

**THESE
POUR LE DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN PHARMACIE**

**Soutenue publiquement le mardi 3 juillet 2012
Par Mademoiselle MAERTEN Nadège**

**La Phytoremédiation :
un moyen de lutter contre la pollution de l'air à l'intérieur des locaux ?**

Membres du jury :

Président : Monsieur **CUNY Damien**, Professeur des Universités, Laboratoire des Sciences végétales et fongiques, Université Lille II

Assesseur : Madame **GRAVE Béatrice**, Maître de conférences des Universités, Laboratoire de Toxicologie, Université Lille II

Membre extérieur : Madame **CUNY Marie Amélie**, Docteur en Sciences, Chargée d'étude à l'Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique



**Faculté des Sciences Pharmaceutiques
et Biologiques de Lille**



**Université Lille 2
Droit et Santé**

3, rue du Professeur Laguesse - B.P. 83 - 59006 LILLE

Université Lille 2 – Droit et Santé

Président :	Professeur Christian SERGHERAERT
Vice- présidents :	Professeur Véronique DEMARS Professeur Marie-Hélène FOSSE-GOMEZ Professeur Régis MATRAN Professeur Salem KACET Professeur Paul FRIMAT Professeur Xavier VANDENDRIESSCHE Professeur Patrick PELAYO Madame Claire DAVAL Madame Irène LAUTIER Monsieur Larbi AIT-HENNANI Monsieur Rémy PAMART
Secrétaire général :	Monsieur Pierre-Marie ROBERT

Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques

Doyen :	Professeur Luc DUBREUIL
Vice-Doyen, 1 ^{er} assesseur :	Professeur Damien CUNY
Assesseurs :	Mme Nadine ROGER Professeur Philippe CHAVATTE
Chef des services administratifs :	Monsieur André GENY

Liste des Professeurs des Universités :

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	ALIOUAT	El Moukhtar	Parasitologie
Mme	AZAROUAL	Nathalie	Physique
M.	BAILLEUL	François	Pharmacognosie
M.	BERTHELOT	Pascal	Chimie Thérapeutique 1
M.	BROUSSEAU	Thierry	Biochimie
Mme	CAPRON	Monique	Immunologie
M.	CAZIN	Jean-Louis	Pharmacologie – Pharmacie clinique
M.	CHAVATTE	Philippe	Chimie Thérapeutique
M.	COURTECUISSÉ	Régis	Sciences végétales et fongiques
M.	CUNY	Damien	Sciences végétales et fongiques
Mlle	DELBAERE	Stéphanie	Physique
M.	DEPREZ	Benoît	Chimie Générale
Mme	DEPREZ	Rebecca	Chimie Générale
M.	DUPONT	Frédéric	Sciences végétales et fongiques
M.	DURIEZ	Patrick	Physiologie
Mlle	GAYOT	Anne	Pharmacotechnie Industrielle
M.	GESQUIERE	Jean-Claude	Chimie Organique
M.	GOOSSENS	Jean François	Chimie Analytique
Mme	GRAS	Hélène	Chimie Thérapeutique 3
M.	IMBENOTTE	Michel	Toxicologie
M.	LEMDANI	Mohamed	Biomathématiques
Mme	LESTAVEL	Sophie	Biologie Cellulaire
M.	LUC	Gerald	Physiologie

Mme	MELNYK	Patricia	Chimie Générale
Mme	MUHR – TAILLEUX	Anne	Biochimie
Mme	PAUMELLE-LESTRELIN	Réjane	Biologie Cellulaire
Mme	PERROY – MAILLOLS	Anne Catherine	Droit et déontologie pharmaceutique
Mlle	ROMOND	Marie Bénédicte	Bactériologie
Mme	SAHPAZ	Sevser	Pharmacognosie
M.	SIEPMANN	Juergen	Pharmacotechnie Industrielle
M.	STAELS	Bart	Biologie Cellulaire
M	TARTAR	André	Chimie Organique
M.	VACCHER	Claude	Chimie Analytique
M.	VION	Daniel	Droit et déontologie pharmaceutique

Liste des Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M	BRUNET	Claude	Pharmacologie
M.	DINE	Thierry	Pharmacie clinique
M.	DUBREUIL	Luc	Bactériologie et Virologie Cliniques
M.	DUTHILLEUL	Patrick	Hématologie
M.	GAMOT	André	Chimie Analytique
M.	GRESSIER	Bernard	Pharmacologie
M.	LHERMITTE	Michel	Toxicologie
M.	LUYCKX	Michel	Pharmacie clinique
M.	ODOU	Pascal	Pharmacie Galénique
M.	DEPREUX	Patrick	Chimie Organique (ICPAL)
M.	BONTE	Jean-Paul	Chimie Analytique et (ICPAL)

