville principale

Emprise du cliché 277

Emprise du cliché 278



- l'appendice de Givet (F, Ardennes) à l'est (50° 07' N, 4° 48' E);
- les environs de Senlis (F, Oise) au sud (49° 08' N, 2° 34' E);
- la Manche, au large de Boulogne sur Mer (F, Pas de Calais) à l'ouest (50° 32' N, 1° 14' E).

Le document original se présente sous la forme d'un film de 232 mm de côté représentant 190 km à l'échelle de 1/820 000. L'analyse porte également sur des tirages photographiques à 1/500 000 et 1/100 000. Une étude effectuée sur l'emprise totale du cliché (Préaux C., 1984) et une autre concernant l'arrondissement de Cambrai (Préaux C., 1985) ont été réalisées pour l'Institut Géographique National (I.G.N.), investigateur du projet Spacelab auprès de l'Agence Spatiale Européenne (A.S.E.).

7.4.2. S.P.O.T.

a) Le vecteur

D'après documentation S.P.O.T. Image, 1983 à 1987.

S.P.O.T. est un satellite automatique dont le but spécifique est l'observation de la Terre à l'image de la signification de son sigle "Satellite Probatoire d'Observation de la Terre".

Lancé le 22-02-1986, l'orbite de vol de S.P.O.T. 1 à 832 km d'altitude est circulaire, héliosynchrone et quasi-polaire (angle d'inclinaison de 98,7°).

Le cycle orbital de S.P.O.T. est de 26 jours donc phasé par rapport à la Terre. La distance entre deux traces adjacentes (108 km au maximum) est inférieure au champ total des deux instruments (de type H.R.V. - Haute Résolution Visible -, 6 912 photodiodes) couplés en visée verticale (117 km). De plus, un miroir oscillant placé en avant du télescope permet un pointage oblique de $\pm 27^\circ$ à l'est comme à l'ouest de la verticale, ce qui autorise une observation dans un couloir de 950 km centré sur la trace du satellite.

Ces caractéristiques permettent:

- la répétitivité des passages dans des conditions identiques;
- l'observation d'un maximum de surface terrestre;
- l'obtention de couples stéréoscopiques.

b) Le cliché

1) Généralités

Le champ d'observation varie de 60 km en visée verticale à 85 km avec un dépointage maximum.

Deux modes d'acquisition sont employés:

- panchromatique (noir et blanc) avec une résolution de 10 m et une seule large bande spectrale (0,51 à 0,73 μm);
- multispectral avec une résolution de 20 m et trois bandes spectrales:
 - . XS1 (jaune vert, 0,50 à 0,59 μm);
 - . XS2 (orange rouge, 0,61 à 0,68 μm);
 - . XS3 (proche infra-rouge, 0,79 à 0,89 μm).

Différents produits sont disponibles selon leur niveau de précision:

- 1A avec les corrections radiométriques;
- 1B idem avec, en plus, les modifications géométriques;
- 2 permettant une superposition à une carte;
- S autorisant une superposition à une scène de référence.

Les données sont fournies sur bande magnétique ou support photographique à des échelles variant de 1/400 000 à 1/50 000.

2) Scène analysée

Le cliché désiré n'étant pas disponible auprès de la Société S.P.O.T. Image, cette dernière a programmé le satellite à partir des critères demandés. Les caractéristiques ont été définies afin de répondre aux objectifs fixés et concernent:

- la nébulosité inférieure à 10 %;
- l'angle de visée quelconque;
- le mode multispectral afin de bénéficier de l'intérêt de l'infrarouge dans le domaine hydraulique;
- le prétraitement de niveau 2 pour permettre une superposition à la projection conique de Lambert (zone 1);
- l'agrandissement au 1/100 000 dans le but de faciliter le repérage des linéaments;
- le support papier destiné à l'analyse visuelle.

Le cliché est référencé sous le n° K 041 - J 248 - 321 (41ème colonne d'ouest en est et 248ème ligne du nord au sud).

La prise de vue date du 01-02-1987 à 10 h 41 G.M.T. avec une visée latérale de 20° 17', elle concerne un quadrilatère (figure 16) centré sur Valenciennes (F, Nord) dont les sommets sont respectivement les environs de:

- Lille (F, Nord) au nord-ouest (50° 41' N, 3° 05' E);
- Soignies (B) au nord-est (50° 34' N, 4° 02' E);
- Avesnes sur Helpe (F, Nord) au sud-est (50° 03' N, 3° 52' E);
- Bapaume (F, Pas de Calais) au sud-ouest (50° 10' N, 2° 55' E).

Le document de base est un film d'une dimension de 174 x 150 mm correspondant à une scène de 70 x 60 km à l'échelle du 1/400 000.

L'analyse qui suit concerne, pour l'ensemble des données traitées (cartes et clichés) la zone délimitée ci-dessus.

7.5. Linéaments et discontinuités du sous-sol

7.5.1. Elimination des éléments parasites

Il s'agit d'une détermination visuelle pluridirectionnelle d'ensemble puis secteur par secteur.

Les éléments parasites tels que routes, voies de chemin de fer, canaux... sont repérés par l'emploi d'une carte routière transparente de même échelle (I.G.N., 1982 - I.G.N., 1983 - I.G.N., 1986) et peuvent ainsi être éliminés. Dans la même optique, sont également utilisées des photographies aériennes à plus grande échelle (1/25 000) (I.G.N., 1957 b - I.G.N., 1971) ainsi que des documents comportant d'anciennes voies de communication (romaines, ferrées, chemins avant remembrement...), des gazoducs, oléoducs... (Coudoux J. et Leman P., 1985 - I.G.N., 1954 - I.G.N., 1955 - I.G.N., 1957 a). Fort de ces précautions, il est possible d'admettre que les linéaments retenus correspondent à des éléments naturels qui se manifestent sous deux aspects différents:

- diffus, large (500 m) et de taille unitaire importante (20, voire 50 km);
- plus réduit autant en ce qui concerne l'épaisseur que la longueur de la trace.

7.5.2. Comparaison des nouveaux résultats entr'eux et avec les données existantes

a) Analyse d'un point de vue qualitatif

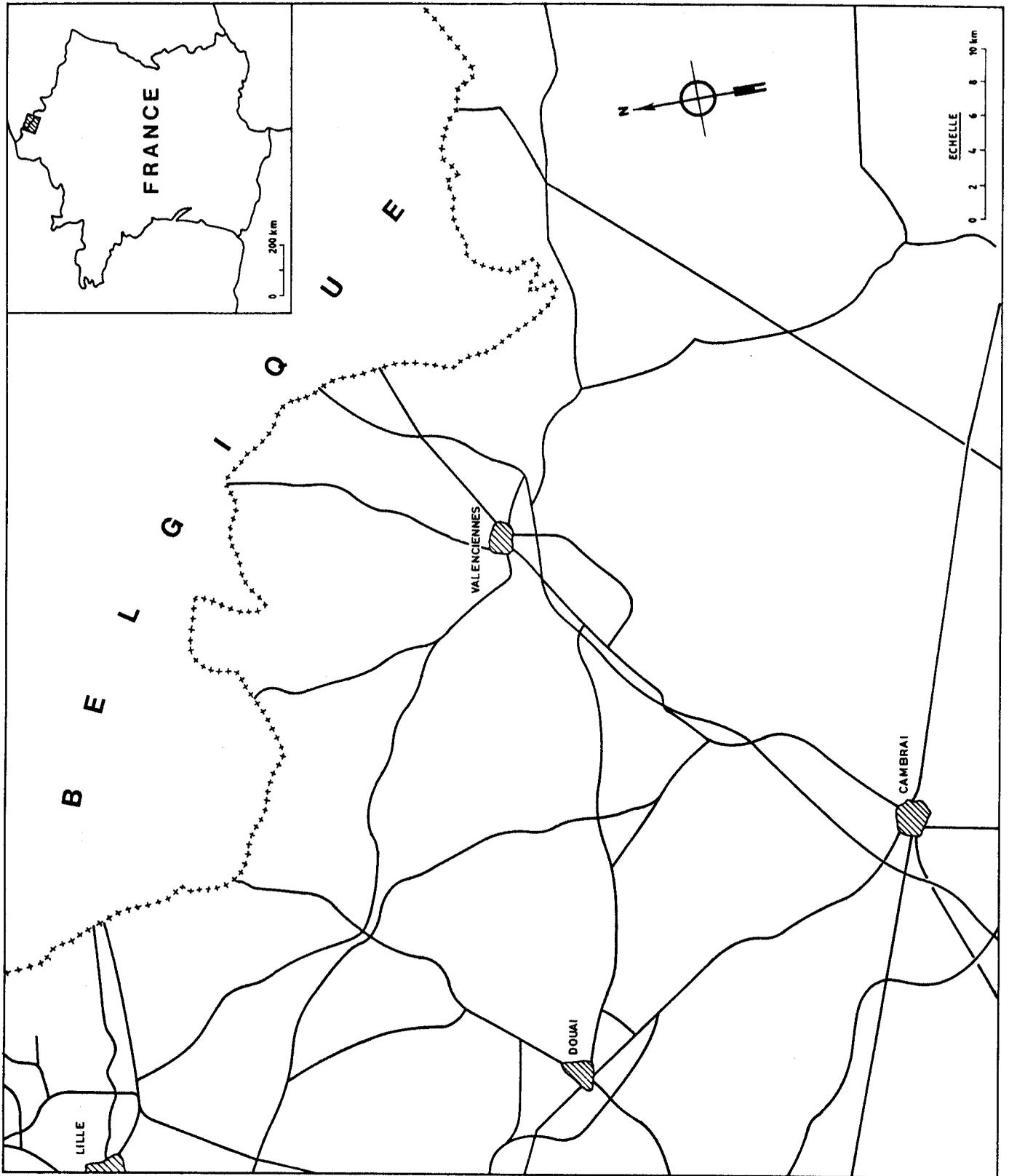


Figure 16 :

EMPRISE DE LA SCENE

S.P.O.T. ANALYSEE (41/248)

..... Limite d'état

DOUAI

Chef lieu
d'arrondissement— Autoroute et route
principale

1) Données utilisées

Il s'agit de superposer les cartes de linéaments proposées à un document réalisé dans le cadre de cette étude et regroupant l'ensemble des discontinuités principales recensées dans le périmètre d'étude et reportées* à la même échelle (figure 17).

Seuls les éléments linéaires ont été reportés ainsi que les grandes failles "ondulées" du bassin minier (Brikke Y. et al., 1965 - Desoignies J., 1965, 1967 et 1973 - Delattre C. et al., 1967 - Celet P. et al., 1968 - Sangnier P. et al., 1968 - Desoignies J. et Sangnier P., 1968 - Waterlot G. et al., 1969 - Waterlot B., 1971 - Caulier P., 1974 - Chiron J.-C. et al., 1980 - Vogt J. et al., 1981).

Afin de compléter la comparaison, sont également pris en compte les travaux de C. Cazabat et son équipe de l'I.G.N. (1977) à partir de nombreux enregistrements de Landsat 1 et 2** réalisés entre 1972 et 1977. Cette analyse a abouti à une cartographie des linéaments sur l'ensemble du territoire français. Les éléments relatifs à la zone d'étude sont présentés sur la figure 18. Les principales caractéristiques des clichés Landsat sont les suivantes:

- les instruments embarqués, caméras et système optique à balayage, concernent 7 bandes spectrales comprises entre 0,475 et 1,1 μm ;
- la zone observée est un carré de 185 km de côté, la résolution spatiale est de 60 à 80 m, avec une échelle variant de 1/3 300 000 à 1/100 000.

2) Résultats

Dans les trois cas, il existe peu de similitude entre les éléments recensés à partir des données spatiales, figure 19 pour Spacelab et figure 20 pour S.P.O.T., et ceux déterminés à l'issue des travaux au sol.

La comparaison deux à deux des cartes de linéaments obtenus lors de l'étude des clichés issus des différents vecteurs procure également peu de similitudes.

* Une quarantaine de discontinuités issues de documents confidentiels ne sont pas figurés.

** Caractéristiques des vecteurs:

il s'agit également de satellites automatiques conçus pour l'observation de la Terre. L'orbite de vol est de l'ordre de 912 km; circulaire et héliosynchrone elle est inclinée de 99°. Le cycle orbital est de 18 jours.

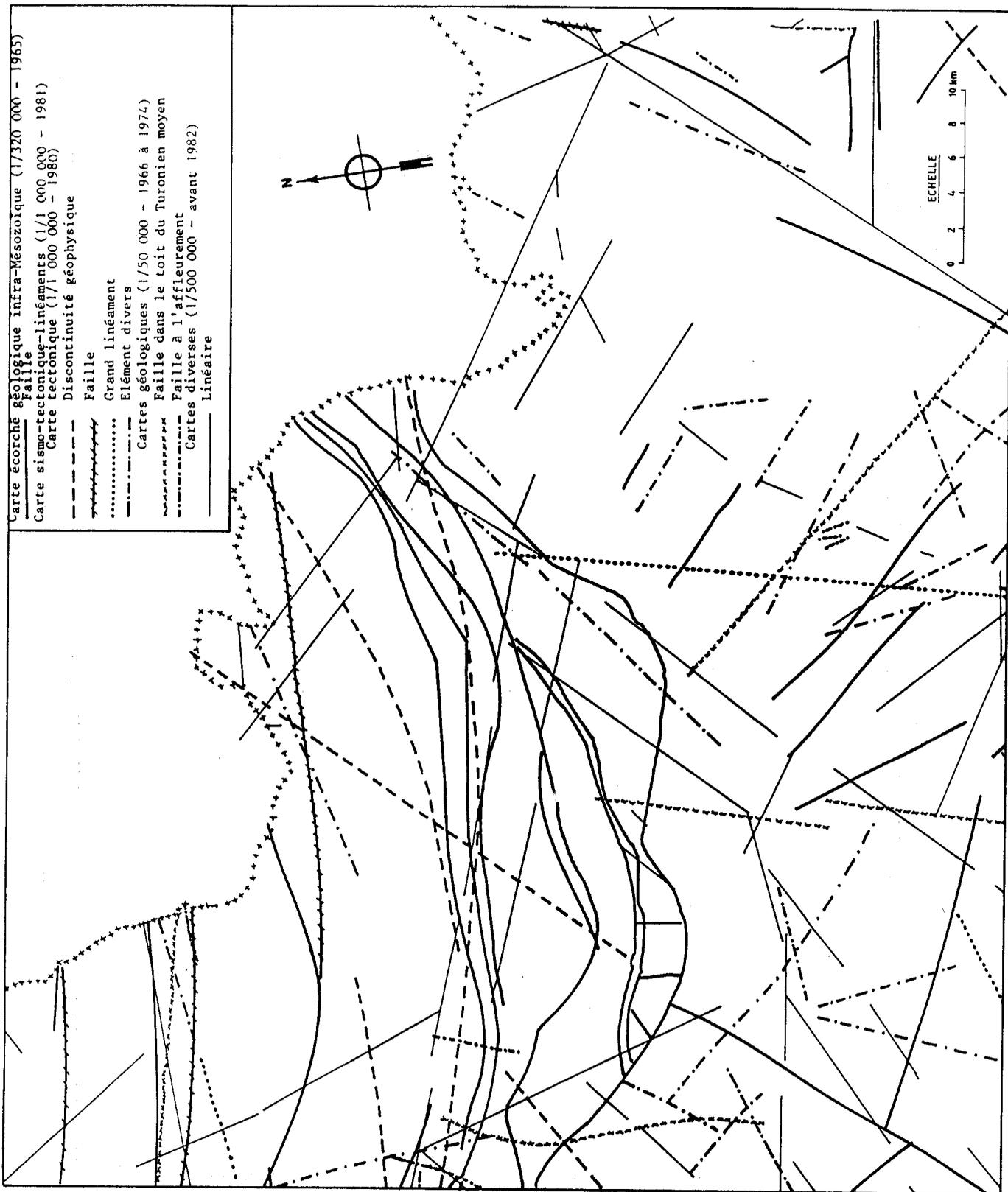
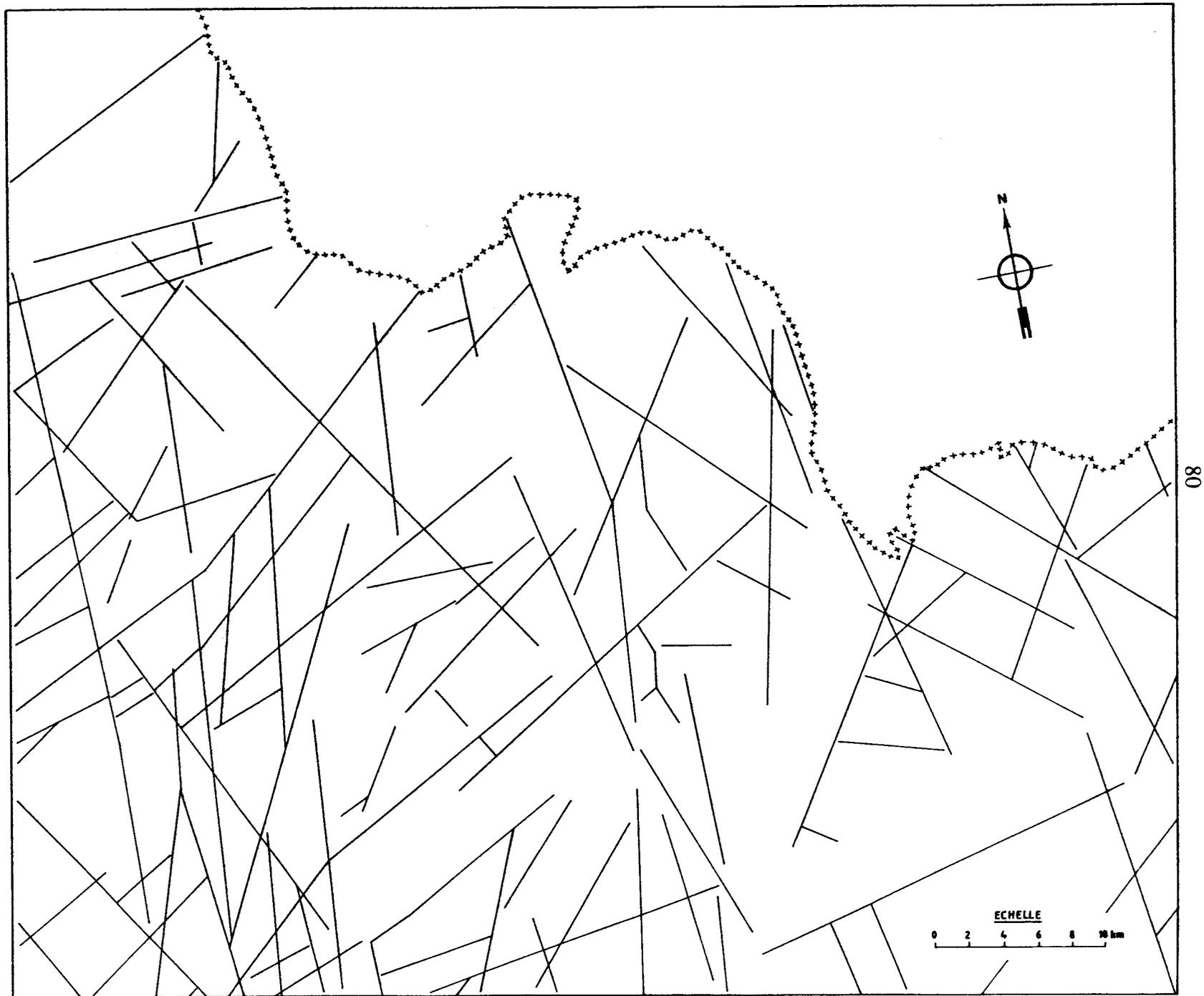


Figure 17 :

DISCONTINUITES

(SUB)LINEAIRES CONNUES.

Figure 18 :
LINEAMENTS ISSUS DE
L'ANALYSE DES DONNEES
LANDSAT 1 ET 2
(1972 à 1977).



(A partir des travaux
de CAZABAT C. et al.)

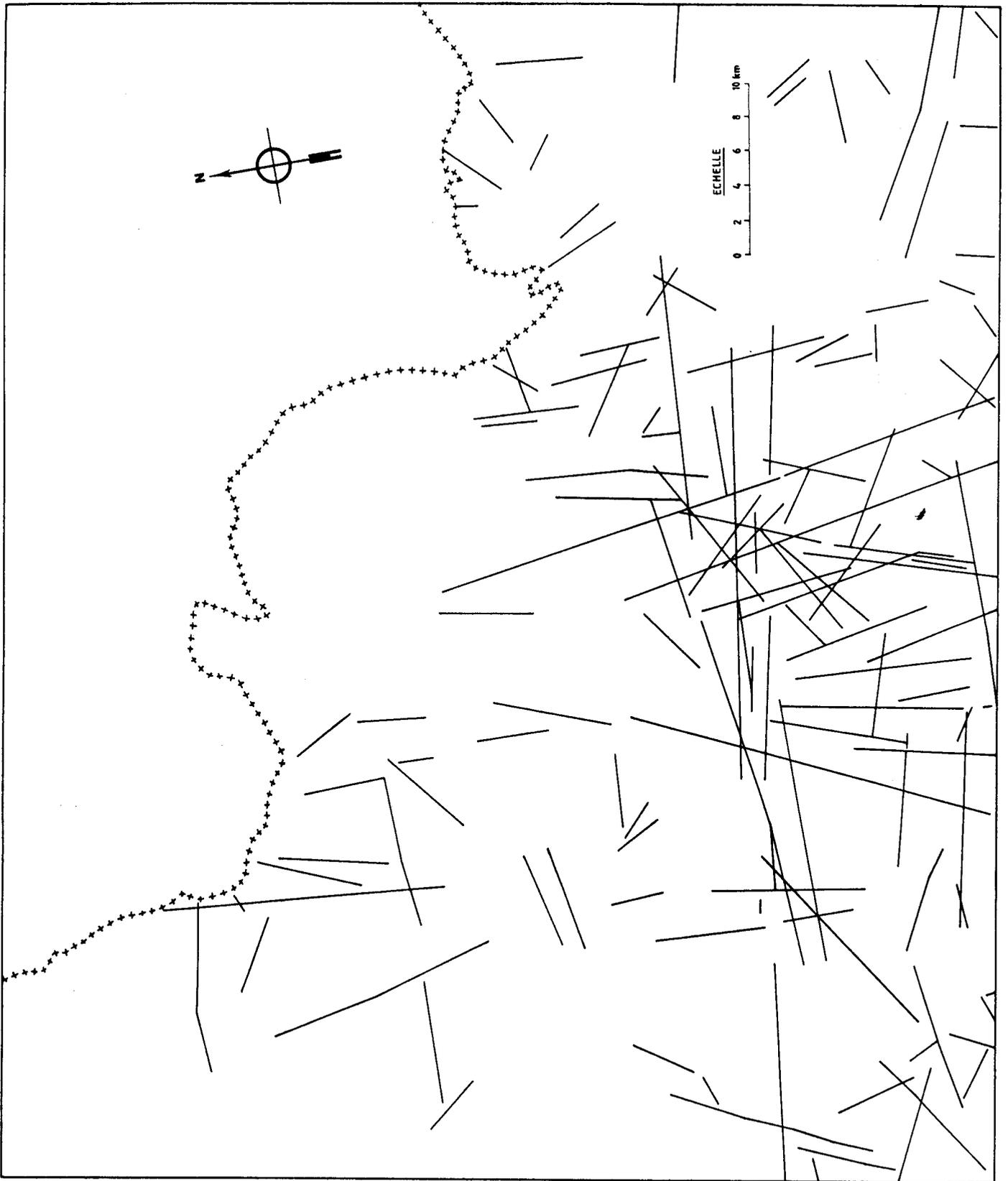


Figure 19 :
LINEAMENTS ISSUS DE
L'ANALYSE DES DONNEES
SPACELAB 1 (1983).



Figure 20 :
LINEAMENTS ISSUS DE
L'ANALYSE DES DONNEES
S.P.O.T. 1 (1987).

3) Interprétation

Les linéaments mis en évidence par télédétection spatiale dans la bande de fréquences comprise entre 0,475 et 1,1 μm ne rendent pas compte des structures connues en profondeur, cela peut s'expliquer par la géologie générale du secteur.

Au-dessus des terrains du Primaire dont les discontinuités sont figurées sur la figure 17 se superposent les formations:

- sableuses et argileuses de l'Albien (au sud);
- marneuses et crayeuses du Cénomaniens au Sénonien. La principale nappe d'eau souterraine utilisée pour l'alimentation du Nord-Pas de Calais est localisée dans les terrains du Turonien supérieur (voire moyen) et du Sénonien, il est à noter la disparition progressive de ces terrains à l'est d'une ligne Bavay - Catillon sur Sambre;
- argileuses et sableuses du Landénien essentiellement localisées dans le bassin d'Orchies;
- limoneuses et alluviales du Quaternaire sur l'ensemble du territoire.

L'ensemble de ce recouvrement peut parfois atteindre 100 m d'épaisseur. Dans de nombreux cas, il existe un décalage de plusieurs centaines de mètres entre les structures déterminées en profondeur (par sondages, géophysique...) et les linéaments mis en évidence en surface (par télédétection). Cela peut s'expliquer par:

- la difficulté de la localisation précise d'éléments souvent diffus;
- le fait que les accidents anciens ont souvent rejoué par la suite et peuvent, par la compétence différentielle des terrains, se manifester avec un certain décalage.

b) Analyse d'un point de vue quantitatif

Les linéaments déterminés sont maintenant traités suivant leur orientation et ceci de 5° en 5°.

1) En fonction du nombre d'éléments (figure 21)

L'étude de la carte regroupant l'ensemble des structures (sub) linéaires connues montre 20 % des linéaments situés entre N 90° E et N 105° E.

En ce qui concerne les données de Landsat, trois directions principales se détachent:

- N 5° E - N 10° E (6 % du total);
- N 45° E - N 50° E / N 55° E - N 65° E (20 % du total);

- N 170° E - N 175° E (6 % du total).

Pour celles de Spacelab, deux orientations proches du N - S se remarquent:

- N 10° E - N 15° E (7 % du total);

- N 175° E - N 180° E (7 % du total).

Pour celles de S.P.O.T., quatre directions se distinguent:

- N 0° E - N 10° E (20 % du total);

- N 35° E - N 45° E (12 % du total);

- N 60° E - N 65° E (8 % du total);

- N 160° E - N 165° E (6 % du total).

Il ressort de cette analyse que l'orientation majeure N 90° E - N 105° E déterminée d'après les documents existants ne se marque en aucun cas. Par contre, deux grandes directions d'amplitude importante (35° à 40°) sont communes aux éléments issus des vecteurs spatiaux:

- N 160° E - N 15° E avec N 165° E - N 170° E plus faiblement marquée;

- N 35° E - N 65° E avec N 50° E - N 55° E jamais soulignée.

2) En fonction de la longueur cumulée (figure 22)

Le type d'information obtenu par l'étude ci-dessus est incomplet car la pondération d'un linéament de 2 ou 30 km est identique. C'est pour cette raison que l'analyse porte maintenant sur la longueur cumulée pour chaque classe de direction.

Trois orientations préférentielles se dégagent en ce qui concerne la carte des structures connues:

- N 40° E - N 50° E (13 % du total);

- N 65° E - N 70° E (6 % du total);

- N 90° E - N 100° E (12 % du total).

L'examen des données fournies par les engins spatiaux donnent sensiblement les mêmes résultats que pour l'étude du dénombrement, hormis la direction N 30° E - N 35° E qui apparaît dans le cas de Landsat et celle de N 90° E - N 95° E dans celui de Spacelab.

Il résulte de ces observations que la direction :

- N 40° E - N 50° E est marquée sur les données issues des vecteur Landsat et S.P.O.T.;

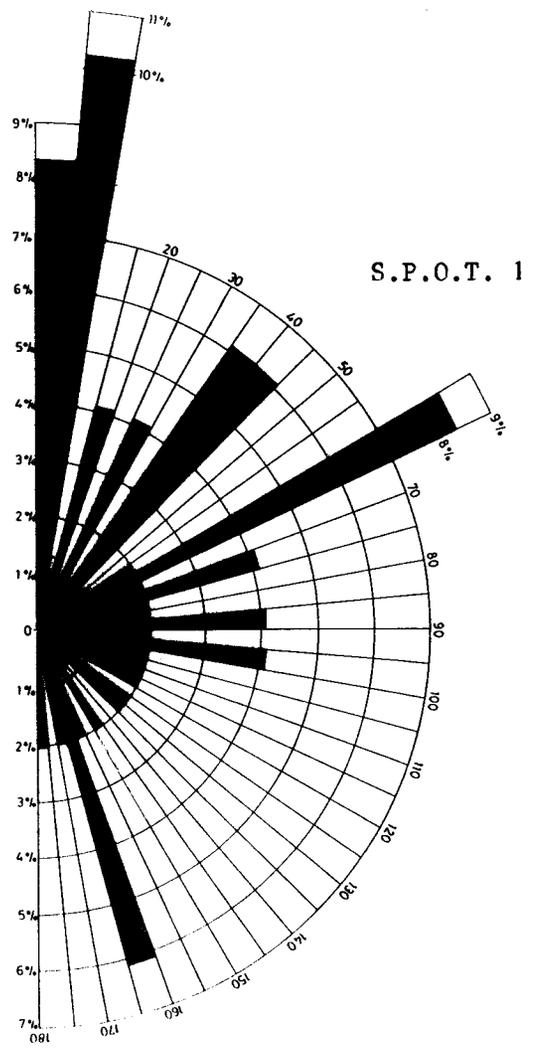
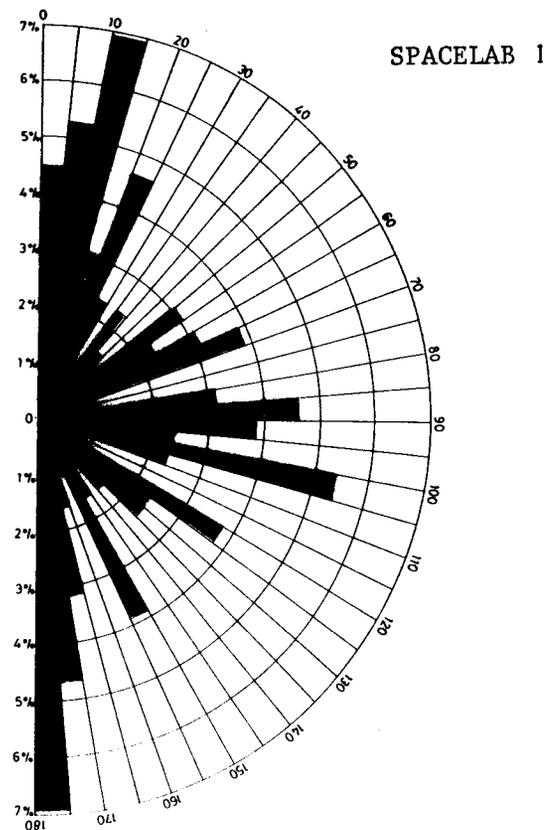
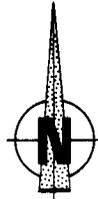
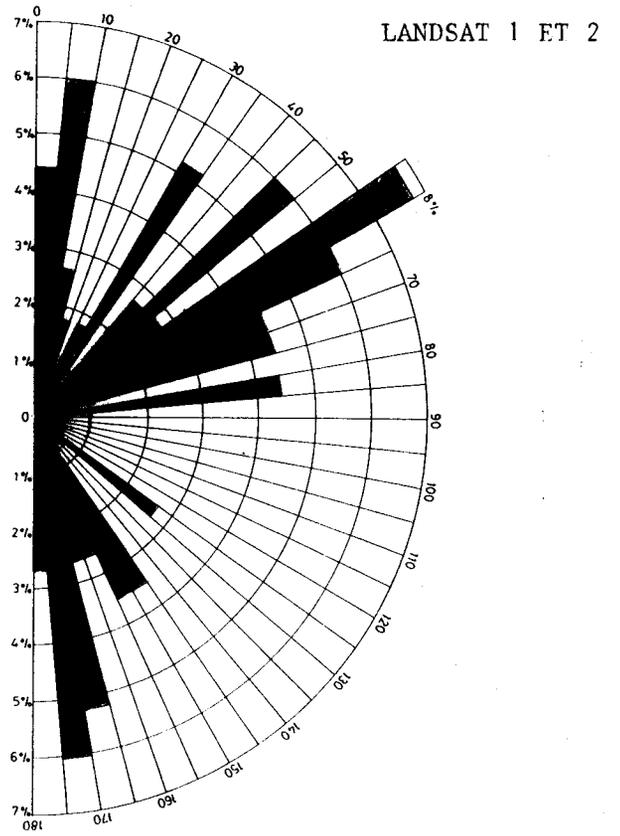
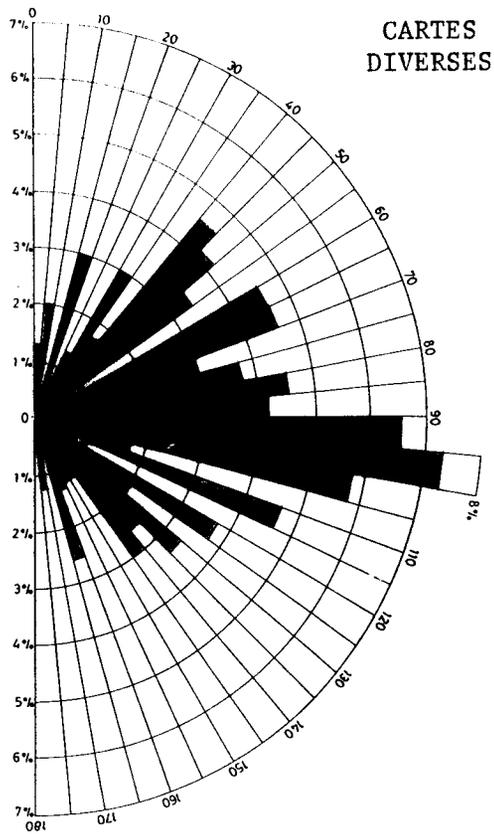


Figure 21 : Répartition de l'orientation des linéaments en fréquence.

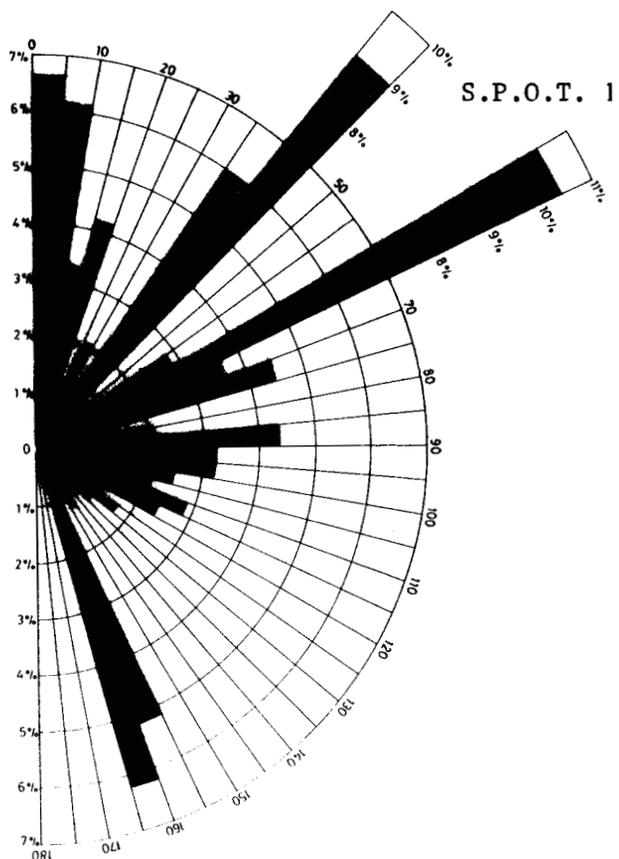
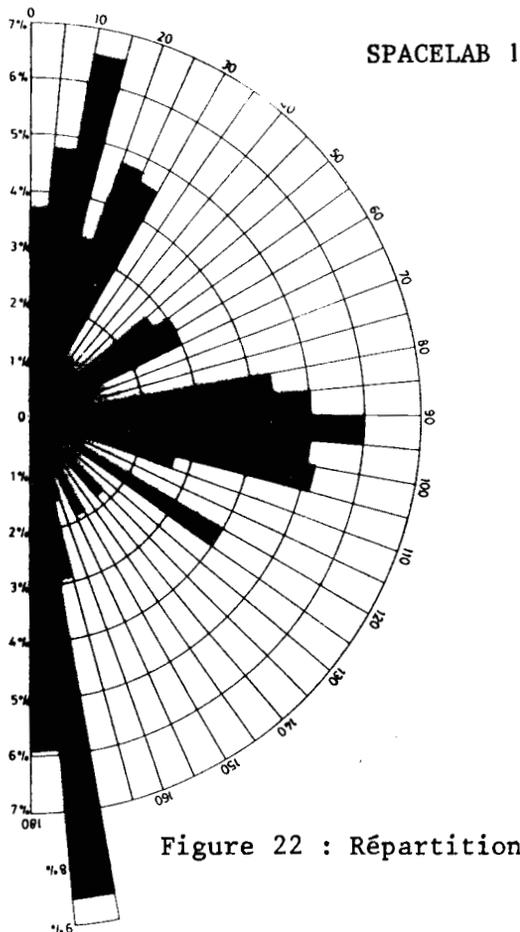
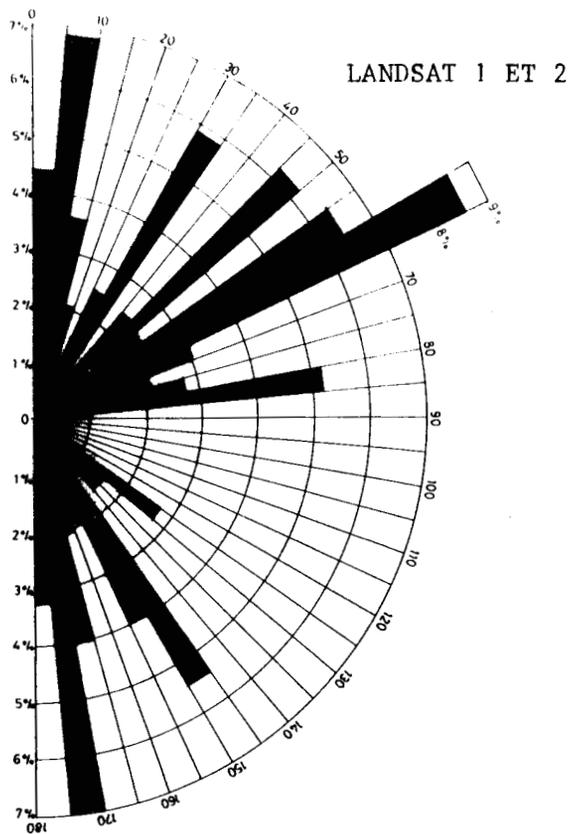
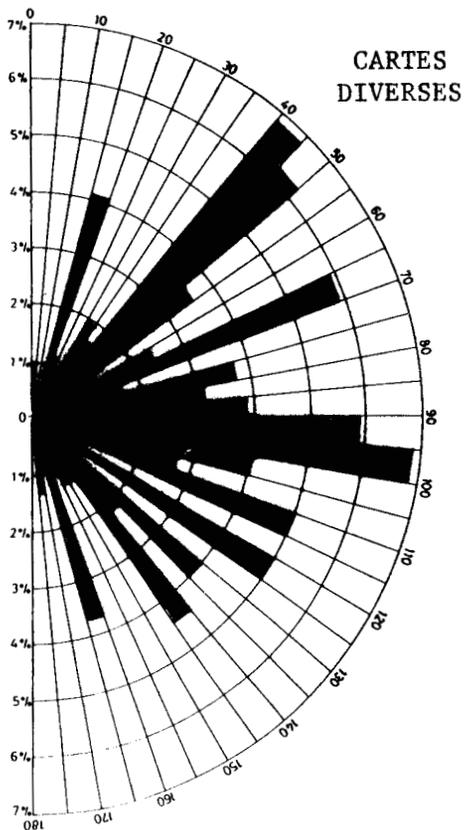


Figure 22 : Répartition de l'orientation des linéaments en longueur.

- N 60° E - N 65° E apparaît pour les deux mêmes satellites;
- N 65° E - N 70° E n'est jamais mise en évidence;
- N 90° E - N 100° E est soulignée par les données provenant de Spacelab.

7.5.3. Bilan de l'analyse linéamentaire

Il ressort de cette étude que:

- l'aspect complémentaire des différentes données est à prendre en compte;
- les orientations proches de la direction nord-sud, révélées par l'ensemble des vecteurs, sont rarement marquées dans l'analyse des données tectoniques existantes. L'hypothèse d'une fracturation intraformationnelle peu décelable sur le terrain et par les moyens géophysiques peut être proposée;
- le constat du manque de coïncidence entre les linéaments issus du traitement des données des différents vecteurs peut s'expliquer par l'hétérogénéité des caractéristiques des clichés:
 - . les longueurs d'onde utilisées;
 - . la période du survol (végétation);
 - . les conditions météorologiques, avant (pluie) ou pendant (gel), de la prise de vue;
 - . l'heure du passage (inclinaison du rayonnement solaire).

Il conviendra par la suite de rechercher l'intérêt hydrogéologique des linéaments déterminés. Pour ce faire, il est prévu la mise en oeuvre de la méthodologie suivante, afin de préciser et de tester la zone sélectionnée:

- positionner les linéaments par survol aérien avec réalisation de clichés en variant l'émulsion, l'angle de prise de vue, l'intensité et la direction de l'ensoleillement ...;
- affiner la localisation par prospection géophysique (sismique et électrique) au sol ;
- réaliser des ouvrages d'essais pour tester les aspects qualitatifs et quantitatifs de l'aquifère.

L'annexe G illustre une application sur le secteur nord de la limite entre les arrondissements de Cambrai et d'Avesnes sur Helpe.

7.6. Cartographie de l'occupation du sol: net avantage aux données S.P.O.T.

La présente analyse a pour but de passer en revue six postes principaux en ce qui concerne l'occupation du sol.

7.6.1. Cliché Spacelab.

Les types d'occupation du sol étudiés sont les suivants:

- zones boisées, elles sont représentées par une coloration vert foncé/brun foncé. Il s'agit des étendues qui se distinguent le plus facilement quel qu'en soit l'environnement;
- surface en herbe, de teinte brun-clair, elles sont particulièrement identifiables dans le secteur sud-est de la zone d'étude (Avesnois, Thiérache). Le maillage du bocage n'est pas visible, toutefois, il se manifeste en donnant à la teinte des pâtures une coloration hétérogène. Les surfaces en herbe existent dans deux autres situations:
 - . la partie basse des vallées;
 - . la zone entourant les agglomérations;
- champs cultivés, à l'époque de la prise de vue (début décembre), les parcelles sont faiblement occupées (cultures d'hiver) ou sans couvert végétal ou présentent encore les déchets de betteraves et maïs récemment récoltés. La teinte dominante est alors le vert (pâle et plus soutenu que pour les zones urbanisées).
La prise de vue fini-automnale n'est pas favorable à la reconnaissance des divers types de cultures. Le taux de couverture moyen de l'étendue de grande culture est proche de 23 % contre 75 % en juin-juillet. Le parcellaire apparaît relativement diffus;
- zones urbanisées, la teinte de celles-ci est très proche du vert des campagnes cultivées. C'est ce fait qui explique leur mauvaise distinction (excepté dans un environnement de bocage);
- étendues d'eau, elles sont rendues par le bleu foncé (parfois le bleu clair);

- linéaires divers, ils sont en général peu visibles hormis l'autoroute A.26 qui s'individualise par sa chaussée en béton. Certaines vallées sont nettement soulignées par la végétation arbustive en bordure des cours d'eau;
- ponctuels divers, les éléments les plus visibles sont les flux thermiques issus de cheminées importantes que souligne parfois un panache de fumée.