Liste des Maitres de Conférences

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	AGOURIDAS	Laurence	Chimie Générale
Mme	ALIOUAT	Cécile Marie	Parasitologie
Mme	AUMERCIER	Pierrette	Biochimie
Mme	BANTUBUNGI	Kadiombo	Biologie cellulaire
Mme	BARTHELEMY	Christine	Pharmacie Galénique
M.	BEGHYN	Terence	Chimie Thérapeutique 3
Mme	BEHRA	Josette	Bactériologie
M.	BERTHET	Jérôme	Physique
M.	BERTIN	Benjamin	Immunologie
M.	BLANCHEMAIN	Nicolas	Pharmacotechnie industrielle
M.	BOCHU	Christophe	Physique
M.	BOUTILLON	Christophe	Chimie Organique
M.	BRIAND	Olivier	Biochimie
Mme	CACHERA	Claude	Biochimie
M.	CARATO	Pascal	Chimie Thérapeutique 2
M.	CARNOY	Christophe	Immunologie
Mme	CARON	Sandrine	Biologie cellulaire
Mlle	CHABÉ	Magali	Parasitologie
Mlle	CHARTON	Julie	Chimie Organique
M	CHEVALIER	Dany	Toxicologie
M.	COCHELARD	Dominique	Biomathématiques
Mlle	DANEL	Cécile	Chimie Analytique
M.	DE FOUCAULT	Bruno	Sciences végétales et fongiques
Mme	DEMANCHE	Christine	Parasitologie
Mlle	DEMARQUILLY	Catherine	Biomathématiques
Melle	DUMONT	Julie	Biologie cellulaire

M.	FARCE	Amaury	Chimie Thérapeutique 2
Mlle	FLAMENT	Marie-Pierre	Pharmacotechnie Industrielle
Mlle	FLIPO	Marion	Chimie Organique
Mme	FOULON	Catherine	Chimie Analytique
Melle	GARAT	Anne	Toxicologie
M.	GELEZ	Philippe	Biomathématiques
M.	GERVOIS	Philippe	Biochimie
Mme	GOFFARD	Anne	Virologie
Mme	GRAVE	Béatrice	Toxicologie
Mme	GROSS	Barbara	Biochimie
Mme	HANNOTHIAUX	Marie-Hélène	Toxicologie
Mme	HELLEBOID	Audrey	Physiologie
M.	HENNEBELLE	Thierry	Pharmacognosie
M.	HERMANN	Emmanuel	Immunologie
M.	KAMBIA	Kpakpaga Nicolas	Pharmacologie
M.	KARROUT	Youness	Pharmacotechnie Industrielle
Mlle	LALLOYER	Fanny	Biochimie
M.	LEBEGUE	Nicolas	Chimie thérapeutique 1
Mme	LIPKA	Emmanuelle	Chimie Analytique
Mme	LORIN-LECOEUR	Marie	Chimie Analytique
Mme	MARTIN	Françoise	Physiologie
M.	MOREAU	Pierre Arthur	Sciences végétales et fongiques
Melle	MUSCHERT	Susanne	Pharmacotechnie industrielle
Mme	NEUT	Christel	Bactériologie
Mme	PINÇON	Claire	Biomathématiques
M.	PIVA	Frank	Pharmacie Galénique
M.	POMMERY	Jean	Toxicologie
Mme	POMMERY	Nicole	Toxicologie
M.	RAVAUX	Pierre	Biomathématiques
Mme	ROGER	Nadine	Immunologie
M.	ROUMY	Vincent	Pharmacognosie
M.	SERGHERAERT	Eric	Droit et déontologie pharmaceutique
Mme	SIEPMANN	Florence	Pharmacotechnie Industrielle
Mlle	SINGER	Elisabeth	Bactériologie
M.	TAGZIRT	Madjid	Hématologie
Mme	THUILLIER	Pascale	Hématologie
Mme	VANHOUTTE	Geneviève	Biochimie
Mme	VITSE	Annie	Parasitologie
M.	WILLAND	Nicolas	Chimie organique
M.	YOUS	Saïd	Chimie Thérapeutique 1
<hr/>			
M.	FURMAN	Christophe	Pharmacobiochimie (ICPAL)
Mme	GOOSSENS	Laurence	Chimie Organique (ICPAL)
M.	MILLET	Régis	Chimie Thérapeutique (ICPAL)

Liste des Maitres de Conférences - Praticiens Hospitaliers

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	BALDUYCK	Malika	Biochimie
M.	DECAUDIN	Bertrand	Pharmacie Clinique
Mme	ODOU	Marie Françoise	Bactériologie

Professeurs Agrégés

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	MAYES	Martine	Anglais
M.	MORGENROTH	Thomas	Droit et déontologie pharmaceutique

Professeurs Certifiés

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	HUGES	Dominique	Anglais
Mlle	FAUQUANT	Soline	Anglais
M.	OSTYN	Gaël	Anglais

Professeurs Associé - mi-temps

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	ABADIE	Eric	Droit et déontologie pharmaceutique

Maîtres de Conférences ASSOCIES - mi-temps

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	BERTOUX	Elisabeth	Pharmacie Clinique
M.	CAZALET	Jean Bernard	Pharmacie Clinique
M.	CREN	Yves	Biomathématiques Information Médicale
M.	FIEVET	Pierre	Biomathématiques Information Médicale
M.	FRIMAT	Bruno	Pharmacie Clinique
M.	WATRELOS	Michel	Droit et déontologie pharmaceutique
M.	ZANETTI	Sébastien	Biomathématiques - Pharmacie virtuelle

AHU

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	LANNOY	Damien	Pharmacie Galénique
M.	SIMON	Nicolas	Pharmacie Galénique



Université Lille Nord de France
Pôle de Recherche
et d'Enseignement Supérieur



Université Lille 2
Droit et Santé

Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques de Lille

3, rue du Professeur Laguesse - B.P. 83 - 59006 LILLE CEDEX
Tel. : 03.20.96.40.40 - Télécopie : 03.20.96.43.64
<http://pharmacie.univ-lille2.fr>

L'Université n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses ; celles-ci sont propres à leurs auteurs.