7.6.2. Cliché S.P.O.T.

L'analyse porte sur les mêmes postes:

- zones boisées, elles apparaissent très distinctement dans les tons bruns où de très nombreuses nuances sont discernables;
- surfaces en herbe, elles sont particulièrement mises en évidence par une teinte rose-orangée qui souligne à la fois:
 - . le bocage de l'Avesnois où le treillis des haies est nettement perceptible;
 - . les vallées lorsque les zones basses sont humides;
 - . les secteurs urbanisés entourés de pâturages;
- champs cultivés, le taux de couverture moyen (17 %) est plus faible que dans le cas du cliché Spacelab du fait de la prise de vue hivernale. Sa représentation est multiple de par les couleurs (blanc, gris, vert, rose) et leurs intensités. Il est à noter la visibilité du parcellaire qui rend le vecteur S.P.O.T. tout à fait adapté aux superficies européennes;
- zones urbanisées, elles se distinguent particulièrement bien par une coloration vert-bleu-gris que souligne le carroyage des artères principales et, dans bien des cas, l'homogénéité de l'environnement des pâtures;
- étendues d'eau, leur teinte est bleue, la nuance claire/foncée semble être le reflet de la profondeur faible/forte;
- linéaires divers, ils facilitent le repérage. Les autoroutes, voies de chemin de fer, routes principales sont nettement visibles (teinte grisée). Les routes secondaires se devinent par les ruptures occasionnées dans le parcellaire. Les petits cours d'eau sont soulignés par la végétation arbustive qui les borde;

- ponctuels divers, de nombreux détails sont perceptibles.

7.6.3. Bilan de l'analyse de l'occupation du sol

S.P.O.T. apporte un réel progrès quant à la résolution spatiale et semble tout à fait adapté à une révision cartographique au 1/100 000. En matière d'hydrogéologie qualitative, hormis le fait de visualiser rapidement un environnement, il sera possible d'en suivre l'évolution. Cet avantage sera particulièrement utile dans le secteur est de la zone d'étude où la politique européenne des quotas laitiers entraîne de nombreux retournements de pâtures. Ce travail du sol occasionne d'importants largages d'azote vers la nappe, ceux-ci induisent la crainte de voir augmenter le taux de nitrates des eaux destinées à la consommation humaine pour les années à venir.

Il est cependant à remarquer qu'un élément bien caractérisé dans un contexte donné, ne sera peut être plus identifiable en cas de variations météorologiques, pédologiques...

7.7. Essais d'évolution de l'hydromorphisme des terrains recouvrant l'aquifère crayeux

La délimitation des formations argileuses imperméables (terrain du Tertiaire d'âge Landénien) protégeant la nappe située dans la craie sous-jacente est rendue particulièrement délicate suite au recouvrement limoneux quasi continu. La cartographie des secteurs argileux est pourtant primordiale, ces terrains assurant un rôle protecteur vis à vis des infiltrations de surface.

Dans cette optique, il est intéressant de rechercher une différence concernant la réponse d'un limon reposant sur un terrain perméable (craie) ou sur une formation imperméable (argile). Cette approche est envisageable puisque les clichés analysés ont une composante infrarouge très utile pour un critère indirect comme la géobotanique.

Pour réaliser cette analyse, deux zones connues sont examinées:

- la partie septentrionale de la cuvette d'Orchies où existe un recouvrement argileux étendu bien déterminé (Beckelynck J. et Kleszcz J.P., 1980);
- le secteur de l'arrondissement de Cambrai au Nord de Caudry (bassin versant du cours d'eau Erclin) où l'absence de toute couverture imperméable est certaine.

L'occupation du sol est sensiblement identique, à savoir composée de grande culture.

Pour le cliché Spacelab :

- l'antécédent pluviométrique présente une période sèche entre J - 15 et J - 9 puis pluvieuse jusque J - 3 (21 à 55 mm);
- aucune distinction ne semble perceptible suite à l'examen des deux zones test.

Pour le cliché S.P.O.T.:

- l'historique pluviométrique comprend une longue période sèche suivie d'un intervalle "humide" entre J - 11 et J - 6 (2,7 mm) puis de nouveau un temps sec jusque la prise de vue;
- une première observation semble montrer des couleurs nettement plus pâles en zone imperméable qu'en secteur qui ne l'est pas. Cet aspect est rencontré indifféremment pour une occupation du sol de grande culture ou de prairies. Mais, l'examen plus attentif d'autres sites va à l'encontre de cette première affirmation.

Pour le cas examiné, il n'est pas possible de mettre en évidence l'intérêt de la télédétection en ce qui concerne l'hydromorphisme des sols. Le fait que les périodes pluvieuses remontent à J - 3 ou J - 6 induit une certaine homogénéisation.

7.8. Conclusion

La télédétection spatiale apporte de nouveaux éléments interprétables en terme de discontinuités du sous-sol.

Chaque vecteur (Spacelab et S.P.O.T.) révèle des linéaments non encore mis en évidence par les observations de terrain, l'interprétation des sondages géologiques, l'utilisation de la géophysique et le traitement des données issues de Landsat. La complémentarité de toutes ces méthodes est intéressante.

Du point de vue de l'occupation du sol, les informations offertes par S.P.O.T. sont d'une précision et d'une diversité remarquable.

Ce constat ne provient que d'une analyse visuelle et pourrait être amélioré par un traitement numérique dans le domaine de l'occupation du sol.

Dans le domaine hydrogéologique, l'intérêt de la télédétection est double:

- du point de vue qualitatif, et en particulier en ce qui concerne la contamination des nappes par les nitrates, la télédétection permet une visualisation rapide (en particulier par la distinction des zones de grande

culture et de pâtures) de l'extension des modes d'occupation du sol qui représentent un risque. Cet aspect n'est pas suffisant car l'intérêt dans le domaine de l'hydromorphisme des sols et donc indirectement de l'existence d'une formation imperméable en surface n'est pas établi;

- du point de vue quantitatif, la télédétection permet la détermination de structures linéamentaires. Celles-ci peuvent être la manifestation de zones fracturées qui induisent une circulation facilitée des eaux et donc de l'obtention de meilleurs débits.

8. CONCLUSIONS GENERALES : PERSPECTIVES D'EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DANS LA NAPPE

L'évolution prévisible de la concentration en nitrates des eaux souterraines doit être envisagée en prenant en compte la vitesse de transfert de l'eau infiltrée dans les terrains non saturés.

8.1. Différentes hypothèses sur l'évolution des apports d'azote en milieu agricole

8.1.1. Facteurs à considérer

La revue bibliographique du chapitre 2.2. a mis en évidence trois notions principales relatives à l'infiltration (figure 23):

- la vitesse de transit vertical de l'eau par la porosité matricielle des terrains non saturés varie entre 30 cm (Brossier G. et al., 1980) et 75 cm/an (Kerbaul A. et al., 1979);
- la vitesse de transit vertical de l'eau par la porosité de fissures des terrains non saturés est de l'ordre de 1 m/mois en phase de recharge (en général 6 mois/an) (Bourg A. et al., 1984);
- la majeure partie de l'eau s'écoule par la porosité matricielle, soit 83 % (Seguin J.-J. et Moreau F., 1986) à 92 % (Seguin J.-J., 1984).

Ces valeurs issues de sites localisés dans le Mélandois, la Champagne et la Somme peuvent être appliquées à l'arrondissement de Cambrai pour les raisons suivantes:

- la composition des terrains non saturés est identique, à savoir quelques mètres de limons sur de la craie;
- la pluviométrie efficace varie sur les sites expérimentaux de 175 mm/an (Brossier G. et al., 1979 - Seguin J.-J., 1984) à 250 mm/an (Landreau A. et al., 1981) contre 108 à 195 mm/an (moyenne géographique de 150 mm/an) entre 1956 et 1976, du nord-ouest au sud-est de l'arrondissement de Cambrai (figure 24).

L'influence de la morphologie n'est pas prépondérante; pour un même site, le seul exemple disponible montre que la fraction d'eau infiltrée dans la porosité de fissures est de 12 % sur le plateau contre 8 % en bas de coteau (Seguin J.-J., 1984).

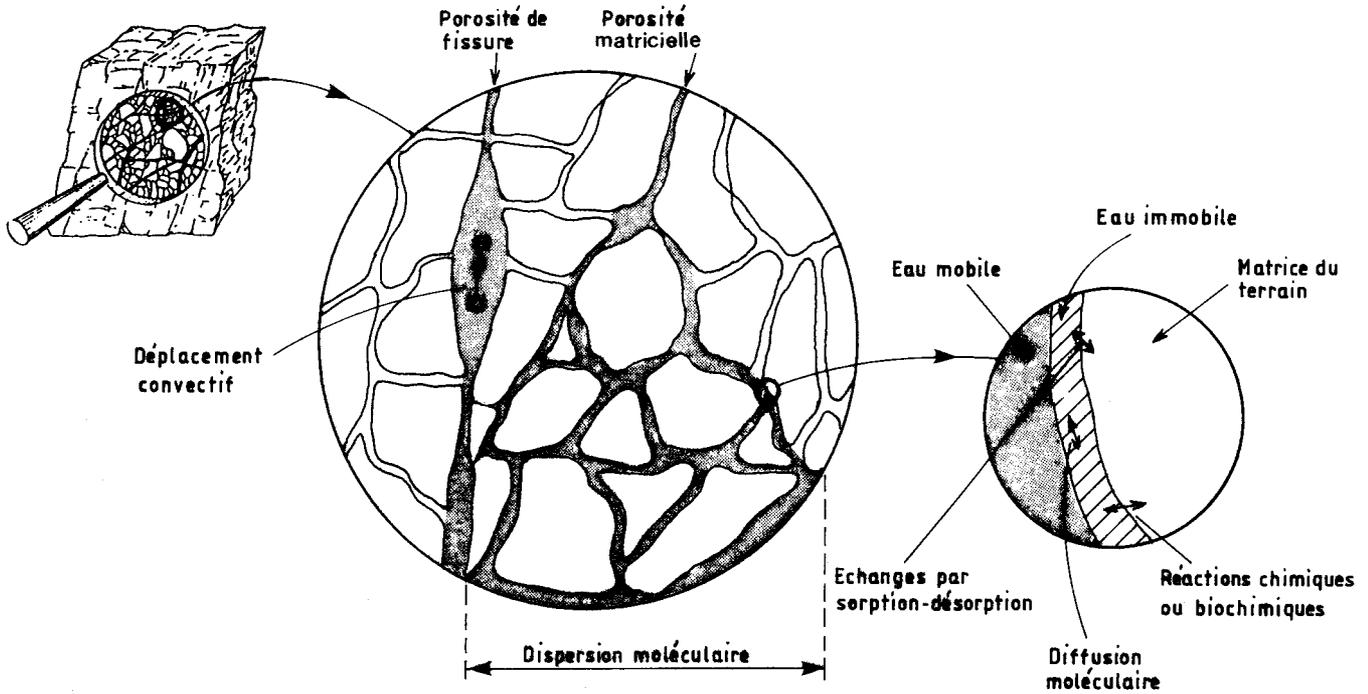


Figure 23 : Modalités de transit d'un soluté au travers des terrains non saturés.

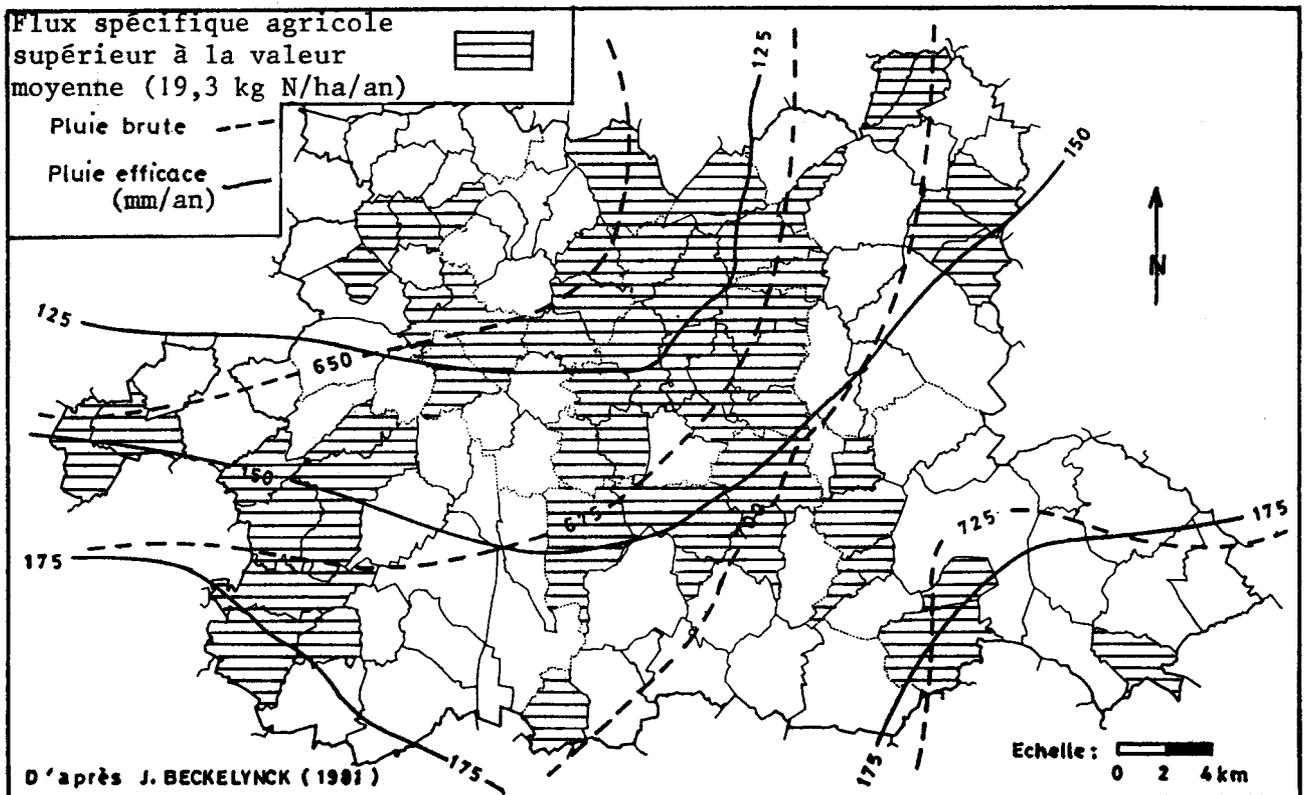


Figure 24 : Zones de flux spécifiques d'azote d'origine agricole et répartition de la pluviométrie au droit de l'arrondissement de Cambrai.

Il peut donc être considéré qu'une valeur de 50 cm/an, en année de pluviométrie moyenne, est une vitesse de transfert, par la porosité matricielle des terrains non saturés, adaptée pour l'arrondissement de Cambrai.

Cette valeur médiane peut cacher d'importantes disparités. Lorsque la nature de la couverture est argileuse, la vitesse de transfert est nulle ou excessivement lente suite à l'absence d'infiltration. A l'inverse, des formations superficielles sableuses permettent une infiltration facile. De plus, l'eau météorique abondamment infiltrée induit une dissolution de la matrice crayeuse. Cet aspect est particulièrement mis en évidence dans l'étude du bassin d'alimentation du champ captant d'Airon-Saint-Vaast (chapitre 3.) où, suite au ruissellement, d'importantes quantités d'eau s'infiltrent en fond de vallée; la fissuration de la craie facilite l'écoulement. Cependant, dans le cas de l'arrondissement de Cambrai, ce phénomène ne se produit que très localement.

8.1.2. Arrêt des pertes d'azote d'origine agricole

Cette hypothèse nécessite la mise en oeuvre de la totalité des mesures préconisées au chapitre 6., à savoir:

- la quantification du besoin exact de la culture en azote;
- la détermination du reliquat d'azote disponible dans le sol;
- la prise en compte des apports par le biais des résidus de l'élevage, matières de vidange, boues de station d'épuration;
- l'apport fractionné d'azote;
- l'utilisation des cultures dérobées.

L'application de ces différentes solutions ne parviendra probablement pas à ramener les pertes d'azote à leurs valeurs initiales et naturelles (quelques kg/ha/an). Les conditions réelles sont telles (hétérogénéité du sol, prévisions météorologiques à l'année impossibles) qu'il est illusoire d'envisager cette possibilité. Cependant, en se plaçant dans cette hypothèse, il est possible d'appréhender le problème qui se pose.

En admettant l'arrêt immédiat des pertes d'azote à l'horizon de l'an 2000, seuls les secteurs où la nappe se trouve à moins de 5 m du sol (environ 10 % de la superficie de l'arrondissement) amèneraient à la nappe une eau faiblement nitrée.

Cette amélioration serait largement annulée par l'arrivée à la nappe des eaux infiltrées après 1950 (début de l'utilisation intensive des fertilisants) et provenant des larges zones où la nappe est à plus de 20 m de profondeur (de l'ordre de 60 % de la surface de l'arrondissement).

Le début de décroissance des concentrations en azote n'interviendrait globalement qu'après plusieurs décennies.

8.1.3. Pertes d'azote d'origine agricole ramenées à celles d'il y a un quart de siècle

Ce scénario repose sur une application du modèle BICHE présentée au paragraphe 2.3.. Les valeurs à introduire sont les suivantes:

- la lame d'eau;
- l'évapotranspiration potentielle (E.T.P.);
- l'épandage d'engrais et de fumier;
- la consommation par les plantes;
- la minéraliation par le sol;
- la libération d'azote par les résidus de culture;

L'application concerne les sources de la Voulzie (nappe du calcaire de Champigny). Les épandages sont ramenés à leur valeur de 1964, c'est à dire réduction extrême (et quasiment improbable). Dans cet exemple, la concentration en nitrates de l'eau, actuellement à 55 mg/l, se maintiendrait à ce niveau pendant une quinzaine d'années avant de décroître lentement pour atteindre 40 mg/l après 40 ans.

8.1.4. Pertes d'azote d'origine agricole inchangées

Pour la même source, le modèle est mis en oeuvre en conservant les épandages et les besoins actuels. L'évolution fait apparaître une augmentation relativement régulière de la teneur en nitrates qui atteindrait environ 95 mg/l après 40 ans et une quasi-stabilisation à 115 mg/l après 80 à 90 années.

Un scénario identique est appliqué sur un captage de la nappe de la Beauce à Pithiviers (Loiret). Après 40 à 50 ans, la valeur de la concentration d'équilibre serait de l'ordre de 80 mg/l de nitrates.

Pour l'arrondissement de Cambrai, la pluie efficace annuelle (moyenne 1956-1976) est comprise entre 108 mm au nord-ouest et 195 mm au sud-est (figure 24). Le flux spécifique moyen d'azote émis vers la nappe est de 19,3 kg/ha/an. En prenant cette dernière valeur comme hypothèse sont déterminées les concentrations équivalentes en nitrates ci-après pour la lame d'eau en cours d'infiltration (tableau XI).

PLUIE EFFICACE MOYENNE (mm/an)	CONCENTRATION EN NITRATES (mg/l)
110	78
130	66
150	57
170	50
190	45
210	41

Tableau XI :

Variation de la concentration équivalente en nitrates pour un flux spécifique moyen de 19,3 kg de N/ha/an en fonction de la pluviométrie efficace.

8.1.5. Remarques

La présentation des scénari ci-dessus montrent combien la situation est préoccupante, d'autant plus qu'une mise en oeuvre des solutions rappelées au paragraphe 8.1.2. ne se fera que très lentement et demandera d'importants moyens financiers et techniques.

Une prise de conscience de la pollution nitratée d'origine agricole existe dans plusieurs pays, cependant l'internationalisation du commerce et des marchés nécessite une mise en application globale des remèdes sous peine de privilégier tel ou tel pays producteur.

A titre d'exemple, les deux cas ci-dessous montrent que la surproduction de certains produits peuvent induire des décisions (ici à l'échelle de la C.E.E.) indirectement responsables de l'augmentation de la teneur en nitrates des nappes phréatiques vulnérables à la pollution azotée:

- la surproduction de lait est à l'origine de la politique des "quotas laitiers". Cette dernière a entraîné des retournements de prairies et l'accroissement des surfaces labourables, tous deux émetteurs de quantités d'azote alors que la Surface Toujours en Herbe formait un écran à la propagation;
- la surproduction végétale est responsable de la mesure de "gel des terres" qui transforme en jachère des sols dont les nitrates formés à partir de l'humus en stock seront en partie lessivés car non utilisés par les cultures. A partir des

valeurs prises en compte dans le tableau II, les dix premières années de jachère induisent une émission d'azote supérieure à celle de la grande culture.

8.2. Différentes hypothèses sur l'évolution des apports d'azote en milieu urbain

8.2.1. Facteurs à considérer

Le temps de transfert des effluents urbains dans les terrains non saturés est réduit par rapport à celui de l'eau qui percole au droit des surfaces agricoles. L'infiltration est permanente (comparativement à la pluviométrie efficace), ce qui assure un transit rapide:

- estimé à environ 70 m/an au droit de l'écoulement superficiel infiltrant (valeur issue de la perméabilité déduite des jaugeages);
- instantané en ce qui concerne les puits perdus.

Seul l'épandage des matières de vidange sur les terres agricoles ne relève pas de cet aspect, le déversement des tinettes sur les potagers présente un cas intermédiaire du fait de la surirrigation des jardins.

8.2.2. Arrêt des pertes d'azote en milieu urbain

Cette hypothèse peut être envisagée par la mise en oeuvre des solutions présentées au chapitre 6, à savoir:

- la desserte des logements par un réseau d'assainissement;
- le raccordement des habitations au réseau;
- l'entretien du réseau;
- le regroupement des eaux usées;
- le traitement des eaux usées;
- le choix du lieu de rejet.

L'application de ces différentes mesures devrait permettre de réduire de façon significative les apports azotés d'origine urbaine.