Remerciements

A Monsieur CUNY Damien,

Professeur de Pharmacie, Faculté de pharmacie, Lille II

Je vous remercie d'avoir accepté de diriger ma thèse. Merci pour votre disponibilité et pour les conseils que vous m'avez prodigués durant la réalisation de ce travail. Veuillez trouver l'expression de ma gratitude et de mon profond respect.

A Madame GRAVE Béatrice,

Maître de conférences, Faculté de Pharmacie, Lille II

Vous me faites l'honneur d'accepter de faire partie du jury de ma thèse. Veuillez trouver, ici, mes remerciements et ma sincère reconnaissance.

A Madame CUNY Marie Amélie,

Chargée d'étude à l'Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique

Vous avez accepté avec beaucoup de gentillesse de participer à ce jury. Veuillez recevoir mes remerciements les plus chaleureux pour l'intérêt que vous portez au sujet de cette thèse.

A mes parents,

Qui ont fait des sacrifices pour que j'en arrive là aujourd'hui. Un immense merci pour votre aide et votre soutien durant ces six années d'études. Je vous dédie cette thèse, qu'elle soit le témoignage de ma profonde affection.

A Thomas,

Qui, malgré la distance, a toujours été là pour moi. Un grand merci pour ta compréhension et surtout pour ta patience qui aura été mise à rude épreuve tout au long de mes études. J'espère du fond du cœur que nos projets vont enfin pouvoir se réaliser. Que notre vie soit la plus belle possible.

A ma grand-mère,

Merci de m'avoir soutenue et encouragée pendant ces années d'études.

A toute ma famille,

Merci pour votre aide et votre présence.

A ma belle-famille,

Merci pour votre écoute et votre compassion.

A mes amies,

Anne-Claire, Amélie, Céline, Héloïse, Michèle et Valérie, merci pour tous ces bons moments partagés ensemble et ceux à venir.

Table des matières

TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	14
ABREVIATIONS.....	18
INTRODUCTION.....	21
LA QUALITE DE L’AIR INTERIEUR: UNE VRAIE PROBLEMATIQUE DE SANTE PUBLIQUE.....	23
I - LA POLLUTION DE L’AIR INTERIEUR.....	23
1) POURQUOI S’INTERESSER A LA POLLUTION DE L’AIR INTERIEUR ?.....	23
1. Définition de la pollution de l’air.....	23
2. Le temps passé à l’intérieur des espaces clos.....	23
3. Les causes structurelles de la pollution de l’air intérieur [3].....	24
2) LA POLLUTION DE L’AIR INTERIEUR: UN ENJEU DE SANTE PUBLIQUE.....	25
1. Les dimensions du problème dans le monde [5].....	25
2. Les dimensions du problème en France.....	26
3) OBSERVATION DE LA QUALITE DE L’AIR INTERIEUR.....	28
1. A l’échelle nationale.....	28
A. L’Observatoire de la Qualité de l’Air Intérieur (OQAI).....	28
B. Le programme logement.....	29
2. A l’échelle régionale : exemple du Nord-Pas-de-Calais.....	34
II - LES PRINCIPAUX POLLUANTS MESURES DANS L’HABITAT ET LEURS SOURCES.....	37
1) LA POLLUTION CHIMIQUE.....	38
1. La fumée de tabac environnementale.....	38
2. Les composés organiques volatils et semi-volatils.....	40
3. Les oxydes de carbone.....	45
4. Les oxydes d’azote.....	46
2) LA POLLUTION PHYSIQUE.....	47
1. Le radon.....	47
2. Les fibres minérales.....	50
3. Les particules.....	51
4. L’humidité.....	52

3)	LA POLLUTION BIOLOGIQUE	53
1.	Les allergènes d'acariens	53
2.	Les allergènes d'animaux domestiques	54
3.	Les plantes d'intérieur.....	54
4.	Les micro-organismes (moisissures, virus et bactéries).....	56
III -	LES IMPACTS SANITAIRES DE LA POLLUTION A L'INTERIEUR DES LOCAUX.....	58
1)	LES POLLUANTS PRIORITAIRES	58
2)	LES PRINCIPAUX FACTEURS INFLUANT L'EFFET DES POLLUANTS DE L'AIR INTERIEUR SUR LA SANTE.....	60
3)	LA SENSIBILITE DES PERSONNES EXPOSEES.....	62
4)	EFFETS DES POLLUANTS DE L'AIR INTERIEUR SUR LA SANTE DES OCCUPANTS	63
1.	L'intoxication au monoxyde de carbone	63
2.	Les pathologies respiratoires	65
A.	L'Allergie et l'asthme	65
B.	La bronchopneumopathie chronique obstructive	71
C.	Les infections respiratoires.....	72
3.	Les syndromes	73
A.	Le syndrome des bâtiments malsains.....	73
B.	Le syndrome d'hypersensibilité chimique multiple	74
4.	Les pathologies cardiovasculaires	75
5.	Les perturbations endocriniennes	76
6.	Les cancers.....	76
	LA PHYTOREMEDIATION DE L'AIR INTERIEUR	80
I -	GENERALITES	80
1)	LES PRINCIPAUX MOYENS DE REMEDIATION	80
1.	Limiter les sources de pollution.....	80
2.	Aérer/ventiler les locaux	82
3.	Les systèmes d'épuration de l'air.....	82
2)	PRINCIPES FONDAMENTAUX SERVANT DE BASE A L'UTILISATION DES VEGETAUX...84	
II -	PHYSIOLOGIE DE LA PLANTE : LES MECANISMES MIS EN JEU DANS L'ELIMINATION DES POLLUANTS	87
1)	L'ABSORPTION DES POLLUANTS PAR LA PLANTE.....	88
1.	Les paramètres agissant sur l'entrée des polluants dans la plante	88
A.	Les paramètres liés à l'environnement [54]	88
a.	La température.....	88
b.	L'humidité	88
c.	Le vent	89

	d.	La lumière	89	
	B.	Les paramètres liés aux polluants [56] [57]	89	
		a.	La nature et l'état de phase du polluant.....	89
		b.	La lipophilie et la solubilité dans l'eau du polluant	90
	C.	Les paramètres liés à la plante [50] [29].....	91	
		a.	Les paramètres morphologiques	91
		b.	Les paramètres physiologiques.....	91
2.		La voie foliaire	92	
	A.	L'anatomie de la feuille [60].....	92	
		a.	L'épiderme inférieur	92
		b.	L'épiderme supérieur	93
		c.	Le parenchyme chlorophyllien	93
	B.	L'absorption par les stomates.....	94	
		a.	Les stomates.....	94
		b.	Les polluants absorbés par les stomates	94
		c.	Paramètres agissant sur l'entrée des polluants par les stomates ..	94
	C.	L'absorption par la cuticule	96	
		a.	La cuticule.....	96
		b.	Les polluants absorbés par la cuticule	96
		c.	Paramètres agissant sur l'entrée des polluants par la cuticule.....	96
3.		La voie racinaire	98	
	A.	La disponibilité des polluants dans le sol [56] [66] [67]	98	
		a.	Le sol	98
		b.	Les facteurs de disponibilité d'un polluant dans le sol	99
	B.	La transformation des polluants dans le sol [69].....	100	
	C.	L'absorption par les racines [73] [56] [67]	101	
		a.	Les racines.....	101
		b.	Les polluants absorbés par les racines	102
		c.	Paramètres agissant sur l'entrée des polluants par les racines ..	102
2)		LE DEVENIR DES POLLUANTS DANS LA PLANTE.....	103	
1.		Le transport des polluants dans la plante.....	103	
	A.	Les polluants inorganiques.....	104	
	B.	Les polluants organiques.....	104	
		a.	Les vaisseaux du xylème et du phloème.....	104
		b.	Le transport à partir des racines [56] [73].....	105
		c.	Le transport à partir des feuilles [56].....	107
2.		Le métabolisme des polluants dans la plante	107	
	A.	Les différentes phases de métabolisme [56] [73] [67] [72] [77]	108	
		a.	La phase I	108

b.	La phase II	108
c.	La phase III	109
B.	Un exemple de métabolisme d'un polluant : le formaldéhyde	109
a.	Le marquage du formaldéhyde au ¹⁴ C.....	109
b.	Les réactions d'additions spontanées	110
c.	La dégradation enzymatique	110
3.	Les effets des polluants sur la plante [50] [59] [53]	111
A.	Au niveau macroscopique et physiologique.....	112
B.	Au niveau cellulaire	113
a.	Le stress oxydant.....	113
b.	Les effets génotoxiques	114
III -	LES PRINCIPAUX RESULTATS DES ETUDES MENEES SUR LES PERFORMANCES	
	EPURATOIRES DES PLANTES.....	115
1)	LES SYSTEMES PASSIFS UTILISANT DES PLANTES.....	116
1.	Le potentiel de dépollution des plantes.....	116
A.	Les essais en laboratoire.....	116
a.	Les conditions d'étude.....	116
b.	Les résultats de quelques études expérimentales.....	118
B.	Etudes en conditions «réelles».....	123
a.	Les effets bénéfiques des plantes	123
b.	Les résultats de quelques études de terrain.....	124
2.	Le potentiel de dépollution du complexe plante/sol.....	127
A.	Les interactions plante/sol.....	127
a.	La rhizosphère : une interface entre la plante et les micro-organismes [97] [98] [99].....	127
b.	Des échanges à bénéfices réciproques	128
B.	Importance des micro-organismes du sol dans la dépollution de l'air	129
2)	LES SYSTEMES ACTIFS UTILISANT DES PLANTES	134
1.	Le biofiltre végétal	134
2.	Des études expérimentales aux applications	136
	LE ROLE DES PLANTES DANS LA PROBLEMATIQUE DE LA QUALITE DE L'AIR	
	INTERIEUR.....	147
I -	LE POINT SUR LE POUVOIR PURIFICATEUR DES PLANTES D'INTERIEUR	148
1)	DES PROPRIETES EPURATRICES PROUVEES EN LABORATOIRE [50] [54] [53] [121]	148
2)	DANS LES ESPACES REELS: PAS D'EFFICACITE DEMONTREE [54] [47] [121].....	150