8.2.3. Atténuation des pertes d'azote en milieu urbain

La priorité accordée à l'assainissement par le Conseil Général du département du Nord

permet d'envisager raisonnablement la situation suivante:

- la diminution du nombre de puits perdus et de l'épandage des tinettes sur les potagers ; suite à l'intensification de la desserte par l'assainissement collectif;
- l'augmentation des fuites de réseau pour la même raison et du fait du vieillissement des conduites;
- la stabilisation de l'épandage souterrain;
- l'atténuation des pertes au droit des cours d'eau permanent suite à l'équipement croissant en stations d'épuration (une dizaine d'ouvrages prévus dans l'arrondissement de Cambrai);
- la décroissance des pertes au droit des cours d'eau à infiltration totale, fossés, bassins avec la mise en place d'O.T.E.U., stations de refoulement...;
- la réduction de l'épandage des matières de vidange sur les terres agricoles de par l'augmentation du parc de stations d'épuration les acceptant;
- l'accentuation de l'épandage des boues de stations d'épuration.

Avec la concrétisation de ce scénario (quelque peu optimiste) une réduction de l'émission d'azote issue des effluents urbains peut être envisagée (elle serait de l'ordre de 50 % dans le cas de l'arrondissement de Cambrai).

8.2.4. Remarques

L'impact des eaux usées est en général à l'origine d'une contamination nitratée de forte intensité mais présente un panache réduit suite au processus de dilution.

Le temps de transfert relativement court devrait permettre de percevoir rapidement une amélioration.

8.3. Quantification de la concentration en nitrates de l'eau qui parviendra à la nappe

8.3.1. Hypothèses

Ce paragraphe présente, à titre indicatif, quelques scénari envisagés pour l'arrondissement de Cambrai. Il n'a pas la prétention de remplacer les modèles complexes qu'il conviendrait de mettre au point pour tenter d'approcher la démarche rappelée ci-dessous.

Le chapitre 5. a permis de détailler les facteurs à prendre en compte dans l'élaboration

d'une carte des teneurs en nitrates de la nappe, à savoir:

- 1 - le flux d'azote émis à la surface du sol;
- 2 - la protection naturelle de la craie;
- 3 - la dilution par la pluviométrie efficace;
- 4 - le retard induit par l'épaisseur des terrains non saturés;
- 5 - la dilution dans la nappe occasionnée par l'épaisseur de craie mouillée;
- 6 - le sens d'écoulement de la nappe;
- 7 - la facilité de circulation des eaux souterraines.

Les résultats présentés ci-dessous ne prennent en compte que les facteurs 1, 3 et 4. Ils représentent **la teneur moyenne en nitrates de la lame d'eau qui parvient à la nappe** (l'étude de la concentration de l'eau de la nappe demanderait la mise en oeuvre de modèles plus complexes) **l'année considérée sur l'ensemble de l'arrondissement.**

Les hypothèses suivantes sont prises en compte:

- la surfertilisation a débuté vers 1950;
- le flux d'azote d'origine agricole émis correspond depuis cette date à la valeur calculée pour l'étude (chapitre 5.), soit 1 581 t/an, à cette valeur sont ajoutées les 73 t issues des jardins. L'ensemble regroupe 80 % du flux total;
- la fraction d'eau qui circule dans la porosité de fissures est de 12,5 % (moyenne des valeurs disponibles);
- la vitesse de transfert par la porosité de fissures est de 6 m/an contre 30 à 75 cm/an pour la porosité matricielle (cf. 8.1.1.);
- le flux d'azote d'origine urbaine, 398 t/an, ne prend pas en compte les épandages sur les terres agricoles et les jardins (chapitre 5.) et totalise 20 % du flux global;
- la vitesse de transfert vertical des eaux usées est de l'ordre de 70 m/an au droit de l'écoulement superficiel et instantanée pour les puits perdus (cf. 8.2.1.).

8.3.2. Résultats

L'un des facteurs essentiels est constitué par l'épaisseur des terrains non saturés, le tableau XII précise leurs répartitions dans l'arrondissement de Cambrai, ainsi que le temps nécessaire pour les traverser, compte tenu de la vitesse moyenne prise en compte (0,50 m/an) pour la porosité matricielle.

EPAISSEUR DES TERRAINS NON SATUREES (m)	PART DE LA SURFACE DE L'ARRONDISSEMENT		TEMPS DE PARCOURS DE L'EAU MATRICIELLE (années)
	PAR SECTEUR (%)	CUMULES (%)	
0 à 10	18	18	0 à 20
10 à 20	25	43	20 à 40
20 à 30	24	67	40 à 60
30 à 40	15	82	60 à 80
40 à 50	15	97	80 à 100
Plus de 50	3	100	plus de 100

Tableau XII : Répartition de l'épaisseur des terrains non saturés pour l'arrondissement de Cambrai.
Temps de parcours de l'eau matricielle (0,50 m/an).

Le facteur de conversion afin d'obtenir des mg/l de nitrates prend en compte la pluviométrie moyenne entre 1956 et 1976 soit 150 mm/an.

Sur la base de ces données et hypothèses, trois scénari sont envisagés pour l'émission d'azote à la surface du sol (tableau XIII):

- situation inchangée;
- diminution de 50 % des apports d'origine urbaine en 1990;
- élimination totale des apports d'origine urbaine en 1990.

L'étude de scénari concernant la variation de l'apport d'azote d'origine agricole demanderait la mise en oeuvre de modèles plus complexes.

HYPOTHESES POUR LES SOURCES D'AZOTE	CONCENTRATION MOYENNE EN NITRATES DE LA LAME D'EAU QUI PARVIENT A LA NAPPE L'ANNEE CONSIDEREE (mg/l)				
	1990	2010	2030	2050	Vers 2070 (équilibre)
Situation inchangée	41	52	60	67	69
- 50 % pour l'origine urbaine	34	45	53	60	62
Elimination de l'origine urbaine	28	39	46	54	55

Tableau XIII : Concentration moyenne en nitrates de la lame d'eau qui parvient à la nappe au droit de l'arrondissement de Cambrai.

8.3.3. Interprétation

L'ensemble des cas envisagés montre une dégradation inéluctable de la concentration en nitrates de l'eau qui parvient à la nappe. Bien entendu, la dilution dans cette dernière entrainera un temps de retard pour l'eau prélevée par les captages. A terme, la majeure partie de la nappe avoisinera ou dépassera la Concentration Maximale Admissible de 50 mg/l.

8.4. Enseignements

8.4.1. Le constat

Ainsi, il apparaît à la lecture du tableau XIII que la situation générale de l'arrondissement est difficile. Cet état subsiste même si les apports d'eaux usées d'origines urbaines et industrielles sont supprimés (20 à 25 % des émissions totales d'azote vers la nappe).

Cependant, des facteurs bénéfiques ou aggravants d'origine géographique ou anthropique existent, ils permettent d'affecter des coefficients diviseurs ou multiplicateurs aux concentrations du tableau XIII. Parmi ces facteurs peuvent être envisagés:

- la pluie efficace (moyennes 1956-1976) qui permet de distinguer trois grands

secteurs dans l'arrondissement:

- . au sud-est et sud-ouest, les valeurs sont supérieures à 175 mm/an (coefficient diviseur de 1,17);
- . au centre, elles sont comprises entre 125 et 175 mm/an;
- . au nord-ouest, elles sont inférieures à 125 mm/an (coefficient multiplicateur de 1,20);

- les apports d'azote d'origine agricole dont la valeur par commune peut être:

- . inférieure à 15 kg de N/ha/an (coefficient diviseur de 1,33);
- . supérieure à 20, voire même 25 kg de N/ha/an (coefficient multiplicateur de 1,25).

Cela représente un coefficient de 1 à 2 selon les zones (voir planche II de l'Atlas - document n° 5). Les secteurs les plus touchés sont :

- . le bassin de l'Erclin;
- . les hautes vallées du Torrent d'Esnes et de la Selle;
- . les environs de Cambrai;
- . la partie sud-ouest de l'arrondissement (dont l'enclave).

- les apports d'azote d'origine urbaine et industrielle qui permettent la distinction schématique de trois principaux types d'infiltration:

- . les rejets directs à l'aplomb des zones urbaines (et industrielles) conduisent à des flux importants (de 25 à 125 kg de N/ha/an). Ils peuvent être collectés;
- . l'infiltration totale ou partielle des eaux polluées qui arrivent aux riots perchés au-dessus de la nappe (linéaires figurés en rouge sur la planche II de l'Atlas). Il s'agit, d'amont en aval:

- + du Ruisseau de Sargrenon;
- + du Torrent d'Esnes et ses effluents en amont du village d'Esnes ;
- + de l'Erclin et ses affluents en amont des villages de Rieux-en-Cambrésis et de Naves;

pour ne citer que les principaux;

- . localement, les rejets à la nappe provenant pour les plus importants des stations d'épuration.

La superposition schématique des cartes (pluie efficace et sources d'azote) (figure 24) permet de proposer une évolution à long terme de la qualité de la nappe (en adoptant l'hypothèse de 50 cm/an pour le temps de parcours de l'eau matricielle).

Le Sud de l'arrondissement est favorisé par une pluie efficace supérieure à 170 mm/an et des apports en azote inférieurs à 20 kg/ha/an.

Au contraire, le bassin de l'Erclin est défavorisé par des émissions agricoles et urbaines élevées qui devraient faire tendre la teneur en nitrates de la nappe vers 100 mg/l.

Dans le secteur nord-ouest de l'arrondissement, la situation devrait apparaître généralement difficile compte tenu de la diminution de la pluie efficace. Cette zone bénéficie toutefois de facteurs naturels spécifiques moins défavorables:

- recouvrement argileux;
- alimentation par les canaux;
- dénitrification dans les vallées.

8.4.2. La stratégie

Le constat qui précède est préoccupant, même si celui-ci peut être précisé par l'utilisation de modèles. Cependant, quelques idées d'ensemble peuvent conduire à améliorer l'assainissement et les structures de pompages de la nappe.

Il apparaît en effet difficile de sauvegarder les captages situés dans le bassin de l'Erclin ainsi que ceux implantés à l'ouest et au nord-ouest de l'arrondissement. En particulier, lorsque les ouvrages ne bénéficient pas d'un contexte géologique particulier.

Par contre, il devient urgent d'assainir totalement et de raccorder les habitations des secteurs sud et est de l'arrondissement. Cette action devrait conduire, en particulier pour la partie méridionale, à prévoir un traitement de dénitrification ou à exporter vers l'aval, par des ouvrages étanches, les eaux épurées. En effet, dans cette zone les "riots" sont toujours perchés et tout ou partie de leurs eaux s'infiltrant.

Il est également nécessaire d'intensifier l'action de sensibilisation et l'aide au niveau agricole (déjections animales prises en compte dans la fertilisation, fractionnement des apports d'azote, utilisation des cultures dérobées...). Ces mesures peuvent être mises en oeuvre même si l'impact se fait sentir avec un retard de plusieurs décennies vu l'épaisseur des terrains non saturés. Cette action est motivée par les 65 à 70 % que représentent les apports en azote provenant de l'agriculture.

* * *

* * * *

Dans le cas où une alimentation de qualité ne peut plus être réalisée, trois solutions subsistent:

- l'interconnexion de réseaux d'adduction;
- la recherche d'une nouvelle ressource en privilégiant les sites favorables (recouvrement protecteur, dénitrification naturelle);
- la mise en place d'un réacteur de dénitrification.

Cette dernière solution montre que l'homme a les moyens techniques de combattre les effets négatifs de son comportement mais n'est-il pas plus satisfaisant d'agir sur la cause ?

Cet aspect, peut être exagérément optimiste, ne concerne que la pollution par les nitrates, thème principal de ce travail.

En réalité, le nitrate doit être aussi considéré comme un indicateur de pollution et même du degré de celle-ci. En effet, sa présence dans les eaux souterraines traduit une infiltration depuis la surface. Le nitrate n'est que la partie émergée de l'iceberg car un grand nombre de paramètres chimiques (les micropolluants par exemple) ne sont pas encore techniquement décelables ou systématiquement analysés. Toutefois, les terrains non saturés empêchent certains polluants d'atteindre la nappe.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

SUR L'AZOTE

- Agence de l'Eau Artois-Picardie (A.E.A.P.) (1986) - Le diagnostic d'un réseau d'assainissement. Ag. Eau Artois-Picardie édit., Douai, France, 48 p., 5 tabl., 15 fig., 8 ph., couleurs
- ALBINET M., BROSSIER G. & DESPREZ N. (1972) - Etude de la pollution des eaux souterraines dans la val d'Orléans (Cr6+ et NO3-). Rapport pour Minist. Dével. Ind. Sci. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 72 SGN 242 AME, 10 p., 3 tabl., 3 fig.
- ALLAIN G. (1988) - Exemples de stratégie de lutte contre l'enrichissement en nitrates des nappes d'eau souterraines en Normandie. Diagnostic et mise en oeuvre de pratiques de redressement en milieu agricole dans le département du Calvados. Campagne de communication et d'information concernant la gestion de l'azote en milieu agricole dans les départements de la Seine-Maritime et du Calvados. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 4, pp. 209-213, une fig.
- AUSSEUR J.-Y., BONNET M., SAUTY J.-P. & VANDENBEUSCH M. (1979) - Recharge des nappes à travers la zone non saturée - Mesures et modélisation. Rapport pour Dir. Gén. Rech. Sci. Tech. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 79 SGN 784 HYD, 73 p., 12 tabl., 18 fig. et 6 ann. (51 p., 1 tabl., 22 fig.)
- AWAD L. (1982) - Les nitrates dans l'eau et la santé. 44 p., 2 tabl.
- BARRES M., CAULIER P., VALENTIN J. & VAN DEN HOECK A. (1980) - Délimitation de panaches de pollution des eaux souterraines à l'aval de décharges urbaines ou industrielles par prospection électrique. Rapport pour Minist. Ind. Rech. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 81 SGN 222 ENV, 12 p., 2 tabl., 9 fig.
- BAZIN M. (1979) - Techniques et économie de l'épuration des eaux résiduaires. Cahier Tech. Dir. Prév. Pollutions, Ag. Fin. Bassin Seine-Normandie, Nanterre, France, n° 2, 157 p., 28 tabl., 100 fig., 38 ph.
- BEAUVOIS F., GRIL J.-J. & MARESCA B. (1984) - La valorisation agricole des eaux usées en R.F.A. - L'exemple du périmètre d'épandage de la ville de Brunswick (Hanovre). Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 7, pp. 387-395, 7 tabl., 3 fig.
- BEBIN J. (1976) - Origines des pollutions azotées dans les eaux superficielles et les eaux usées - Développement récents des procédés permettant l'élimination de ces nuisances. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 8-9, pp. 347-362, 13 tabl., 11 fig.

- BECKELYNCK J. (1981) - Traitement régionalisé des paramètres contribuant à la gestion des nappes - Application à la modélisation de la nappe dans le bassin de l'Aa et de la moyenne Lys (Région Nord - Pas-de-Calais). Thèse 3ème cycle, Univ. Sci. Tech. Lille, France, n° 902, 140 p., 9 tabl., 38 fig., 12 ann. (31 p., 7 pl. h. t. dont une carte couleurs au 1/250.000)
- BECKELYNCK J., L'HOPITAULT J.-C. & PHILIPPO A. (1982) - Etude de l'influence de la pollution atmosphérique sur les eaux de pluie. Rapport pour la Dir. Rég. Ind. Rech. du Nord - Pas-de-Calais par le Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min., Lezennes, 82 SGN 1001 NPC, 23 p., 4 tabl. et 7 ann. (132 p., 4 tabl., 88 fig., une pl.)
- BECKELYNCK J., BAILLY S. & CAULIER P. (1985) - Carte d'orientation à l'exploitation de la nappe de la craie pour les pompes à chaleur. Document pour Conseil Régional Nord - Pas-de-Calais et Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie par Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min., Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, 85 SGN 417 NPC, 15 p., une carte couleurs h. t. au 1/250.000
- BEDIN J. & PICARD M. (1979) - Nitrification et dénitrification des eaux urbaines avec zone anoxique. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 3, pp. 164-167, 1 tabl., 1 fig.
- BERNARD D., BONNET M., BROSSIER G. & LANDREAU A. (1977) - Equipement d'un site expérimental pour l'étude in situ de l'acquisition de la composition chimique de l'eau au cours de l'infiltration à travers la zone non saturée. Rapport pour Minist. Env. cadre vie par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 77 SGN 607 HYD, 9 p., 2 fig. et 4 ann. (5 p., 3 tabl., une fig.)
- BERNARD D. (1979) - Contribution à l'étude hydrogéochimique de la nappe de la craie dans le Nord de la France - Etat et acquisition du chimisme de l'eau. Thèse 3ème cycle, Univ. Sci. Tech. Lille, France, 179 p., 24 tabl., 84 fig. et 12 ann. (37 p., 7 tabl., 11 fig.)
- BERNHARD C. (1985) - Evolution du risque de contamination des eaux souterraines du Ried central de l'Ill par les nitrates. Thèse doctorat, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, France, 167 p., 23 tabl., 50 fig. et 4 ann. (24 p., 7 tabl., 4 fig.)
- BILLAUDOT F. (1988) - La pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole. Ann. voirie Env., Victoires édit., Paris, France, n° 6, pp. 172-180, 2 fig.
- BLAKE G. & TISO G. (1985) - Epuration des eaux usées domestiques par infiltration - Epuration: Rôle respectif des différents compartiments. Bull. information Eaux, Ass. française étude eaux édit., Paris, n° 350, pp. 11-22, 12 tabl., 2 fig.
- BONIFACE R., GUIRAUD G. & MARIOTTI A. (1987) - Engrais azotés, alimentation des plantes et pollution. Rapport pour Minist. Env., Paris, France, 44 p., 11 tabl., 8 fig. et 3 ann. (4 p., 4 tabl.)

- BONNET M., LANDREAU A., BARRES F., BROSSIER G., BOSCH B., DESGRANGES P., JOUHANY C., LELEU M., MARCÉ A. & SARCIA C. (1979) - Mécanismes d'acquisition de la qualité chimique d'une eau souterraine - Etude expérimentale in situ. Rapport pour Minist. Env. cadre vie par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 79 SGN 661 HYD, 40 p., 28 tabl., 45 fig. et 6 ann. (9 p., 1 tabl., 2 fig.)
- BOSSET E. (1981) - Evolution des concentrations en nitrates des eaux souterraines en Moyen Pays Vaudois. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 1, pp. 19-27, 9 fig.
- BOURG A., CAULIER P., LANDREAU A., SAUTER M., BROSSIER G. & CAFFIAUX G. (1984) - Mécanismes d'acquisition de la qualité chimique d'une eau souterraine. Rapport pour Secr. état Env. qualité vie par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 84 SGN 150 EAU, 49 p., 18 tabl., 12 fig. et 2 ann. (14 p., 8 tabl., 9 fig.)
- BOURGOGNE P. (1988) - Evolution de la teneur en nitrates des eaux distribuées sur Caen. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 4, pp. 192-196, 7 fig.
- BOUSSAÏD F., MARTIN G., MORVAN J., COLLIN J.-J., LANDREAU A. & TALBO H. (1988) - Denitrification in-situ of groundwaters with solid carbon matter. Env. Tech. Letters, Publications Division Selper Ltd., Vol. 9, pp. 803-816, 6 tabl., 6 fig.
- BOUTON D. & FROMENT P. (1985) - Mise en évidence de zones aquifères à faibles teneurs en nitrates en Champagne crayeuse - Vallées de l'Aube et de la Seine. Hydrogéol., Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 4, pp. 285-291, 4 fig.
- BROSSIER G., KERBAUL A., LANDREAU A., MOREAUX P., OAKES D. & YOUNG C. (1980) - Impact des pratiques agricoles sur la minéralisation des eaux interstitielles des terrains sous-jacents - Conséquences sur la qualité de l'eau de la nappe. Rapport pour Minist. Ind. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 79 SGN 768 HYD, 15 p., 2 tabl., 11 fig.
- BUREAU de GÉologie APpliquée (BUR.GE.AP.) & Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) (1983 - 1984) - Champs captants d'Emmerin et Houplin-Ancoisne - Etude des phénomènes liés à la présence de nitrates dans l'eau et propositions d'amélioration de la qualité de l'eau. Rapports pour Com. Urb. Lille par Bur. Géol. App., Paris, France, R. 521-E. 1223 (phase 1), R. 571-E. 1489 (phase 2) et Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min., Lezennes, France, 83 NPC 17 (phase 1), 84 AGI 190 NPC (phase 2), 23 p., 3 tabl., 3 fig. et 5 ann. (249 p., 100 tabl., 24 fig., 5 pl., 3 pl. h. t. dont une en couleurs au 1/12.500) (phase 1), 47 p., 3 tabl. et 2 ann. (21 p., 12 tabl., 4 pl. h. t. couleurs) (phase 2)
- CATHELAIN M. & DEMIAUTTE J.-P. (1985) - Capacité des sols à assurer l'assainissement autonome. Hydrogéol., Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 2, pp. 149-157, 3 tabl., 16 fig.