3)	DES CONNAISSANCES A APPROFONDIR [29]	151
II -	PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT	153
1)	LES PLANTES GENETIQUEMENT MODIFIEES.....	153
1.	Définition	153
2.	Origines des travaux [123].....	154
3.	Les différentes étapes d'obtention d'une plante transgénique [123] [125]...	155
4.	Les améliorations possibles.....	157
A.	Le développement du système racinaire	157
B.	L'augmentation de la quantité d'enzyme de dégradation dans la plante et la rhizosphère	158
C.	L'optimisation de la microflore du sol.....	161
2)	LA BIOSURVEILLANCE VEGETALE DE L'AIR INTERIEUR	162
1.	Définition	162
2.	Les biomarqueurs.....	163
3.	Les applications.....	166
	CONCLUSION	169
	BIBLIOGRAPHIE.....	174

Table des illustrations

Liste des figures

Figure 1 : Temps passé dans les environnements intérieurs [2]	24
Figure 2 : Les principales sources de pollution de l'air intérieur [4]	25
Figure 3 : Répartition géographique des enquêtes [17].....	35
Figure 4 : Les 3 courants de la fumée de cigarette [20]	38
Figure 5 : La composition de la fumée de tabac [22].....	39
Figure 6 : Valeurs moyennes hebdomadaires de CO (en ppm) mesurées dans le séjour (constituant la pièce de vie principale) en période de chauffe [17].....	46
Figure 7 : Le radon en France [24]	49
Figure 8 : Les principaux polluants et leurs sources dans l'habitat [19].....	57
Figure 9 : Les sources et voies d'exposition des polluants ainsi que leur distribution [33]....	60
Figure 10 : Foyers d'intoxication au CO dans la région Nord-Pas de Calais en 2007 [24]....	63
Figure 11 : Symptômes d'intoxication au CO en fonction de l'exposition et de la concentration en HbCO [34].....	64
Figure 12 : Yucca [37].....	68
Figure 13 : Ficus benjamina [37].....	68
Figure 14 : Schlumbergera truncata (37)	69
Figure 15 : Euphorbia pulcherima [37].....	70
Figure 16 : Spathiphyllum wallisii [37].....	70
Figure 17 : Cyperus papyrus [37].....	70
Figure 18 : Tradescancia fluminensis [37].....	71
Figure 19 : Etiquette obligatoire basée sur les émissions de COV [46].....	81
Figure 20 : Ecolabels européens [4]	81
Figure 21 : Les différentes techniques d'épuration de l'air [48]	83
Figure 22 : Les processus de la phytoremédiation [52].....	85
Figure 23 : Les voies de pénétration des polluants dans la plante [53].....	87
Figure 24 : Coupe d'un limbe foliaire [60].....	92
Figure 25 : Coupe transversale d'un stomate [61].....	93
Figure 26 : Les paramètres agissant sur l'entrée des polluants par les stomates [29].....	95
Figure 27 : Les paramètres agissant sur l'entrée des polluants par l'intermédiaire de la surface foliaire [29].....	97
Figure 28 : L'absorption des polluants par les feuilles [53].....	98
Figure 29 : Coupe transversale d'une racine [74].....	101