- CAULIER P. & PREAUX C. (1983) - Recherches sur l'origine et le devenir des composés azotés détectés dans certains aquifères captifs - Secteur captif de la nappe de la craie dans la région Nord de la France (feuilles de Lille - Carvin - Douai) - Interprétation des données existantes. Note pour Commission Communautés Européennes par Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min., Lezennes, France, 83 NPC 38, 12 p., 2 fig., 2 pl. dont une en couleurs, et 4 pl. h. t. dont une en couleurs
- CHALOT F. (1988) - L'état d'avancement des schémas départementaux d'élimination des matières de vidange. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 3, pp. 153-159, 2 tabl., 4 fig., une carte, 2 ph.
- CHEDAL M. (1975) - L'élimination de l'ammoniaque des eaux potables. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 5, pp. 173-185, 6 tabl., 13 fig., 3 ph.
- COLLIN J.-J. et LANDREAU A. (1984) - Les nitrates dans les eaux souterraines - Constat de situation - Principales études et programmes de recherches en cours au S.G.N. Rapport pour la réunion du comité eau-nitrates par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 84 SGN 148 EAU, 14 p., 7 fig.
- COUELLE J., RAVARINI P., CHAPOTARD J.-M. & HORVAT J.-M. (1988) - Elimination simultanée des nitrates et de l'ammoniaque - Bactéries contre nitrates. Génie rural, Pyc édit., Paris, France, n° 12, pp. 80-82, 5 tabl., 2 ph.
- CREMILLE L. (1985) - Etude sur l'origine des nitrates et les mesures curatives à prendre sur les bassins hydrogéologiques alimentant quelques champs captants du Nord de la France. Congrès "Nitrates dans les eaux", Paris, France, (22, 23 & 24-10), 10 p., 4 tabl., 7 pl. h. t.
- DEGUIN A. (1985) - Agrément du procédé Nitracycle pour l'élimination des nitrates sur résine. Trib. Cebedeau, Cebedoc édit., Liège, Belgique, n° 502, 38, pp. 47-48, une fig.
- DEGUIN A. (1988) - Incidence des résines échangeuses d'anions sur la qualité de l'eau traitée selon le procédé Nitracycle. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 4, pp. 231-234, 2 tabl., 3 fig.
- DE LARMINAT G. (1987) - L'élimination des nitrates dans les eaux potables - Principes et application industrielle. Journée "Azote" organisée par Groupe Action Rég. Nord-Picardie, Arras, France, (09-04), 18 p., 6 tabl., 6 fig.
- DESPREZ N., LANDREAU A. & VOGT D. (1983) - Evolution de la vulnérabilité des aquifères libres du département de l'Indre et Loire aux nitrates d'origine agricole. Rapport pour Minist. Env. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 83 SGN 049 EAU, 26 p., 2 tabl., 4 fig., 5 cartes dont 2 h.t.
- DOUAY F., BILLIONNET J.-M., MASSON F.-X. & PELLETIER J.-L. (1985) - Etude des moyens destinés à réduire la teneur en nitrates des eaux souterraines prélevées au champ captant d'Airon-Saint-Vaast - Partie III: pédologie, inventaire de l'occupation du sol et étude du mode de circulation et d'infiltration des eaux pluviales. Rapport pour la ville de Berck-sur-Mer par Inst. Sup. Agri. et Serv. Rég. Aménag. Eaux, Lille, France, 73 p., 12 tabl., 9 fig. 8 pl. et une ann. (une p., 1 tabl.)

- DUCHEMIN J., DUFILS J., & PARIS M. (1988) - Nitrates et santé: la situation en Normandie. Actions de prévention en matière d'eau d'alimentation. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 4, pp. 181-191, 6 schémas, 5 fig.
- DUNN N. (1985) - Des moyens plus rapides d'analyse. Le sillon, Deere & compagny édit., Mannheim, R.F.A., mars-avril, pp. 10-11, 2 ph. couleurs
- DUTIL P. & MULLER J.-C. (1979) - L'épandage des eaux résiduaires des industries agricoles en Champagne crayeuse. P.V. Acad. Agr., Paris, France, (20-06), pp. 989-1005, 6 tabl.
- FAURIE M. (1983) - Rôle des microorganismes dans le cycle de l'azote. 14 p., 12 fig. in "Eléments de microbiologie des eaux". Rapport public du Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 83 SGN 386 NPC, Coordination LANDREAU A.
- FOULHOUZE R. (1988) - Nitrates et eaux d'alimentation. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 4, pp. 171-176, 3 tabl., 3 fig.
- GENG Q.-Z. (1988) - Modélisation conjointe du cycle de l'eau et du transfert des nitrates dans un système hydrologique. Thèse doctorat, Ecole Nat. Sup. Min., Paris, France, 183 p., 57 tabl., 71 fig. et 4 ann. (42 p., 17 tabl., 13 fig.)
- GOUZE J.-R. (1988) - Bilan des apports en nitrates provenant des installations classées. Solutions adoptées et problèmes restant à résoudre. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 4, pp. 206-208, 3 fig.
- GUENAUT B. (1985) - Des agriculteurs combattent la pollution. Le sillon, Deere & compagny édit., Mannheim, R.F.A., septembre, pp. 5-6, 3 ph.
- GUERRÉE H., GOMELLA C. & BALETTE B. (1978) - Pratique de l'assainissement des agglomérations urbaines et rurales. Eyrolles édit., Paris, 328 p., 95 fig., 7 ann. h. t. (8 abaques, 2 règles, 2 tabl.)
- HAÏDER N., MORVAN J. & MARTIN G. (1988a) - Dénitrification en sous-sol. Rôle des sulfures et des sels ferreux. Wat. Supply, Pergamon Journals Ltd - I.W.S.A. édit., Brussels, Belgique, Vol. 6, pp. 71-75, 4 fig.
- HAÏDER N., MORVAN J., LE CLOIREC P. & MARTIN G. (1988b) - Dénitrification en réacteur garni en pyrite de fer: études de laboratoire. Env. Tech. Letters, Publications Division Selper Ltd, Vol. 9, pp. 411-420, 1 tabl., 3 fig.
- HANUS F. & BERNARD C. (1988) - Dénitrification des eaux potables dans un réacteur biologique à élimination continue de la biomasse en excès: un procédé inédit. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 4, pp. 243-246, 6 fig.
- Institut Géographique National (I.G.N.) (1983) - Erosion des terres agricoles d'après photographies aériennes - Ligescourt (Somme). Inst. Géogr. Nat. édit., Paris, France, 24 p., 1 tabl., 3 graph., 7 fig. dont 4 en couleurs, 11 ph. dont 9 en couleurs

- Inter-agences (1980) - L'assainissement individuel, principes et techniques actuelles. Agence de bassin Loire - Bretagne, Orléans, France, 126 p., 26 tabl., 62 fig.
- KERBAUL A., MORFEAUX P. & LANDREAU A. (1979) - L'épandage d'effluents sur terrain agricole. Effets sur la zone non saturée de la craie en Champagne. Rapport pour Minist. Ind. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans et Reims, France, 79 SGN 229 HYD/CHA, 7 p., 2 tabl. et 6 ann. (14 p., 5 tabl., 8 fig.)
- LALLEMAND-BARRES A. (1974) - Quelques cas de pollution des eaux souterraines par les nitrates, en milieu rural (étude documentaire). Rapport pour Minist. Ind. Rech. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 74 SGN 226 AME, 12 p., 3 tabl., 5 fig.
- LALLEMAND-BARRES A., BONNET M. & BROSSIER G. (1976) - Etude de la propagation des nitrates dans un sol du val de Loire. Rapport pour Minist. Qual. vie par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 76 SGN 207 AME, 79 p., 6 tabl., 11 fig.
- LALLEMAND-BARRES A., LANDREAU A., MARGAT J. & ROUSSEL P. (1985) - Teneurs en nitrates des nappes phréatiques de la France - Etat 1983. Rapport pour Minist. Env. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 85 SGN 442 EAU, 18 p., une fig. et une pl. couleurs au 1/1.500.000
- LALLEMAND-BARRES A., DEBUISSON J., LANDREAU A., MARGAT J. & ROUSSEL P. (1987) - Teneurs en nitrates des nappes phréatiques de la France - Etat des connaissances - 2ème édition: 1986. Pour Minist. Env. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 87 SGN 237 EAU, une carte couleurs au 1/1.500.000
- LANDREAU A., MORFEAUX P., BROSSIER G. & KERBAUL A. (1981) - Etude sur site expérimental de la propagation des nitrates dans la craie de Champagne. Rapport pour Minist. Ind. par Bur. Rech. Géol. Min., Reims et Orléans, France, 81 SGN 640 CHA/EAU, 12 p., 3 fig.
- LANDREAU A. (1983) - Fertilisants azotés et qualité des eaux souterraines - Cartographie des zones vulnérables (Application sur le département de l'Indre et Loire). Rapport pour Minist. Env. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 11 p., 3 cartes couleurs au 1/100.000
- LANDREAU A. & MORISSOT A. (1983) - Evolution de la vulnérabilité des aquifères libres aux nitrates d'origine agricole. Rapport pour Minist. Env. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 83 SGN 026 EAU, 60 p., 2 tabl., 12 fig., 9 cartes dont 4 h. t. et 3 ann. (10 p., 4 tabl.)
- LANDREAU A. & ROUX J.-C. (1984) - Les nitrates dans les eaux souterraines - Exemples de répartition et d'évolution des teneurs dans quelques aquifères français. Rapport pour colloque Nat. Ass. Internat. entretiens écologiques par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 84 SGN 361 ENV, 51 p., 31 fig.
- LANDREAU A., TALBO H. & CAILLIBOTTE A. (1984) - Dénitrification provoquée des eaux souterraines. Note tech. du Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 84/02, 12 p., 4 tabl., 4 fig. et une ann. (2 p., 2 fig.)
- LANDREAU A., BOUSSAÏD F. & GILLET M. (1986) - Procédé de dénitrification des eaux souterraines en vue de leur potabilisation. Rapport pour Minist. Env. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 86 SGN 091 EAU, 60 p., 7 tabl., 15 fig.

- LANDREAU A. & SEGUIN J.-J. (1987) - Investigation sur la dénitrification naturelle dans l'aquifère captif de la craie du Nord de la France. Rapport pour Minist. Env. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 87 SGN 486 EAU, 41 p., 8 tabl., 19 fig. et une p. ann.
- LANDREAU A., MARIOTTI A. & SIMON B. (1988) - La dénitrification naturelle dans les eaux souterraines. Hydrogéol., Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 1, pp. 35-43, 3 tabl., 8 fig.
- LAVOUX T. (1987) - La pollution nitratée - Les politiques menées en R.F.A., au Royaume-Uni et aux Pays-Bas - Synthèse. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 2, pp. 100-101, 1 tabl.
- LECUYER P. (1988) - Impact des nitrates sur la qualité des eaux et points noirs. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 4, pp. 203-205, 2 fig.
- LEHRMANN P. (1984) - Contribution à l'étude de la dynamique et des transferts de l'azote minéral en sols cultivés sous climat semi-continental. Thèse Doct. Ing., Inst. Nat. Polytech. Lorraine, Nancy, France, 174 p., 22 tabl., 54 fig. et 7 ann. (13 p., 8 fig.)
- LHEUREUX B. & BALLAY D. (1982) - Les programmes de réduction de la concentration en nitrates. Génie rural, Pyc édit., Paris, France, n° 12, pp. 7-10, 1 tabl.
- LINDEMANN Y. (1986) - Contribution à l'étude statistique des répartitions et à la modélisation de la dynamique de l'azote nitrique dans le sol. Thèse état, Univ. Orsay, Paris, France, 310 p., 91 tabl., 53 fig. et 3 ann. (137 p., 87 tabl.)
- MARIOTTI A., LÉTOLLE R., BLAVOUX B. & CHASSAING B. (1975) - Détermination par la teneur naturelle en ^{15}N , de l'origine des nitrates: résultats préliminaires sur le bassin de Mélarchez (Seine-et-Marne). C.R. Acad. Sci., Paris, France, t. 280, Série D, pp. 423-426, 2 fig.
- MARIOTTI A., BEN HALIMA A. & BERGER G. (1976) - Apport de l'étude isotopique de l'azote à la connaissance de la pollution des aquifères souterrains par les nitrates en milieu agricole (Brie, Beauce - France). Revue Géogr. Phys. Géol. Dyn., Paris, France, (2), Vol. XVIII, pp. 375-384, 1 tabl., 4 fig.
- MARIOTTI A. & LANDREAU A. (1986) - Etude du transfert et de l'évolution des nitrates dans les aquifères au moyen du traçage isotopique naturel ^{15}N . Hydrogéol., Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 1, pp. 77-86, 1 tabl., 9 fig.
- MARIOTTI A. (1986) - La dénitrification dans les eaux souterraines, principes et méthode de son identification: une revue. J. Hydrol., Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Pays-Bas, 88, pp. 1-23
- MARTIN G. (1979) - Le problème de l'azote dans les eaux. Technique et Documentation édit., Paris, France, 273 p., 62 tabl., 109 fig. et 4 ann. (6 p., 5 fig., une ph.)
- MARTIN G. & BONTOUX J. (1981) - Dénitrification. Trib. Cebedeau, Cebedoc édit., Liège, Belgique, n° 457, 34, pp. 527-535, 2 tabl., 7 fig.

- Ministère chargé de la santé (1988) - Teneurs en nitrates des eaux destinées à la consommation humaine en 1985 - 1986 - 1987. Paris, France, 35 p., 7 tabl., 4 cartes, 16 diagr. et 6 ann. (61 p., 19 tabl.)
- PITOT J. (1983) - Conditionnement et valorisation des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., L.C.P.C. édit., Paris, France, n° 125, pp. 17-23, 2 tabl., une fig., 4 ph.
- POHER J. (1988) - Nitrates provenant des installations classées agricoles. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 4, pp. 197-202, 8 tabl.
- PREAUX C. & CAULIER P. (1985) - Etude des moyens destinés à réduire la teneur en nitrates des eaux souterraines prélevées au champ captant d'Airon-Saint-Vaast (Pas-de-Calais) - Partie II: étude de la nappe d'eau souterraine. Rapport pour la ville de Berck-sur-Mer par le Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min., Lezennes, France, 85 SGN 212 NPC, 61 p., 10 fig., 11 tabl., 12 ann. (22 p., une fig., 13 tabl.), 12 pl. h. t. dont une en couleurs au 1/25.000
- PREAUX C. (1988) - Alimentation en eau potable de l'arrondissement de Cambrai (département du Nord) - Constat de l'état actuel de la distribution publique et prospectives d'aménagements. Documents pour le Conseil Général du Département du Nord par le Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min., Lezennes, France, 86 SGN 435 NPC:
Atlas des eaux souterraines de l'arrondissement de Cambrai. Format 61.5 cm X 34.5 cm, 20 p., 6 tabl., 14 fig., 7 encarts (6 fig.), 6 pl. couleurs au 1/100.000;
Rapport technique: dossiers communaux. 671 p., 222 tabl., 116 plans, 88 graph.;
Rapport technique: synthèse. 170 p., 28 tabl., 3 fig. et 17 ann. (129 p., 20 tabl., 16 fig.)
- RAVARINI P., COUTELLE J. & DAMEZ F. (1988) - L'usine de Dennemont. Une unité de dénitrification à grande échelle. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 4, pp. 235-240, 7 tabl., 4 fig.
- RICHARD Y. & LEPRINCE A. (1980) - L'azote dans le traitement des eaux potables - Les traitements biologiques. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 4, pp. 167-181, 6 tabl., 25 fig.
- RICHARD Y. & PARTOS J. (1986) - Elimination biologique des nitrates en vue de la production d'eau potable - Bilan de fonctionnement de deux installations industrielles. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 3, pp. 141-147, 8 tabl., 8 fig.
- RICHARD Y. & BURRIAT J. (1988) - Azurion. Elimination des nitrates par résines échangeuses d'ions. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 4, pp. 227-230, 4 fig., 3 ph.
- RINGUELET R. (1985) - Un bel exemple d'épuration des eaux domestiques poussé jusqu'à la décontamination fécale avec des méthodes naturelles douces et rustiques - le bassin versant de l'étang de Salces-Leucate. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 4, pp.187-201, 3 tabl., 10 fig., 7 ph.

- SCREVE A. (1984) - La dénitrification des eaux d'alimentation. Thèse Pharma., Univ. Lille II, France, 116 p., 5 tabl., 17 fig.
- SEGUIN J.-J. (1984) - Evolution des teneurs en nitrates de la nappe de la craie en région de Picardie - Essai de prévision. Partie rapport pour Agence de l'Eau Artois-Picardie par Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min., Amiens, France, 84 AGI 329 PIC, 26 p., 12 tabl., 12 fig. et 3 ann. (7 p., 1 tabl., 2 fig.)
- SEGUIN J.-J. (1986) - Cartographie automatique en hydrochimie - Application aux teneurs en nitrates de cinq départements du bassin Seine-Normandie. Rapport pour Minist. Env. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 86 SGN 251 EAU, 90 p., 16 tabl., 66 fig. et une ann. (6p.)
- SEGUIN J.-J. & MOREAU F. (1986) - Migration des nitrates dans la zone non saturée de la craie de Champagne - Interprétation des résultats d'une campagne de carottages sous un champ d'épandages d'effluents agricoles - Commantré - Marne. Rapport pour Minist. Env. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 86 SGN 172 EAU, 28 p., 15 tabl., 7 fig. et 4 ann. (10 p., 2 tabl., une fig.)
- SEGUIN J.-J. (1988) - Modélisation globale des transferts de nitrates dans un bassin hydrogéologique pour prévoir l'évolution des concentrations dans les eaux souterraines - Le modèle BICHE - Analyse de sensibilité. Rapport pour Minist. Env. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 88 SGN 369 3E, 106 p., 30 tabl., 57 fig. et 4 ann. (30 p., 14 fig.)
- SEUX R., SOULARD B., BOUTIN P. & BECHAC J.-P. (1985) - Azote et phosphore dans un cours d'eau du Nord de la Bretagne: origine des apports, estimation des flux. Trib. Cebedeau, Cebedoc édit., Liège, Belgique, n° 497, 38, pp. 11-24, 9 tabl., 6 fig.
- SIBONY J. (1979) - Traitement physico-chimique des nitrates et de l'ammoniaque pour la production d'eau potable. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 6, pp. 355-359, 2 tabl., 7 fig.
- SIMON B. (1986) - Apport de la biogéochimie isotopique à la connaissance de la dénitrification dans les eaux souterraines. Thèse 3e cycle, Univ. Pierre et Marie Curie -Paris VI-, France, 148 p., 61 fig., 38 tabl. et 5 ann. (13 p., 4 fig., 2 pl. h. t.)
- SIX P., SPRIT F. & GODFROY B. (1989) - L'interprétation des résultats d'analyses de boues d'épuration assistée par micro-ordinateur. Tech. Sci. Méth. - L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris, France, n° 1, pp. 49-53, 3 fig.
- TALBO H. (1987) - Etude du devenir des nitrates en profondeur sur le site de la coopérative de Ploudaniel (29) - Connaissances acquises au 30-04-87. Rapport pour Cons. Gén. Finistère par Bur. Rech. Géol. Min., Rennes, France, 87 SGN 302 BRE, 46 p., 14 tabl., 20 fig.
- THIERY D. & SEGUIN J.-J. (1985) - Modélisation des transferts de nitrates dans un bassin hydrogéologique pour prévoir l'évolution des concentrations dans les eaux souterraines - Description du modèle BICHE - Trois exemples d'application. Rapport pour Minist. Env. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 85 SGN 663 EAU, 84 p., 9 tabl., 15 fig. et 3 ann. (98 p., 20 tabl., une fig.)

- THIERY D. & SEGUIN J.-J. (1986) - Un modèle hydrogéologique global de transfert de nitrates dans un bassin versant - Application aux sources de Provins et à la nappe de la Beauce à Pithiviers. Hydrogéol., Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n°1, pp. 87-99, 11 tabl., 9 fig.
- VASSEUR G. (1986) - Céréales: une dose d'azote, ça se calcule. Le syndicat agricole, Nord, France, n° 2110 (11-04), 2 p., 7 tabl., une ph.
- VIAUX P. (1983) - Prévoir la fumure azotée des céréales: un calcul difficile. La France agricole, n° 1960 (21-01), 4 p., 1 tabl., 6 fig., 2 ph.
- YOUNG C.-P., OAKES D.-B. & WILKINSON W.-B. (1979) - The impact of agricultural practices on the nitrate content of groundwater in the principal united kingdom aquifers. Conf. Internat. "Environmental Management of agricultural Watersheds", Smolenice, Tchécoslovaquie, (23 au 27-04), 31 p., 10 fig.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

SUR LA TELEDETECTION

- AUMONIER F. (1987) - Télédétection et érosion: la battance dans le Nord de la France. Dipl. Etu. Sup. Spé., Univ. Pierre et Marie Curie -Paris VI-, France, 32 p., 1 tabl., 9 fig., 6 pl. couleurs (20 ph.)
- BECKELYNCK J. & KLESZCZ J.P. (1980) - Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution - Région Nord - Pas-de-Calais, Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, 1/250.000 couleurs, 2 coupes géol.
- BOSSARD R. & VUILLAUME Y. (1975) - Evaluation régionale de l'évapotranspiration et de l'humidité du sol - Possibilités d'emploi des radiomètres à infrarouge et à hyperfréquences sur satellite Nimbus 5. Rapport pour Minist. Indus. Rech. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 75 SGN 427 AME, 38 p., 11 tabl., 8 fig. et 6 ann. (8 p.)
- BRIKKE Y., MARQUIS C., TAUSSAC R. & VILLEMIN J. (1965) - Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France. Ann. Soc. Géol. Nord, Soc. Géol. Nord édit., Lille, France, n° LXXXV, pp. 273-281, 1 tabl., 3 pl. h.t. dont une en couleurs
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) (1988a) - Etude du marais de Guines par télédétection. Rapport pour Région Nord - Pas-de-Calais par Serv. Géol. Rég., Lezennes, France, 88 SGN 171 NPC/TED, 25 p., 1 tabl., 7 fig., une ph. et 3 ann. (32 p., 1 tabl. 26 fig., une ph.)
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) (1988b) - Etude de la faisabilité de mise en évidence des sites de décharges par télédétection. Rapport pour Région Nord - Pas-de-Calais par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 88 DT 011 TED/NPC, 25 p., 5 fig. dont 3 ph.
- CAIRO L., DELANNOY C., GRAHAM I.D.G., STOREY L.R.O., CANCEILL M., DOMAZEWSKI B. & VUILLAUME Y. (1976) - Identification des caractéristiques des images de détecteur multispectral à balayage utile pour la recherche hydrogéologique. Rapport pour Cen. Nat. Rech. Sci. par Cen. Rech. Env. terrestre et planétaire, 19 n° IJ.06, 187 p., 22 tabl., 28 fig. et 2 ann. (25 p., 36 fig. dont 11 en couleurs)
- CASTAING C., DUTARTRE P., FOURNIGUET J., GOUYET J.-F., LANGEVIN C., LOISEAU P., PERNEL F. & POINTET T. (1987) - Etude du massif granitique de Huelgoat (Finistère) - Application de critères géologiques et structuraux à la prospection hydrogéologique dans le socle. Rapport du Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 87 SGN 720 EAU, 48 p., 18 fig. dont 2 en couleurs, 7 pl. dont une en couleurs et 6 h. t.
- CAULIER P. (1974) - Etude des facies de la craie et de leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord. Thèse 3e cycle, Univ. Sci. Tech, Lille, France, 156 p., 37 fig., 7 ann. (94 p., 32 pl. et 126 tabl. h. t.)
- CAZABAT C. et al. (1977) - Carte des structures linéaires de la France. In FRANKEL L. et al. "Les failles françaises". Sciences et Avenir, France, n° spécial hors série 21

- CELET P., CHARVET J. & LERICHE M. (1968) - Carte géologique de la France à 1/50.000: Cambrai. Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 36, 8 p., une carte couleurs
- CHIRON J.-C., AUTRAN A., BRETON J.-P., CHANTRAINE J., CABY R., COLBEAU J.-P., GIGOT P., GROS Y., HACCARD D., ROGER P., LAVILLE P., LE POCHAT G., LESCOP J.-P., MEGNIEN F., MENILLET F., OGIER M. & al. (1980) - Carte tectonique de la France. Mémoire Bur. Rech. Géol. Min., Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 110, 52 p., 2 tabl., une carte 1/1.000.000 couleurs
- COUDOUX J. & LEMAN P. (1985) - Patrimoine antique - Préhistoire et période gallo-romaine. Atlas régional du Nord - Pas-de-Calais, Ass. Dév. Etudes Rég. Inst. Géog. Univ. Lille, Villeneuve d'Ascq, France, Fasc. 5, 26 pl. couleurs, 54 fig.
- DELATTRE C. (1967) - Carte géologique de la France à 1/50.000: Le Cateau. Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, 6 p., une carte couleurs
- DESOIGNIES J. (1966) - Carte géologique de la France à 1/50.000: Douai. Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 27, 20 p., 1 tabl., 3 fig., une carte couleurs
- DESOIGNIES J. (1967) - Carte géologique de la France à 1/50.000: Valenciennes. Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 28, 14 p., 1 tabl., 3 fig., une carte couleurs
- DESOIGNIES J. & SANGNIER P. (1968) - Carte géologique de la France à 1/50.000: Carvin. Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 20, 27 p., 2 tabl., 3 fig., une carte couleurs
- DESOIGNIES J. (1973) - Carte géologique de la France à 1/50.000: Saint-Amand - Crespin. Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 21, 16 p., 2 tabl., une fig., une carte couleurs
- DUCHER G. (1982) - Spacelab ou une autre voie. Bull. Info., Inst. Géog. Nat. édit., Paris, France, n° 44, pp.50-52
- DUTARTRE P., KING C. & MALON J.F. (1983) - Imagerie spatiale - Evaluation d'une étude diachronique. Rapport du Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 83 SGN 723 GEO, 25 p., 5 tabl., 12 fig., 5 pl. h.t. couleurs et 2 ann. (3 p., 1 tabl.)
- DUTARTRE P. & KING C. (1987) - Télédétection régionale - Etude de faisabilité en région Nord - Pas-de-Calais à partir des données Landsat MSS et Spot. Rapport du Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 87 DT 013 TED, 14 p., 1 tabl., 2 pl. h.t.
- European Space Agency / Agence Spatiale Européenne (E.S.A. / A.S.E.) (1984) - Observation de la Terre, Noordwich, Pays-Bas, n° 5
- FOIN P. (1982) - Etat de l'art. Bull. Info., Inst. Géog. Nat. édit., Paris, France, n° 44
- GEORGES M., MOTTI E., POINTET T. & FOURNIGUET J. (1983) - Application de la télédétection à la prospection hydrogéologique en zones arides. Rapport du Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 83 SGN 896 EAU, 35 p., 3 fig., 11 ph. dont 9 en couleurs

- Institut Géographique National (I.G.N.) (1954) - Carte 1/100.000: Valenciennes. Inst. Géog. Nat. édit., Paris, France, n° L-3, couleurs
- Institut Géographique National (I.G.N.) (1955) - Carte 1/100.000: Maubeuge. Inst. Géog. Nat. édit., Paris, France, n° M-3, couleurs
- Institut Géographique National (I.G.N.) (1957a) - Carte 1/100.000: Cambrai. Inst. Géog. Nat. édit., Paris, France, n° L-4, couleurs
- Institut Géographique National (I.G.N.) (1957b) - Photographies aériennes, Inst. Géog. Nat. édit., Paris, France, 1/25.000, panchro.
- Institut Géographique National (I.G.N.) (1971) - Photographies aériennes, Inst. Géog. Nat. édit., Paris, France, 1/25.000, I. R. noir et blanc
- Institut Géographique National (I.G.N.) (1982) - Carte topographique: Charleville-Mézières Maubeuge. Inst. Géog. Nat. édit., Paris, France, n° 5, 1/100.000 couleurs
- Institut Géographique National (I.G.N.) (1982 à 1985) - Bulletins d'informations, Inst. Géog. Nat. édit., Paris, France
- Institut Géographique National (I.G.N.) (1983) - Carte topographique: Laon Arras. Inst. Géog. Nat. édit., Paris, France, n° 4, 1/100.000 couleurs
- Institut Géographique National (I.G.N.) (1985) - Investigation caméra métrique Spacelab 1. Rapport pour Ag. Spa. Eur. par Inst. Géog. Nat., Saint-Mandé, France
- Institut Géographique National (I.G.N.) (1986) - Carte topographique: Lille Dunkerque. Inst. Géog. Nat. édit., Paris, France, n° 2, 1/100.000 couleurs
- KING C. (1986) - Suivi des cultures par télédétection en Beauce - Secteur de Boigneville. Rapport du Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 86 SGN 699 GEO, 10 p., 3 tabl., 2 pl. h. t. couleurs
- KING C., DUTARTRE P. & MALON J.F. (1986) - Analyse de la réponse spectrale des couverts végétaux en milieu tempéré: les données de Thematic Mapper en Beauce chartraine. Rapport du Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 86 SGN 264 GEO, 19 p., 9 fig., une pl. couleurs et 2 ann. (3 p., 3 tabl., 2 fig.)
- KING C. (1988) - Etude de la couverture des dunes du littoral dans le secteur de Calais par télédétection. Rapport pour Rég. Nord - Pas-de-Calais par Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min., Lezennes, France, 88 SGN 289 NPC/TED, 21 p., 1 tabl., une fig., 2 ph. couleurs et 2 ann. (24 p., 18 fig.)
- LAUMONDAIS A., MAURIN A., PAUTRAT J. & THEPOT L. (1983) - Technique de télédétection spatiale dans le Nord de la France. Ann. Soc. Géol. Nord, Soc. Géol. Nord édit., Lille, France, n° CII, pp. 53-56, 7 ph. dont 6 en couleurs
- PAUL S. (1973) - Télédétection et stéréophotogrammétrie dans les sciences de la Terre. Doin édit., Paris, France, 342 p., 11 tabl., 166 fig. et 7 pl. h. t.

- PREAUX C. (1984) - Application de l'étude de deux clichés de Spacelab (01-277-07 et 01-278-07) à l'hydrogéologie de la Région Nord - Pas-de-Calais. Rapport d'investigation pour l'Inst. Géog. Nat. par l'Ecole Univ. Ing. Lille, Villeneuve d'Ascq, France, 20 p., 1 tabl., 4 fig.
- PREAUX C. (1985) - Etude linéaire de l'arrondissement de Cambrai en vue d'applications hydrogéologiques - A partir d'une image Spacelab (01-277-07) agrandie au 1/100.000. Rapport d'investigation pour l'Inst. Géog. Nat. par l'Ecole Univ. Ing. Lille, Villeneuve d'Ascq, France, 11 p., 3 fig.
- RICOUR J. & DUTARTRE P. (1988) - Etude de la fracturation de la zone cotière par télédétection. Rapport pour Région Nord - Pas-de-Calais par Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min., Lezennes, France, 87 SGN 865 NPC/TED, 31 p., 8 fig. 9 pl. et une ann. (5 p., 2 tabl.)
- RICOUR J. (1989) - Perspective d'utilisation de la télédétection dans la région Nord - Pas-de-Calais - Analyse des usages possibles et des moyens à mettre en oeuvre. Rapport pour Région Nord - Pas-de-Calais par Serv. Géol. Rég., Lezennes, France, 89 SGN 052 NPC, 24 p., 5 fig.
- SANGNIER P., BONTE A., WATERLOT G. & CLEMENT B. (1968) - Carte géologique de la France à 1/50.000: Lille - Halluin - Leers. Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 14, 24 p., 1 tabl., 2 fig., une carte couleurs
- SCANVIC J.Y. & WEECKSTEEN G. (1978) - Application de la télédétection à la recherche d'eau en milieu crayeux. Rapport pour Minist. Dév. Indus. Sci. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 78 SGN 209 GEO, 7 p., 2 fig.
- SCANVIC J.Y. (1983) - Utilisation de la télédétection dans les sciences de la Terre. Collection "Manuels et méthodes", Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, 160 p., 5 tabl. 60 fig. et 2 ann.
- SIMON N. (1987) - Télédétection: méthode et application - Etude partielle d'une scène Spot enregistrée sur la façade Manche - Mer du Nord. Dipl. Etu. Appr., Univ. Lille et Paris-Orsay, France, 81 p., 24 tabl., 50 fig., 7 ann. (47 p., 1 tabl., 3 fig., 19 ph. et 5 pl. h.t.)
- S.P.O.T. Image (1983 à 1987) - Documentation diverse
- VOGT J., WEBER C., AUTRAN A., PHILIP H., GOGUEL J., MASSINON R., DELAUNAY J., CHIRON J.-C., FOURNIGUET J., OGIER M., WEECKSTEEN G., ROTHE J.-P., LABROUSTE M., GODEFROY P. (1981) - Carte sismotectonique de la France. Mémoire Bur. Rech. Géol. Min., Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 111, 36 p., 3 tabl., 3 fig., une carte 1/1.000.000 couleurs et document préparatoire 1/500.000
- WATERLOT B. (1971) - Carte géologique de la France à 1/50.000: Le Quesnoy. Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 29, 19 p., 1 tabl., 3 fig., une carte couleurs
- WATERLOT G., WATERLOT B. & LERICHE M. (1969) - Carte géologique de la France à 1/50.000: Avesnes. Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans, France, n° 38, 11 p., 1 tabl., une carte couleurs
- WEECKSTEEN G. (1973) - Mise au point sur les principes, les méthodes et les perspectives de la télédétection appliquée à la géologie. Rapport pour Minist. Dév. Indus. Sci. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, France, 73 SGN 045 GEO, 22 p. et 7 fig.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	3
1.1. Cadre de l'étude	3
1.2. Présentation de la thèse	4
2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	7
2.1. Augmentation préoccupante de la teneur en nitrates de l'eau distribuée	7
2.2. Transfert complexe dans les terrains non saturés au-dessus de la nappe	9
2.2.1. Le site expérimental de Sainghin-en-Mélantois	10
2.2.2. Les sites de Champagne	10
a) Environs de Châlons-sur-Marne	12
b) Connantre	12
2.2.3. Les sites de Béthencourt-sur-Somme	12
2.2.4. Conclusion	13
2.3. Fertilisation et croissance des teneurs en nitrates	13
2.4. Rejets urbains et industriels et croissance des teneurs en nitrates	16
2.5. Dénitrification de l'eau en vue de sa potabilisation	17
2.5.1. Procédés physico-chimiques	18
2.5.2. Procédés biologiques	20
2.5.3. Dénitrification naturelle	23
3. APPROCHE DE L'EMISSION D'AZOTE EN MILIEU AGRICOLE	25
3.1. Introduction	25
3.2. Forte augmentation de la teneur en nitrates de l'eau captée	25
3.3. Plusieurs sources d'azote possibles	25
3.3.1. Eau de pluie	27
3.3.2. Rejets d'eaux usées domestiques et d'eaux résiduares industrielles	27
3.3.3. Lessivage des terres agricoles	27
3.3.4. Infiltration localisée de quantités d'eau importantes suite au ruissellement	29
a) Causes	29
b) Processus	29
3.4. Quantification des différentes sources d'azote	30
3.4.1. Azote apporté par l'eau de pluie	30

3.4.2. Azote issu des rejets d'eaux usées domestiques et d'eaux résiduaires industrielles	31
3.4.3. Azote provenant du lessivage des terres agricoles	31
3.4.4. Azote infiltré suite au ruissellement	32
3.5. Cause principale: les pratiques agricoles récentes	32
3.6. Traitement informatique des données	33
3.7. Conclusion	34
4. APPROCHE DE L'EMISSION D'AZOTE EN MILIEU URBAIN	35
4.1. Diversité des cheminements des eaux usées	35
4.2. Elaboration de la démarche	36
4.3. Développement de la méthode à l'aide d'un traitement informatique	37
4.4. Exemple de la commune de Villers-Outréaux	38
4.4.1. Justification du choix	38
4.4.2. Phase de calage	39
a) Dépouillement de l'enquête communale	39
b) Estimation du flux d'azote à l'entrée de la station	40
c) Comparaison entre les valeurs du flux d'azote calculé et mesuré	40
4.4.3. Etablissement des valeurs du flux d'azote à cartographier	40
a) Au droit de la surface urbaine	40
1) Emission d'azote à partir des eaux usées	40
2) Emission d'azote issue des jardins	42
3) Bilan sur l'ensemble de la surface urbaine	43
b) A l'extérieur de la zone urbaine	43
4.5. Conclusion	45
5. APPLICATION DE LA DEMARCHE DE QUANTIFICATION DES EMISSIONS D'AZOTE A L'ECHELLE D'UN ARRONDISSEMENT	47
5.1. Les outils nécessaires	47
5.2. Une situation préoccupante	47
5.3. Un bilan chiffré	48
5.3.1. Domaine agricole	48
5.3.2. Domaine urbanisé	49
5.3.3. Bilan	50
5.4. Démarche pour l'élaboration d'une cartographie de la teneur en nitrates de la nappe	51
5.4.1. Résultat	51

5.4.2. Démarche: les différents facteurs	51
a) Le flux émis à la surface du sol	52
b) La protection naturelle de la craie	52
c) La dilution par la pluviométrie efficace	52
d) Le retard induit par l'épaisseur des terrains non saturés	52
e) La dilution dans les eaux souterraines	54
f) Les concentrations en nitrates relevées dans la nappe	55
5.4.3. Conclusion	55
5.5. Utilisation de l'infographie	55
6. SOLUTIONS ACTUELLEMENT PROPOSEES ET LEURS LIMITES	57
6.1. En milieu agricole	57
6.1.1. Quantification du besoin exact de la culture en azote	57
6.1.2. Quantification du reliquat d'azote disponible dans le sol	59
6.1.3. Apport fractionné d'azote	60
6.1.4. Utilisation des cultures dérobées	60
6.1.5. Remèdes contre le ruissellement	61
6.1.6. Aspect économique	61
6.2. En milieu urbain	62
6.2.1. Desserte des logements par un réseau d'assainissement	62
6.2.2. Raccordement des logements au réseau d'assainissement	63
6.2.3. Entretien du réseau d'assainissement	64
6.2.4. Regroupement et traitement des eaux usées	64
6.2.5. Lieu de rejet dans le milieu naturel	65
6.3. Conclusion	65
7. APPORT DE LA TELEDETECTION	67
7.1. Revue bibliographique	67
7.1.1. Application à la recherche en eau	68
7.1.2. Occupation du sol	69
7.1.3. Hydromorphisme des sols	70
7.2. Historique du choix des sites d'implantation des ouvrages d'alimentation en eau potable	70
7.2.1. Sur les plateaux	70
7.2.2. Dans les vallées	71
7.2.3. Compromis entre l'implantation sur les plateaux et en vallée	71
7.3. But de l'étude	71

7.4. Satellites et leurs informations	72
7.4.1. Spacelab	72
a) Le vecteur	72
b) Le cliché	72
7.4.2. S.P.O.T.	74
a) Le vecteur	74
b) Le cliché	74
1) Généralités	75
2) Scène analysée	75
7.5. Linéaments et discontinuités du sous-sol	76
7.5.1. Elimination des éléments parasites	76
7.5.2. Comparaison des nouveaux résultats entr'eux et avec les données existantes	76
a) Analyse d'un point de vue qualitatif	76
1) Données utilisées	78
2) Résultats	78
3) Interprétation	83
b) Analyse d'un point de vue quantitatif	83
1) En fonction du nombre d'éléments	83
2) En fonction de la longueur cumulée	84
7.5.3. Bilan de l'analyse linéamentaire	87
7.6. Cartographie de l'occupation du sol: net avantage aux données S.P.O.T.	88
7.6.1. Cliché Spacelab.	88
7.6.2. Cliché S.P.O.T.	89
7.6.3. Bilan de l'analyse de l'occupation du sol	90
7.7. Essais d'évaluation de l'hydromorphisme des terrains recouvrant l'aquifère crayeux	90
7.8. Conclusion	91

8. CONCLUSIONS GENERALES: PERSPECTIVES D'EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DANS LA NAPPE	93
8.1. Différentes hypothèses sur l'évolution des apports d'azote en milieu agricole	93
8.1.1. Facteurs à considérer	93
8.1.2. Arrêt des pertes d'azote d'origine agricole	95
8.1.3. Pertes d'azote d'origine agricole ramenées à celles d'il y a un quart de siècle	96
8.1.4. Pertes d'azote d'origine agricole inchangées	96
8.1.5. Remarques	97

8.2. Différentes hypothèses sur l'évolution des apports d'azote en milieu urbain	98
8.2.1. Facteurs à considérer	98
8.2.2. Arrêt des pertes d'azote en milieu urbain	98
8.2.3. Atténuation des pertes d'azote en milieu urbain	98
8.2.4. Remarques	99
8.3. Quantification de la concentration en nitrates de l'eau qui parviendra à la nappe	99
8.3.1. Hypothèses	99
8.3.2. Résultats	101
8.3.3. Interprétation	102
8.4. Enseignements	102
8.4.1. Le constat	102
8.4.2. La stratégie	104
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES SUR L'AZOTE	107
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LA TELEDECTION	117

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I :	Nombre d'unités de distribution et population concernés par la pollution nitraté (Région Nord - Pas-de-Calais)	3
Tableau II :	Flux spécifiques d'azote émis en fonction de l'occupation agricole du sol	28
Tableau III :	Flux spécifiques d'azote émis en fonction du type de résidus d'élevage et domestiques épandus	29
Tableau IV :	Bilan des émissions annuelles d'azote en fonction de l'origine - Bassin versant du champ captant d'Airon-Saint-Vaast	32
Tableau V :	Taux d'abattement et d'infiltration de l'azote en fonction du mode de transit des eaux usées	36
Tableau VI :	Logements desservis par un réseau d'assainissement: quantification et émission d'azote au droit de la zone urbaine - Commune de Villers-Outréaux (arrondissement de Cambrai)	41
Tableau VII :	Logements non desservis par un réseau d'assainissement: quantification et émission d'azote au droit de la zone urbaine - Commune de Villers-Outréaux (arrondissement de Cambrai)	42
Tableau VIII :	Quantification du flux d'azote rejeté après transit par la station d'épuration- Commune de Villers-Outréaux (arrondissement de Cambrai)	44
Tableau IX :	Bilan des émissions d'azote au droit des terres agricoles de l'arrondissement de Cambrai	48
Tableau X :	Destination de l'azote contenu dans les eaux usées de l'arrondissement de Cambrai	49
Tableau XI :	Variation de la concentration équivalente en nitrates, pour un flux spécifique moyen de 19,3 kg de N/ha/an, en fonction de la pluviométrie efficace	97

Tableau XII:	Répartition de l'épaisseur des terrains non saturés pour l'arrondissement de Cambrai - Temps de parcours de l'eau matricielle (0,50 m/an)	101
Tableau XIII:	Concentration moyenne en nitrates de la lame d'eau qui parvient à la nappe au droit de l'arrondissement de Cambrai	102

LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Schéma d'implantation des équipements sur le site expérimental de Sainghin en Mélançois (Bernard D. et al., 1977)	11
Figure 2	: Schéma d'implantation des cellules poreuses et des tentiomètres à l'intérieur du puits du site expérimental de Sainghin-en-Mélançois (Bernard D. et al., 1977)	11
Figure 3	: Schéma du fonctionnement du système de pluie efficace du site expérimental de Sainghin-en-Mélançois (Ausseur J.-Y. et al., 1979)	11
Figure 4	: Schéma de principe du procédé NITRACYCLE (Deguin A., 1985)	19
Figure 5	: Schéma de principe du procédé AZURION employé à l'usine de Plouenant (Richard Y. et Burriat J., 1988)	19
Figure 6	: Schéma de la ligne de traitement utilisant le réacteur NITRAZUR (Richard Y. et Partos J., 1986)	19
Figure 7	: Schéma de la filière de traitement de l'usine de Dennemont utilisant le procédé BIODENIT (Ravarini P. et al., 1988)	22
Figure 8	: Schéma de principe de la ligne de traitement de la SO.G.E.A. (Hanus F., 1988)	22
Figure 9	: Principe du procédé de dénitrification expérimenté par le B.R.G.M. (Landreau A. et al., 1986)	22
Figure 10	: Courbe de l'évolution des teneurs en nitrates sur les forages du champ captant d'Airon-Saint-Vaast	26
Figure 11	: Combinaison des différents cheminements constatés pour l'azote contenu dans les eaux usées dans l'arrondissement de Cambrai	35

Figure 12 :	Pluie brute et pluie efficace - Moyennes 1956 - 1976 pour l'arrondissement de Cambrai	53
Figure 13 :	Profondeur de la nappe par rapport au sol dans l'arrondissement de Cambrai	53
Figure 14 :	Courbe théorique de réponse à l'azote pour deux types d'efficience (Viaux P., 1983)	59
Figure 15 :	Carte de localisation des prises de vue de SPACELAB (01-277-07 et 01-278-07)	73
Figure 16 :	Emprise de la Scène S.P.O.T. analysée (41/248)	77
Figure 17 :	Discontinuités (sub) linéaires connues	79
Figure 18 :	Linéaments issus de l'analyse des données LANDSAT 1 et 2 (1972 à 1977)	80
Figure 19 :	Linéaments issus de l'analyse des données SPACELAB 1 (1983)	81
Figure 20 :	Linéaments issus de l'analyse des données S.P.O.T. 1 (1987)	82
Figure 21 :	Répartition de l'orientation en fréquence des linéaments	85
Figure 22 :	Répartition de l'orientation en longueur des linéaments	86
Figure 23 :	Modalités de transit d'un soluté au travers des terrains non saturés	94
Figure 24 :	Zones de flux spécifiques d'azote d'origine agricole et répartition de la pluviométrie au droit de l'arrondissement de Cambrai	94

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A: Fiches éditées par le programme ENGRAIS:

- A1: Données;
- A2: Résultats.