Figure 30 : Représentation schématique des principaux devenir des polluants absorbés au sein des cellules [50].....	103
Figure 31 : Les mécanismes de transports de composés organiques [76].....	105
Figure 32 : Le facteur de concentration dans le flux de transpiration dérivé par Burken et Schnoor [75].....	106
Figure 33 : Métabolisme végétal du formaldéhyde [78] [80].....	111
Figure 34 : Observation des effets des polluants sur les feuilles à différents niveaux [53] .	112
Figure 35 : Enceinte d'exposition des plantes au CO et aux COV par injection unique [82]	117
Figure 36 : Capacité d'épuration de différentes plantes soumises à des concentrations élevées de formaldéhyde ou de benzène en chambre expérimentale [83] [84] [85].....	118
Figure 37 : Apparente sélectivité de <i>K. blossfeldiana</i> pour le benzène par rapport au toluène [88].....	122
Figure 38 : Elimination de polluants gazeux de l'air intérieur par <i>C.comosum</i> [88].....	122
Figure 39 : Impact du nombre de plantes sur la concentration en formaldéhyde [94].....	125
Figure 40 : Concentration en benzène dans la chambre expérimentale contenant <i>H. forsteriana</i> [103].	130
Figure 41 : Variations des concentrations en CO en fonction de différentes configurations (pots de terreau vs. 6 plants de <i>S. aureus</i>) [59].	130
Figure 42 : Variations des concentrations en formaldéhyde en fonction de différentes configurations [59].....	131
Figure 43 : Comparaison de l'évolution de l'élimination du benzène par le pot de terre et par la suspension bactérienne (dans de la vermiculite) issue de la terre du pot [86].....	132
Figure 44 : Représentation schématique d'un dispositif de biofiltration [82]	136
Figure 45 : Systèmes de purification de l'air intérieur proposés par Wolverton [113].	137
Figure 46 : Elimination du benzène et du trichloréthylène (présents en faibles concentration) de l'air de la chambre hermétique expérimentale contenant un biofiltre qui associe <i>S. aureus</i> et un sol enrichi en charbon actif [113].....	137
Figure 47 : Procédé ECOPLANTER® issu des systèmes mis au point par Wolverton [47]	138
Figure 48 : Coupe de biofiltre mis au point par Darlington [47].....	139
Figure 49 : Schéma d'un biofiltre de l'air intérieur [115]	140
Figure 50 : Photographie du biofiltre du CLER [116].....	140
Figure 51 : Photographie du biofiltre du NORCAT [116]	141
Figure 52 : Concentration moyenne des spores fongiques ($CFU\text{m}^{-3}$) dans l'essai en présence du biofiltre et dans un site de référence sans biofiltre (38).....	141
Figure 53 : Concentration moyenne des bactéries fongiques ($CFU\text{m}^{-3}$) dans l'essai en présence du biofiltre et dans un site de référence sans biofiltre (38).....	142
Figure 54 : Prototype de système de biofiltration [117]	142
Figure 55 : Biofiltre domestique basé sur le système développé par Darlington [47].....	143
Figure 56 : Jardin Filtrant® Air intérieur dans le restaurant Naked à Paris [118].....	144

Figure 57 : Installation d'un mur végétal filtrant gare Magenta à Paris [47]	144
Figure 58 : Photographie d'un biofiltre Vgbox [47]	145
Figure 59 : Photographie d'un biofiltre Andrea [119]	145
Figure 60 : Vente de plante sous l'étiquette «plante dépolluante» [120]	147
Figure 61 : Galle du collet [124]	154
Figure 62 : Plasmide Ti d'Agrobacterium tumefaciens [125]	156
Figure 63 : Réalisation d'une construction génique contenant le gène recherché (plasmide Ti recombiné) et transfert de l'ADN dans le génome de la plante [126]	156
Figure 64 : Les différentes étapes d'obtention d'une plante transgénique [124]	157
Figure 65 : Chevelu racinaire [124]	158
Figure 66 : Cinétique d'élimination du FA par Arabidopsis sauvage et les lignées transgéniques soumises à une concentration de 5 mM [128]	159
Figure 67 : Cinétique d'élimination du FA par Arabidopsis sauvage et les lignées transgéniques soumises à une concentration de 2 mM [128]	159
Figure 68 : Capacité d'élimination de la lignée sauvage et transgénique des plantes de tabac en fonction de la concentration en formaldéhyde [130]	160
Figure 69 : Les concepts de biosurveillance en fonction des niveaux de réaction des organismes [134]	163
Figure 70 : Inflorescence de Tradescancia clone #4430 [134]	164
Figure 71 : Observation au microscope du début de la division cellulaire d'une cellule de pollen avec (A) et sans micronoyaux (B) [134]	164
Figure 72 : Schématisation de la formation des micronoyaux [133]	165
Figure 73 : Observation au microscope à fluorescence de figures d'ADN en forme de comètes [47]	166
Figure 74 : Variations des OTM (dégâts de l'ADN) chez les plantes exposées dans les 10 bureaux [46]	167
Figure 75 : Variations des OTM (exposés/témoins) observés chez les plants de S.aureus exposés dans 10 écoles du Nord - Pas de Calais [47]	167

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres mesurés dans la campagne nationale logement [14]	30
Tableau 2 : Valeurs de gestion règlementaires (d'après Briand, 2010) [15]	31
Tableau 3 : Valeurs guides sanitaires et valeurs repères d'aide à la gestion pour l'air intérieur [15].....	33
Tableau 4 : Principaux polluants dans l'habitat par catégories d'agents [19].....	37
Tableau 5 : Les principaux COV rencontrés dans l'air intérieur [15].....	41
Tableau 6 : Comparaison des concentrations médianes intérieures et extérieures de COV [13].....	42
Tableau 7 : Influence de l'âge sur l'activité respiratoire [24]	61
Tableau 8 : Influence de la quantité d'air requise (Litre/Heure) en fonction de l'activité physique [24].....	61
Tableau 9 : Symptômes décrits dans le syndrome des bâtiments malsains [8] [27]	73
Tableau 10 : Principaux polluants et effets sur la santé [15] [42].....	78
Tableau 11 : Seuils limites des concentrations d'exposition aux COV [46].....	81
Tableau 12 : Métabolisme des polluants dans la plante [56] [77]	108
Tableau 13 : Capacité d'élimination (basée sur la surface foliaire) de 5 COV (benzène, toluène, octane, trichloréthylène et α -pinène) par 28 plantes d'intérieur [87]	120
Tableau 14 : Pourcentage de diminution des concentrations en polluants (CO, Benzène, Formaldéhyde) avec 3 plantes (C.comosum, S.aureus, D.marginata) [82]	121
Tableau 15 : Taux d'élimination du formaldéhyde par les pots de terre [102].....	131
Tableau 16 : Capacité d'élimination du benzène par un nouveau pot de terre vierge comparé à celle d'un pot contenant H. forsteriana, S. wallisii et D. marginata avec une dose initiale de benzène de 25 ppm [86].....	133

Abréviations

AASQA	Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ADN	Acide DésoxyriboNucléique
AFBV	Association Française des Biotechnologies Végétales
AFFSE	Association Française de Sécurité Sanitaire Environnementale
AFSSET	Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail
ALCA	Associated Landscape Contractors of America
ANAH	Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat
ANSE	Agence Nationale de sécurité Sanitaire, de l'Alimentation, de l'Environnement et du travail
APPA	Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique
APX	Ascorbate peroxydase
BGRM	Bureau de recherches géologiques et minières
BPCO	Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructive
CAP	Centre AntiPoison
CDHR	Comité Départemental d'Habitat et d'aménagement Rural
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives
CFU	Colony-Forming Unit
CIRC	Centre International de Recherche sur le Cancer
CLER	Canada Life Environmental Room
CLHP	Chromatographie Liquide Haute Performance
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CO	Monoxyde de carbone
CO₂	Dioxyde de carbone
COV	Composés Organiques Volatils

CPG	Chromatographie en Phase Gazeuse
CYP 450	Cytochrome P450
DDT	Dichlorodiphényltrichloroéthane
ERO	Espèces réactives de l'oxygène
FALDH	Formaldéhyde deshydrogénase glutathion dépendante
FBC	Facteur de Bioconcentration
FTDH	Formate deshydrogénase
GPX	Gaïacol peroxydase
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
Hb	Hémoglobine
HbCO	Carboxyhémoglobine
HBI	Healthy Building International
HCSP	Haut Conseil de la Santé Publique
IgE	Immunoglobuline de type E
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des risques
INPES	Institut National de Prévention et d'Education pour la santé
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
LCF	Leaf Concentration Factor
LGBP	Laboratoire de Génétique et Biophysique des plantes
MDA	Malondialdéhyde
NIGZ	Netherlands Institute for Health Promotion
NOx	Oxyde d'azote
NO₂	Dioxyde d'azote
NORCAT	Northern Center for Advanced Technology
OCL	Oléagineux Corps gras Lipides
OMS	Organisation Mondiale de la Santé

OQAI	Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur
ORS	Observatoire Régional de la Santé
OTM	Olive Tail Moment
PBDE	Polybromés biphényles ethers
PCP	Pentachlorophénol
PCB	Polychlorobiphényles
PM	Particulate Mater
PPB	Partie Par Milliard
PPM	Partie Par Million
RCF	Roots Concentration Factor
RP	Rapport
SBM	Syndrome des bâtiments malsains
SCFP	Syndicat Canadien de la Fonction Publique
SCHER	Scientific Committee on Health and Environmental Risks
SHCM	Syndrome d'Hypersensibilité Chimique Multiple
SLC	Student Life Center
TNT	Trinitrotoluène
TRA	Taux de Renouvellement d'Air
VGAI	Valeurs Guide de qualité de l'Air Intérieur
VLEP	Valeurs limites d'Exposition Professionnelle

Introduction

Le mode de vie urbain nous amène à passer près de 90% du temps dans les espaces clos (locaux d'habitation, de travail ou de loisirs). Ce chiffre, publié à de très nombreuses reprises, montre à lui seul l'importance que revêt le problème de la pollution de l'air intérieur.

En effet, outre la pollution de l'air liée au trafic routier ou aux installations industrielles, ces environnements comprennent de nombreuses sources de polluants (par exemple: les appareils de chauffage et de cuisson, les matériaux de construction, de décoration et d'ameublement) auxquelles s'ajoutent les activités humaines (tabagisme, utilisation et stockage des produits cosmétiques, d'entretien et de bricolage...). De plus, l'isolation des bâtiments justifiée par le besoin d'économie d'énergie et les comportements individuels visant à limiter l'aération peuvent conduire au confinement des environnements intérieurs exposant de manière excessive aux polluants potentiels de l'air intérieur.

Cette multitude d'émissions génère un cocktail de polluants dont il est clairement établi aujourd'hui qu'il exerce des effets sanitaires à court comme à long terme.

Ainsi, le Grenelle de l'Environnement a confirmé la qualité de l'air intérieur comme un enjeu de santé publique mais la population n'a pas encore assez pris conscience de ce problème.

Des campagnes d'informations relayées par les media se sont développées afin de sensibiliser l'exposition des populations aux polluants de l'air dans les locaux et les effets sanitaires induits.

Parallèlement, se sont mises en place des réflexions afin d'affiner les démarches d'évaluation des risques mais aussi d'obtenir un panel de solutions de remédiation. Ces dernières sont nombreuses et passent en premier lieu par la maîtrise des sources de pollution (par exemple par l'entretien des appareils à combustion, l'utilisation rationnelle et raisonnée des produits chimiques...) allié à l'optimisation de l'aération des locaux. Il est possible ensuite d'adjoindre des techniques complémentaires telles que des systèmes de traitement de l'air. C'est dans ce domaine que des recherches sont menées sur l'utilisation des végétaux (ou

phytoremédiation) afin de purifier l'air. L'idée que les plantes puissent être une solution pour épurer, dépolluer ou tout simplement maintenir la qualité de l'air intérieur est encore récente même si la phytoremédiation était connue depuis déjà de nombreuses années.