ANNEXE B: Organigramme du programme ENGRAIS.

ANNEXE C: Rubriques adoptées pour le cheminement des eaux usées:

- C1: Infiltration au droit de la zone urbaine;
- C2: Infiltration hors de la zone urbaine;
- C3: Exportation par l'écoulement superficiel permanent.

ANNEXE D: Fiches éditées par le programme URBI et ORBI:

- D1: Données;
- D2: Résultats.

ANNEXE E: Organigramme du programme URBI et ORBI.

ANNEXE F: Aspect de l'infographie utilisée pour la réalisation des planches de l'atlas des eaux souterraines de l'arrondissement de Cambrai (3p.).

ANNEXE G: Recherche de sites favorables à l'implantation de captages d'alimentation en eau potable en bordure occidentale de l'Avesnois (Nord) (5 p., une fig.).

ANNEXE A

**FICHES EDITEES
PAR LE PROGRAMME E.N.G.R.A.I.S.**

COMMUNE :

BILAN DE L'AZOTE AGRICOLE

=====

DONNEES

PARTIE I : APPORT D'AZOTE (N) PROVENANT DE LA MINERALISATION
 DU STOCK D'AZOTE DU SOL
 EFFET DU TRAVAIL DU SOL ET DE LA FERTILISATION ARTIFICIELLE

OCCUPATION ET TRAVAIL DU SOL	SURFACES (hectares)	FLUX SPECIFIQUE (kg de N/ha/an)
GRANDE CULTURE : céréales, cultures fourragères et industrielles, plantes sarclées et légumes secs	1885.0	10.0
CULTURES A APPORT PLUS IMPORTANT EN AZOTE : maraichage, cultures légumières, ornementales, vergers	33.0	50.0
SURFACE TOUJOURS EN HERBE (S.T.H.)	560.0	0.0
ZONE BOISEE, VOIES DE COMMUNICATION, FRICHES..	60.0	0.0
PATURES RETOURNEES ENTRE 1973 & 1978	39.0	10.0
'' '' EN 1979	16.0	20.0
'' '' ENTRE 1980 & 1985	18.0	50.0
TERRES LABOURABLES URBANISEES DEPUIS 12 ANS.	10.0	30.0
 SURFACE RURALE TOTALE (S.R.T.)	2538.0	
(4 premiers postes)		
SURFACE AGRICOLE UTILISEE (S.A.U.)	2478.0	
(3 premiers postes)		
TERRES LABOURABLES (2 premiers postes)	1918.0	

PARTIE II : APPORT D'AZOTE (N) PROVENANT DE LA MINERALISATION
 DU STOCK D'AZOTE DU SOL
 EFFET DE LA FERTILISATION DES RESIDUS D'ELEVAGE ET DOMESTIQUES

POPULATION	NOMBRES	FLUX SPECIFIQUES (kgN/unité/an)
BOVINS, CHEVAUX EN ELEVAGE TRADITIONNEL	2440	8.7500
'' EN STABULATION PERMANENTE (Opaturage).	0	17.5000
PORCINS EN ELEVAGE TRADITIONNEL	90	1.5000
'' '' '' INDUSTRIEL	0	3.0000
VOLAILLES EN ELEVAGE TRADITIONNEL	1000	0.0875
'' , LAPINS EN ELEVAGE INDUSTRIEL	0	0.1750
OVINS EN ELEVAGE TRADITIONNEL	100	1.1000
HUMAINS (fosses étanches vidangées, épandues)	1390	3.6500

PARTIE III : APPORT D'AZOTE (N) PROVENANT DE LA MINERALISATION
 DU STOCK D'AZOTE DU SOL
 EFFET DE L'AZOTE CONTENU DANS L'EAU DE PLUIE

FLUX SPECIFIQUE , en kg de N/ha/an	2.3
PLUIE EFFICACE , en mm/an	173

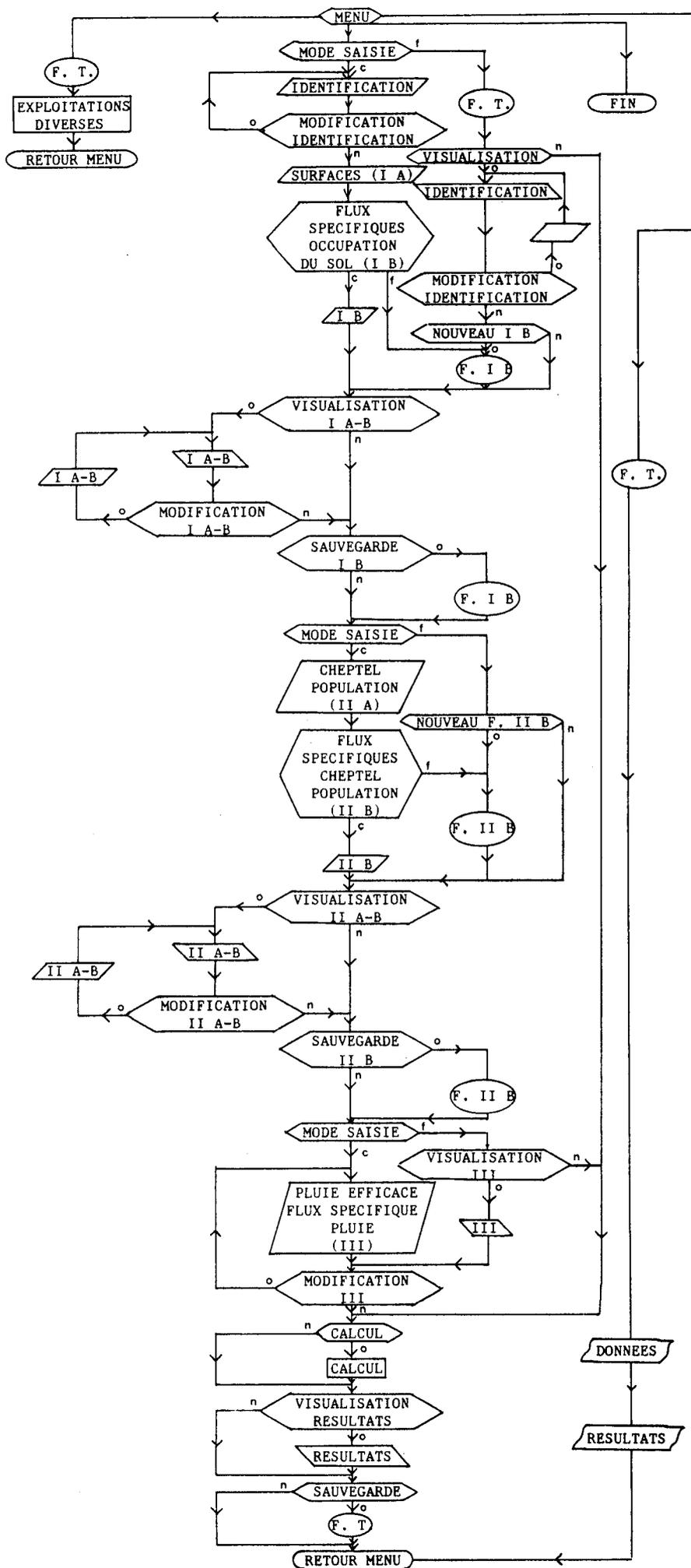
COMMUNE :

BILAN DE L'AZOTE AGRICOLE (suite)
=====RESULTATS
-----SURFACE DE REFERENCE pour le calcul des FLUX SPECIFIQUES
= SURFACE RURALE TOTALE (S.R.T.) : 2538 haPARTIE I : APPORT D'AZOTE (N) PROVENANT DE LA MINERALISATION
..... DU STOCK D'AZOTE DU SOL
EFFET DU TRAVAIL DU SOL ET DE LA FERTILISATION ARTIFICIELLETerres labourables : 75.6 % de la S.R.T.
FLUX TOTAL : 22.41 tonnes N/an
FLUX SPECIFIQUE MOYEN : 8.8 kg N/ha/anPARTIE II : APPORT D'AZOTE (N) PROVENANT DE LA MINERALISATION
..... DU STOCK D'AZOTE DU SOL
EFFET DE LA FERTILISATION DES RESIDUS D'ELEVAGE ET DOMESTIQUESQuantité épanchée
-résidus d'élevage : (21.68)tonnes N/an
-résidus domestiques : (5.07)tonnes N/an
Terres labourables : 77.4 % de la S.A.U.
FLUX TOTAL : 20.71 tonnes N/an
FLUX SPECIFIQUE MOYEN : 8.2 kg N/ha/anPARTIE III : APPORT D'AZOTE (N) PROVENANT DE LA MINERALISATION
..... DU STOCK D'AZOTE DU SOL
EFFET DE L'AZOTE CONTENU DANS L'EAU DE PLUIEFLUX TOTAL : 5.84 tonnes N/an
FLUX SPECIFIQUE MOYEN : 2.3 kg N/ha/anRESUME DU BILAN DE L'AZOTE D'ORIGINE AGRICOLE SUR LA COMMUNE
.....FLUX TOTAL : 48.96 tonnes N/an
FLUX SPECIFIQUE MOYEN : 19.3 kg N/ha/an
dont PARTIE I : 45.8 % du total
PARTIE II : 42.3 % du total
PARTIE III : 11.9 % du total

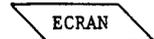
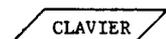
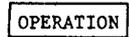
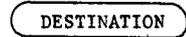
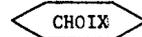
CONCENTRATION MOYENNE
EN PERCOLATION : 49.4 mg de nitrates/l

ANNEXE B

**ORGANIGRAMME
DU PROGRAMME E.N.G.R.A.I.S.**



LEGENDE



c : Clavier

f : Fichier

n : Non

o : Oui

ANNEXE C

**RUBRIQUES ADOPTEES
POUR LE CHEMINEMENT
DES EAUX USEES**

INFILTRATION AU DROIT DE LA ZONE URBAINE

- CAS 1: Population dont les eaux ménagères non raccordées au réseau d'assainissement sont rejetées au caniveau et n'aboutissent pas directement à un écoulement superficiel s'infiltrant au droit de la zone urbaine.
- CAS 2: Population dont les eaux ménagères et population dont les eaux vannes raccordées à un réseau d'assainissement (éventuellement par l'intermédiaire d'un caniveau) n'aboutissent pas à un écoulement superficiel s'infiltrant au droit de la zone urbaine (y compris le dépotage en réseau des vidanges de fosses).
- CAS 3: Population dont les eaux ménagères sont éliminées par épandage souterrain (assainissement individuel).
- CAS 4: Population dont les eaux vannes non raccordées au réseau d'assainissement sont rejetées au caniveau et n'aboutissent pas directement à un écoulement superficiel s'infiltrant au droit de la zone urbaine.
- CAS 5: Population dont les eaux ménagères non raccordées au réseau d'assainissement s'infiltrant au droit de la zone urbaine par l'intermédiaire de puits perdus ou de l'écoulement superficiel.
- CAS 6: Population dont les eaux ménagères raccordées au réseau d'assainissement aboutissent à un écoulement superficiel s'infiltrant au droit de la zone urbaine.
- CAS 7: Population dont les eaux vannes sont éliminées par épandage souterrain (assainissement individuel).
- CAS 8: Population dont les eaux vannes non raccordées au réseau d'assainissement s'infiltrant au droit de la zone urbaine par l'intermédiaire de puits perdus ou de l'écoulement superficiel.
- CAS 9: Population dont les eaux vannes sont épandues sur les jardins (tinettes).

INFILTRATION HORS DE LA ZONE URBAINE

- CAS 1: Population dont les eaux ménagères non raccordées au réseau d'assainissement transitent par un caniveau puis un écoulement superficiel qui s'infiltré à proximité de la zone urbaine.
- CAS 2: Population dont les eaux ménagères non raccordées transitent par un caniveau puis un réseau d'assainissement pour aboutir à proximité de la zone urbaine.
- CAS 3: Population dont les eaux ménagères raccordées (éventuellement par l'intermédiaire d'un caniveau) à un réseau d'assainissement aboutissent directement en bassin (non infiltrant) ou à une station d'épuration (y compris le lagunage) (hormis le cheminement caniveau + réseau + bassin non infiltrant) avant de s'infiltrer à proximité de la zone urbaine.
- CAS 4: Population dont les eaux ménagères non raccordées au réseau d'assainissement sont rejetées en écoulement superficiel qui s'infiltré à proximité de la zone urbaine.
- CAS 5: Population dont les eaux ménagères raccordées au réseau d'assainissement aboutissent à un bassin d'infiltration ou à un écoulement superficiel qui s'infiltré à proximité de la zone urbaine.
- CAS 6: Population dont les eaux vannes non raccordées transitent par un caniveau puis un réseau d'assainissement pour finir par s'infiltrer (après bassin, épuration...) à proximité de la zone urbaine.
- CAS 7: Population dont les eaux vannes non raccordées au réseau d'assainissement sont rejetées au caniveau et aboutissent à un écoulement superficiel qui s'infiltré à proximité de la zone urbaine.
- CAS 8: Population dont les eaux vannes raccordées au réseau d'assainissement (y compris le dépotage des vidanges de fosses) sont épurées (y compris par lagunage) (hormis le cheminement réseau + station d'épuration classique + bassin non infiltrant) avant d'aboutir à une infiltration à proximité de la zone urbaine (y compris le dépotage des vidanges de fosses en station d'épuration).
- CAS 9: Population dont les eaux vannes non raccordées au réseau d'assainissement sont rejetées en écoulement superficiel qui s'infiltré à proximité de la zone urbaine (y compris le dépotage sauvage des vidanges de fosses).
- CAS 10: Population dont les eaux vannes raccordées au réseau d'assainissement sont rejetées en bassin d'infiltration ou en écoulement superficiel qui s'infiltré à proximité de la zone urbaine.

EXPORTATION PAR L'ÉCOULEMENT SUPERFICIEL PERMANENT

- CAS 1: Population dont les eaux ménagères non raccordées au réseau d'assainissement transitent par un caniveau et aboutissent à un écoulement superficiel permanent.
- CAS 2: Population dont les eaux ménagères non raccordées transitent par un caniveau puis un réseau d'assainissement pour aboutir (directement, après bassin, épuration) à un écoulement superficiel permanent.
- CAS 3: Population dont les eaux ménagères raccordées à un réseau d'assainissement aboutissent (après bassin ou épuration) à un écoulement superficiel permanent.
- CAS 4: Population dont les eaux ménagères non raccordées au réseau d'assainissement sont rejetées en écoulement superficiel permanent.
- CAS 5: Population dont les eaux ménagères raccordées au réseau d'assainissement aboutissent à un écoulement superficiel permanent.
- CAS 6: Population dont les eaux vannes non raccordées transitent par un caniveau puis un réseau d'assainissement pour aboutir (directement, après bassin et/ou épuration) à un écoulement superficiel permanent.
- CAS 7: Population dont les eaux vannes non raccordées au réseau d'assainissement sont rejetées au caniveau et aboutissent à un écoulement superficiel permanent.
- CAS 8: Population dont les eaux vannes raccordées au réseau d'assainissement (y compris le dépotage des vidanges de fosses) sont épurées (y compris par lagunage) (hormis le cheminement réseau + station d'épuration + bassin) avant d'aboutir en écoulement superficiel permanent (prendre en compte le dépotage direct des vidanges de fosses en station d'épuration).
- CAS 9: Population dont les eaux vannes non raccordées au réseau d'assainissement sont rejetées en écoulement superficiel permanent (y compris le dépotage sauvage des vidanges de fosses).
- CAS 10: Population dont les eaux vannes raccordées au réseau d'assainissement sont rejetées en écoulement superficiel permanent.

ANNEXE D

**FICHES EDITEES
PAR LE PROGRAMME
URBI ET ORBI**

COMMUNE :

AGGLOMERATION

BILAN DE L'AZOTE DOMESTIQUE

DONNEES

CAS	POPULATION CONCERNEE	FLUX g de N/jour
1	156	0 a 2
2	482	0 a 2
3	0	2 a 4
4	9	2 a 4
5	356	4 a 6
6	0	4 a 6
7	0	4 a 6
8	356	8 a 10
9	9	8 a 10

PARTIE I

INFILTRATION AU DROIT
DE LA ZONE URBANISEE

31.6 : SUPERFICIE URBANISEE (en hectares)
 11.8 : SUPERFICIE EN JARDINS (en hectares)
 27.2 : FLUX SPECIFIQUE POUR JARDINS (en kg de N/hectare/an)
 792 : POPULATION DU LIEU

CAS	POPULATION CONCERNEE	FLUX g de N/jour
1	156	2 a 4
2	0	2 a 4
3	0	2 a 4
4	12	4 a 6
5	0	4 a 6
6	0	4 a 6
7	0	6 a 8
8	0	6 a 8
9	0	8 a 10
10	0	8 a 10

PARTIE II

INFILTRATION HORS
DE LA ZONE URBANISEE

CAS	POPULATION CONCERNEE	FLUX g de N/jour
1	0	2 a 4
2	9	2 a 4
3	241	2 a 4
4	0	4 a 6
5	0	4 a 6
6	0	4 a 6
7	0	6 a 8
8	241	6 a 8
9	0	8 a 10
10	0	8 a 10

PARTIE III

EXPORTATION EN ECOULEMENT
SUPERFICIEL PERMANENT

PARTIE IV : EXPORTATION SUR LA SURFACE AGRICOLE UTILISEE (S.A.U.)

POPULATION CONCERNEE : 190 personnes
 FLUX : 10 g de N/jour

COMMUNE :

RESULTATS

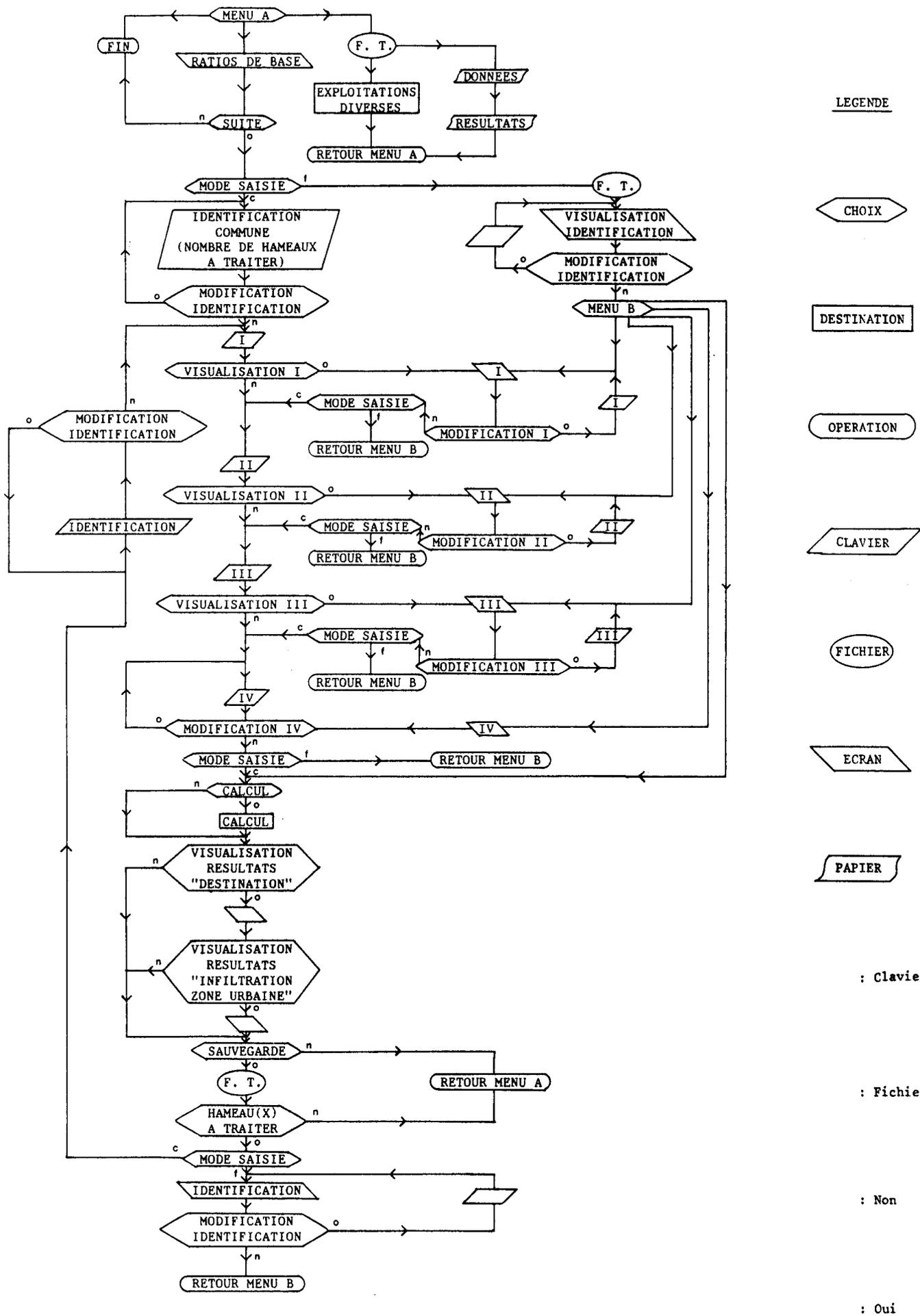
BILAN DE L'AZOTE DOMESTIQUE

AGGLOMERATION				RECAPITULATIF
POPULATION :	FLUX	PART		
= 98.5 % de l'ensemble	kg N/an	%		
Infiltration au droit de l'asslomération	2093	54.1	48.3	DU DEVENIR
Infiltration hors de l'asslomération	193	5.0	4.4	DE L'AZOTE
Exportation par l'écoulement superficiel permanent	890	23.0	20.5	D'ORIGINE
Exportation sur la Surface Agricole Utilisée (S.A.U.)	694	17.9	16.0	DOMESTIQUE
Libération après abattement par population agglomérée	3869	100.0	89.2	
Production totale par la population agglomérée	4336		100.0	

PERTE D'AZOTE AU DROIT DE(S) ZONE(S) URBANISEE(S)	SURFACES hectares	FLUX SPECIFIQUES kg N/ha/an	FLUX kg N/an	PART %
AGGLOMERATION				
Surface urbanisée (s.s.)	31.6	65.2	2062	85.4
Jardins (s.s.)	11.8	27.2	321	13.3
Tinettes		2.6	31	1.3
BILAN	43.4	55.6	2414	100.0

ANNEXE E

**ORGANIGRAMME
DU
PROGRAMME URBI ET ORBI**



I : Infiltration au droit de l'agglomération

II : Infiltration totale hors de l'agglomération

III : Exportation par l'écoulement superficiel permanent

IV : Exportation sur la Surface Agricole Utilisée (S.A.U.)

ANNEXE F

**ASPECT DE L'INFOGRAPHIE UTILISEE
POUR LA REALISATION DES PLANCHES
DE L'ATLAS DES EAUX SOUTERRAINES
DE L'ARRONDISSEMENT DE CAMBRAI**

1. Caractéristiques du système

Le moyen utilisé et le système Intergraph équipé des processeurs spécifiques de façon à tenir compte des besoins propres de la Cartographie Assistée par Ordinateur (C.A.O.). L'architecture générale repose sur:

- un poste de travail (table à digitaliser, écrans, clavier, menu) interactif graphique muni d'une intelligence locale qui autorise des traitements rapides et complexes. La station graphique haute performance permet la saisie et la visualisation d'un ensemble dense sur un premier écran et des sous-ensembles thématiques sur un second écran à partir d'extraction provenant du premier écran;
- un logiciel de C.A.O. interactif gérant les données graphiques et alphanumériques.

La structuration générale est classique, du type répertoires et fichiers. De nombreuses fonctions permettent de copier, transférer... des éléments graphiques. Ceci à l'image de ce qu'effectue un logiciel de traitement de texte avec des mots ou des groupes de mots. De nombreuses commandes sont naturellement propres aux exigences graphiques (rotation...).

2. Première étape: la saisie des données

Chacune des planches représente un fichier de base de données contenant jusqu'à 63 niveaux différents. Un niveau est créé pour chaque type de représentation surfacique.

Les données sont enregistrées avec précision sous forme d'éléments graphiques dans les fichiers du logiciel de conception graphique interactive (I.G.D.S.). La saisie s'est opérée selon trois modalités:

- la digitalisation: à ce stade, il importe de distinguer les éléments ponctuels et linéaires, qui seront ultérieurement gravés, des zones fermées qui relèveront du pelliculage;
- le clavier: les données alphanumériques et les symboles sont directement générés sur écran. Les symboles sont placés dans une bibliothèque puis disposés sur site;

- le transfert: les points de mesures proviennent des opérations suivantes:

- 1) extraction, à partir d'une base de données régionale, des coordonnées spatiales x et y et de diverses caractéristiques (prélèvement, utilisation...);
- 2) saisie et/ou mise à jour sous éditeur;
- 3) transformation directe sous forme de fichiers graphiques en imposant un type de représentation.

Exemple: à partir d'un tel fichier ont directement été représenté sur la planche V de l'Atlas (document n° 5):

- . l'importance du prélèvement par un cercle de taille variable;
- . l'utilisation par le type de trait (paterne);
- . la teneur en nitrates par une coloration de la zone ainsi limitée.

Le système Intergraph permet une interactivité (d'où sa dénomination) importante entre l'opérateur et la station graphique. L'un de ses aspects est la visualisation.

Les niveaux peuvent être affichés à l'écran dans n'importe quelle combinaison pour satisfaire des besoins spécifiques. Il est possible d'avoir 8 vues indépendantes d'un même segment.

Diverses techniques d'utilisation des couleurs et des configurations permettent, à l'écran, l'obtention des distinctions par:

- couleurs, 256 nuances peuvent être affichées à partir d'une palette de 16 millions;
- coloriage de surface;
- création de tramages, hachures et paternes;
- type de lettre;
- suppression de lignes cachées, ombrage selon la perspective (non utilisé dans le cadre des planches de l'Atlas).

3. Deuxième étape: les restitutions

Le système de tracé d'Intergraph supporte actuellement divers dispositifs de sortie permettant de produire:

- des brouillons par tracé stylo-bille sur papier, calque, support transparent stable. Cela permet des éditions sélectives pour correction ou utilisation comme document de travail pour des saisies ultérieures;
- des sorties couleurs par traceur électrostatique;

- des gravures et découpes sur supports ad hoc directement utilisables pour la réalisation des films.

Auparavant, il convient de définir les teintes (en général à partir du mélange des couleurs fondamentales jaune, magenta, cyan et noir), ainsi que le diamètre des outils pour les éléments ponctuels et linéaires. Sur un même support est regroupé tout ce qui concerne un pourcentage identique d'une couleur quels que soient les niveaux et outils. Cette opération est effectuée à partir d'un traceur à plume. A l'aval, viennent les opérations classiques de pelliculage, photocomposition des légendes, habillage, fabrication des films, essai sur support Cromalin, correction. Ceci, dans le cadre d'une impression par procédé offset.

ANNEXE G

RECHERCHE DE SITES FAVORABLES A L'IMPLANTATION DE CAPTAGES D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE EN BORDURE OCCIDENTALE DE L'AVESNOIS (Nord)

Cette annexe présente une mise en oeuvre complète de la méthodologie proposée par H. Maillot et al. (1988) pour une recherche de sites favorables à l'implantation de captages d'alimentation en eau potable.

L'étude est destinée à l'amélioration de la distribution publique de 5 groupements situés à la limite des arrondissements de Valenciennes, Cambrai et Avesnes sur Helpe (figure). Cet ensemble représente 20 000 habitants répartis en 21 communes, la desserte est assurée par le Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau du Nord (S.I.D.E.N.) à raison de 2 100 à 2 400 m³/jour.

La contribution financière est réalisée par le S.I.D.E.N., l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et le Ministère de l'Environnement.

La partie technique a été confiée au Service Géologique Régional Nord - Pas-de-Calais du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (S.G.R. - N.P.C. du B.R.G.M.) et au Laboratoire Cycle Urbain de l'Eau - Pollution des Eaux de l'Ecole Universitaire D'Ingénieurs de Lille (E.U.D.I.L.).

Le déroulement de l'étude s'est étalé sur 4 années (fin 1984 à fin 1988) et peut être scindé en 9 opérations.

1ère opération (Préaux C., 1984 - Préaux C., 1985)

Cette phase consiste en l'examen de clichés satellitaires afin de mettre en évidence les linéaments pouvant correspondre à des accidents tectoniques.

La démarche présentée au paragraphe 7.5.1. du présent document a permis de sélectionner une quinzaine d'éléments à partir des photos du vecteur navette spatiale des Etats-Unis d'Amérique - laboratoire Spacelab européen.

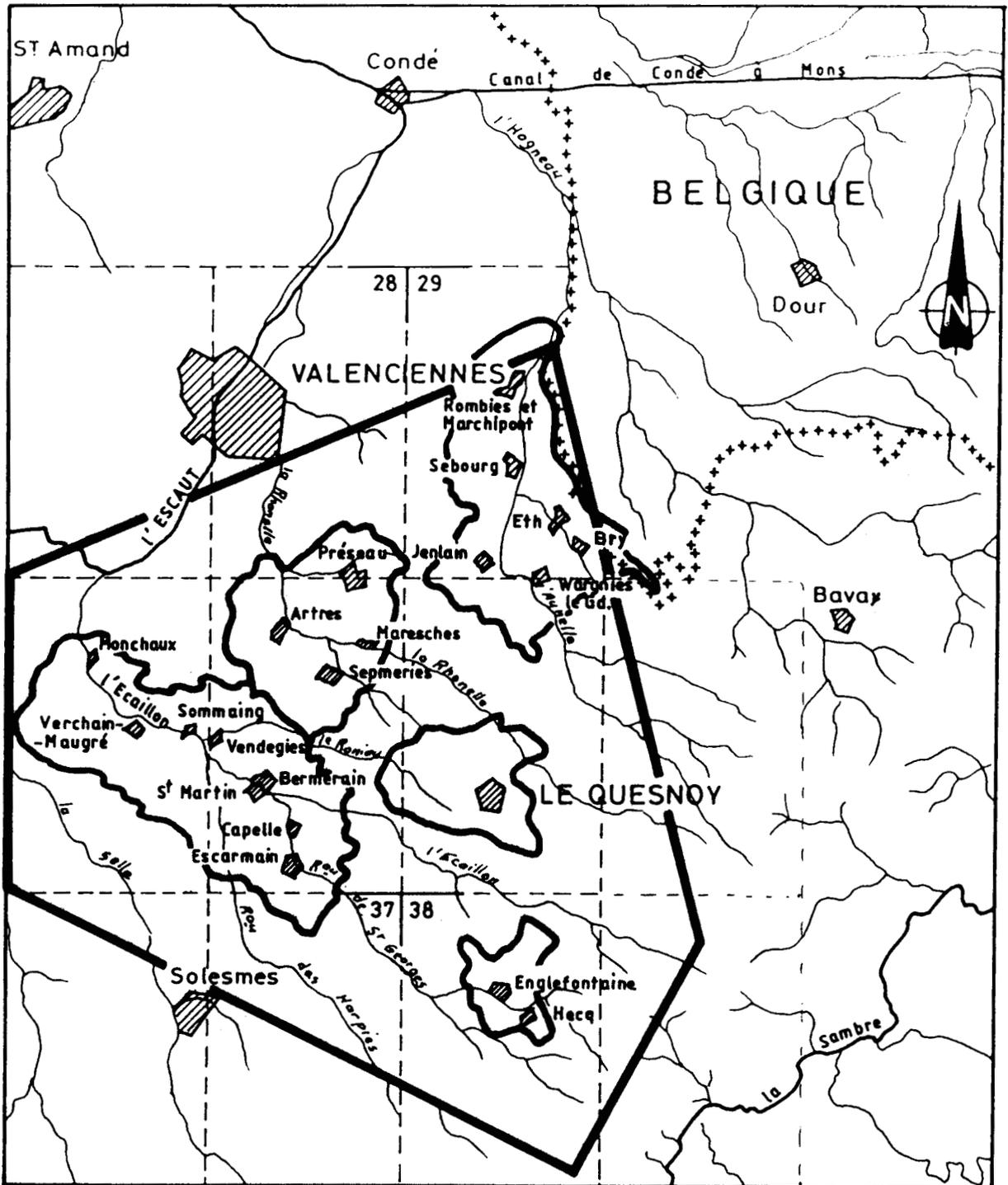
L'échelle des documents est le 1/820 000, le 1/500 000 et le 1/100 000.

2ème opération (Caulier P., 1986)

Il s'agit de l'analyse du contexte hydrogéologique. L'étude porte sur:

- la présence du recouvrement argileux d'âge tertiaire (Landénien);
- la profondeur des marnes bleues du Turonien moyen (substratum de l'aquifère);
- la profondeur de la nappe de la craie du Séno-Turonien supérieur;
- l'épaisseur de craie mouillée (déduite des 2 derniers points).

PLAN DE SITUATION DE LA REGION ETUDIEE
(CAULIER P., 1986).



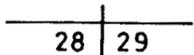
Echelle: 1/200 000



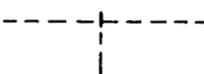
Limite de la zone d'étude



Contours des unités de distribution intéressées



Limites de feuilles au 1/50 000 et n° correspondant



Limites des huitièmes de feuilles au 1/50 000

Il en résulte que:

- l'assise landénienne ne subsiste que sur les plateaux, en-dessous des limons;
- la nappe est absente dans les principales vallées;
- l'épaisseur de craie mouillée est inférieure à 10 m sur la majeure partie de la zone d'étude.

La superposition des données des deux premières opérations conduit à sélectionner 13 sites pour un développement ultérieur.

3ème opération (De Goyon A. et Szyjka P., 1986)

La vérification de l'intérêt des linéaments débute par la prospection géophysique:

- sismique réfraction pour la détermination des réseaux de fracturation de la craie et celle de la nature des différents terrains en présence;
- sondages électriques pour la profondeur à partir de laquelle l'influence de la nappe se fait sentir et pour celle du toit du Turonien moyen;
- profils de résistivité pour la largeur des couloirs de fracturation.

Un étalonnage est absolument nécessaire avant d'entreprendre les premières mesures.

Pour les deux sites étudiés, la présence d'accidents est confirmée et des directions perpendiculaires de fracturation sont mises en évidence.

4ème opération (Préaux C. - Paragraphe 7.4.2. b et 7.5. du présent document)

Un cliché satellitaire S.P.O.T. a été spécialement commandé (nébulosité, longueur d'onde, traitement, support) pour une utilisation maximale tant d'un point de vue recherche de linéaments que pour l'analyse de l'occupation du sol (échelle 1/100 000).

De nouveaux linéaments, souvent différents des précédents, sont mis en évidence.

5ème opération (Caulier P.)

Détermination de nouveaux sites à partir de l'ensemble des données disponibles.

6ème opération (Bourgain J.-M., 1987)

Mise au point des conditions techniques (émulsions, filtres...) pour la prise de vue aéroportée de clichés infrarouges.

Les linéaments issus de l'étude des données S.P.O.T. sont confirmés. Leur trace est cependant moins linéaire mais la largeur, aisément déterminable, apparaît constante.

La réalisation de bloc diagramme permet de déceler et de visualiser d'éventuelles convergences entre la topographie et les linéaments.

7ème opération (Cuénil J.-L. et Dupont G., 1987)

La prospection géophysique (sismique et électrique) porte sur 7 sites marqués par l'intersection de 8 linéaments dont 2 se marquent bien, 1 partiellement et 3 ponctuellement. Deux sites de captage sont proposés.

8ème opération (Caous J.-Y., 1988)

La prospection géophysique électrique de 5 sites met en évidence 2 failles vraisemblables et 3 autres possibles.

9ème opération (Caous J.-Y., 1988)

Huit forages de reconnaissance totalisant une profondeur de 232 m sont réalisés.

Le bilan est le suivant:

- absence d'aquifère pour 2 ouvrages;
- absence de nappe pour 1 ouvrage;
- pas de débit pour 1 ouvrage;
- faible productivité pour 2 ouvrages;
- moyenne productivité pour 1 ouvrage;
- bonne productivité pour 1 ouvrage.

Les 4 derniers forages de reconnaissance permettent d'espérer respectivement des débits maximum de l'ordre de 25, 30, 80 et 225 m³/h.

*

* *

En conclusion, cette méthode amène à procéder par étapes dans des secteurs où la recherche de l'eau est très aléatoire; les risques d'échec sont ainsi diminués.

L'étude des clichés satellitaires procure une première sélection "au bureau".

Le survol aérien, les prises de vue infrarouges aéroportées et la visualisation au sol des sites retenus entraînent un second tri.

La prospection géophysique permet d'éliminer les secteurs sans aquifère ou sans nappe et les artéfacts (galeries souterraines, anciennes limites parcellaires...).

Enfin, le sondage de reconnaissance lève les dernières inconnues, la productivité et la qualité (la teneur en nitrates du site le plus productif est de 52 mg/l !).

R E F E R E N C E S B I B L I O G R A P H I Q U E S

- BOURGAIN J.-M. (1987) - Exploitation de documents adaptés à une prospection hydrogéologique. Projet de fin d'études, Ecole Univ. Ing. Lille, Villeneuve d'Ascq, France, 31 p., 14 fig., 2 ph. et une ann. (une p., 2 fig.)
- CAOUS J.-Y. (1988) - Recherche de sites favorables à l'implantation de captages d'alimentation en eau potable en bordure occidentale de l'Avesnois (Nord) (Phase II). Rapport pour Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau du Nord par le Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min., Lezennes, France, 88 SGN 211 NPC, 26 p., 2 tabl., une fig. et 3 ann. (65 p., 48 tabl., 43 fig.)
- CAULIER P. (1986) - Recherche de sites favorables à l'implantation de captages d'alimentation en eau potable en bordure occidentale de l'Avesnois (Nord) (Phase I). Rapport pour Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau du Nord par le Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min., Lezennes, France, 86 SGN 599 NPC, 33 p., 5 tabl., 9 fig., 6 pl. h. t.
- CUENIN J.-L. & DUPONT G. (1987) - Prospection géophysique appliquée à la recherche d'aquifères à la limite Cambrésis - Avesnois (Phase II). Projet de fin d'études, Ecole Univ. Ing. Lille, Villeneuve d'Ascq, France, 30 p., 6 tabl., 8 fig. et 4 ann. (36 p., 4 tabl., 48 fig., 2 pl.)
- DE GOYON A. & SZYJKA P. (1986) - Prospection géophysique appliquée à la recherche d'aquifères à la limite Cambrésis - Avesnois (Phase I). Projet de fin d'études, Ecole Univ. Ing. Lille, Villeneuve d'Ascq, France, 48 p., 18 tabl., 24 fig.
- MAILLOT H., PREAUX C., DE GOYON A., SZYJKA P., BOURGAIN J.-M., CUENIN J.-J. & DUPONT G. (1988) - Recherche régionale sur la mise au point de mesures géophysiques et son application à l'hydrogéologie et à l'assainissement. Compte rendu de convention de recherche pour le Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau du Nord par l'Ecole Univ. Ing. Lille, Villeneuve d'Ascq, France, Vol. ronéot., Voir détail de l'ensemble du contrat par auteur
- PREAUX C. (1984) - Application de l'étude de deux clichés de Spacelab (01-277-07 et 01-278-07) à l'hydrogéologie de la Région Nord - Pas-de-Calais. Rapport d'investigation pour l'Inst. Géog. Nat. par l'Ecole Univ. Ing. Lille, Villeneuve d'Ascq, France, 20 p., 1 tabl., 4 fig.
- PREAUX C. (1985) - Etude linéaire de l'arrondissement de Cambrai en vue d'applications hydrogéologiques - A partir d'une image Spacelab (01-277-07) agrandie au 1/100.000. Rapport d'investigation pour l'Inst. Géog. Nat. par l'Ecole Univ. Ing. Lille, Villeneuve d'Ascq, France, 12 p., 3 fig.



RESUME

Impact des pratiques agricoles et du défaut d'assainissement sur la teneur en nitrates des eaux souterraines: application à l'arrondissement de Cambrai (Nord - France)

La pollution nitratée des eaux souterraines de la région Nord-Pas-de-Calais captées pour l'alimentation humaine est étudiée pour deux secteurs de la nappe de la craie du Sénonien-Turonien.

Le premier secteur concerne le bassin versant du champ captant de Berck-sur-Mer. Les apports azotés à la nappe y sont d'origine essentiellement agricole et proviennent de la surfertilisation et des infiltrations massives consécutives au ruissellement.

Le second secteur intéresse l'arrondissement de Cambrai. Une démarche quantifiant l'émission d'azote issu des eaux usées urbaines en fonction du cheminement des effluents est présentée. Elle souligne le faible taux de raccordement des logements au réseau d'assainissement ainsi que le rejet puis l'infiltration des eaux usées, épurées ou non, dans des cours d'eau perchés au-dessus de la nappe. Néanmoins les pratiques agricoles modernes demeurent les principales sources de nitrates.

La méthode suivie pour l'élaboration d'une carte des teneurs en nitrates de la nappe est exposée à partir des paramètres utilisés (émission, pluviométrie, géologie...). L'ensemble est présenté dans l'atlas des eaux souterraines de l'arrondissement de Cambrai réalisé à l'aide de moyens infographiques.

Des solutions et leurs limites d'application, visant à diminuer les émissions d'azote sont proposées. L'impact de ces remèdes sur la lame d'eau qui parvient à la nappe est envisagé.

Compte tenu de la lenteur du transfert vertical du stock d'azote d'origine agricole contenu dans les terrains non saturés se dégagent des perspectives d'augmentation de la teneur en nitrates de l'eau de la nappe pour les prochaines décennies.

Aussi, l'utilisation d'outils telle que la télédétection spatiale peut favoriser l'implantation de nouveaux ouvrages. Cette technique permet de marquer les discontinuités du sous-sol (aspect quantitatif) et l'occupation du sol (aspect qualitatif).

Mots clefs : Région Nord-Pas-de-Calais, arrondissement de Cambrai, eaux souterraines, nitrate, agriculture, assainissement, zone non saturée, télédétection.

ABSTRACT

Consequence of agricultural practices and lack of sanitation on nitrate content in groundwater: application to the district of Cambrai (North of France)

Nitrate pollution of groundwater in the Nord-Pas-de-Calais Region caught for a human supply purpose is studied on two areas of the senonian - turonian chalk aquifer.

The first area is related to the watershed of Berck-sur-Mer capturing zone. Nitrogen supplies to the water table are mainly agricultural derived and are caused by overfertilization and infiltration following upon runoff.

The second area comprises the district of Cambrai. A method quantifying emissions of nitrogen, derived from urban wastewater, related to the course of effluents is presented. It points out the low level of houses connected to the sewerage system and the disposal, then infiltration of wastewater, purified or not, in the perched streams. Nevertheless, modern agricultural practices remain the principal nitrogen supplies.

The method used for the conception of a nitrate concentration map for the water table is based on the following parameters: emission, pluviometry, geology... The whole set is presented in the atlas of groundwater in Cambrai district, carried out with map processing means.

The solutions, with their application limits, wanting to reduce the nitrogen emissions are proposed. The impact of these actions on the water reaching the water table is envisaged.

According to the low velocity for the vertical transfer of agricultural derived nitrogen stock, present in the unsaturated zone, some prospects in the increasing of nitrate content in the water table are pointed out for the decades.

So, the using of such techniques as remote sensing could favour the installation of new groundwater intake. This method enable to point out underground discontinuities (on a quantitative way) and land use (on a qualitative way).

Key words : Nord-Pas-de-Calais Region, district of Cambrai, groundwater, nitrate, agriculture, sanitation, unsaturated zone, remote sensing.