Aujourd'hui, le sujet des plantes « dépolluantes » fait l'objet d'un fort écho médiatique qui intéresse le grand public. Cet intérêt se développe dans le contexte favorable d'une nouvelle demande sociale concernant les méthodes alternatives, naturelles, dites aussi écologiques, dans la conception et l'équipement du logement. Ce développement répond aussi à des offres de marché suscitées par ces nouvelles tendances de la société. Cependant, le bruit médiatique entendu autour de ces plantes d'appartement dites « dépolluantes » pour un usage de qualité de l'air intérieur est-il approprié ? Y a-t-il une diffusion objective de l'information sur le sujet ?

Dans une première partie, nous décrirons le problème de la pollution de l'air intérieur et nous en soulignerons l'enjeu majeur de santé publique.

Dans une seconde partie nous dresserons l'état des connaissances acquises par différents groupes de recherches sur la capacité de certaines plantes d'intérieur à éliminer les polluants de l'air des locaux. Nous expliquerons alors les mécanismes de « dépollution » mis en jeu et nous ferons une synthèse des principaux résultats des expériences scientifiques menées sur les performances épuratoires des plantes.

Enfin, nous tenterons d'évaluer l'efficacité réelle de ce procédé d'épuration afin d'éclaircir le rôle des végétaux dans la problématique de la qualité de l'air intérieur.

La qualité de l'air intérieur: une vraie problématique de santé publique

I - La pollution de l'air intérieur

1) Pourquoi s'intéresser à la pollution de l'air intérieur ?

1. Définition de la pollution de l'air

L'air que nous respirons est indispensable à la vie et se compose essentiellement de 78% d'azote, 21 % d'oxygène, de gaz rares (Hélium, argon, néon..), de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone.

On parle de pollution de l'air lorsque la qualité de celui-ci est modifiée soit par l'introduction de substances nouvelles, soit par un changement des concentrations habituelles de substances déjà présentes à l'état naturel sous l'action des activités humaines.

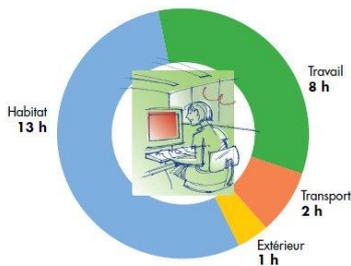
Selon la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30/12/1996 (Loi n°96-1236 article L220-2 du code de l'environnement), la pollution est définie comme: « L'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives » [1].

2. Le temps passé à l'intérieur des espaces clos

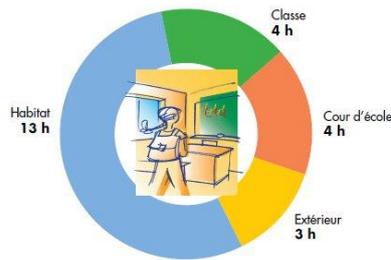
Chaque jour, nous respirons environ 14000 litres d'air et passons plus de 20 heures dans des espaces clos (bureau, logements, école, commerces, transports...) (figure 1).

Un adulte respire en moyenne 600 litres d'air à l'extérieur contre 1200 litres dans les transports, 4700 au travail et 7500 dans son habitat. L'air est donc respiré majoritairement dans les environnements intérieurs [2].

Journée type d'un adulte dans différents lieux de vie



Journée type d'un enfant dans différents lieux de vie en été



Journée type d'un enfant dans différents lieux de vie en hiver

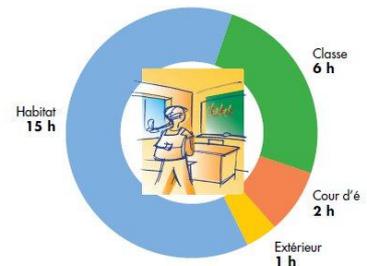


Figure 1 : Temps passé dans les environnements intérieurs [2]

3. Les causes structurelles de la pollution de l'air intérieur [3]

Le choc pétrolier de 1973 a signé le début de la « chasse au gaspillage » et la course vers une meilleure isolation des maisons. Les bâtiments aérés de l'époque deviennent alors plus isolés et très étanches donc l'air n'est pas renouvelé.

Parallèlement, au cours du dernier siècle, on observe des changements majeurs des matériaux pour la construction et l'ameublement des habitations principalement issus de la chimie de synthèse. Une forte consommation de produits chimiques tels que des produits ménagers, de bricolage ou encore de cosmétique est également constatée. De plus, les habitudes de vie ont évolué et ceci modifie la quantité, la nature et la composition des polluants de l'air intérieur auxquels les personnes sont exposées. En effet, ces pollutions peuvent être aggravées par certains comportements tels que l'obturation des aérations au sein de l'habitat, le mauvais entretien des appareils à combustion ou encore le tabagisme en endroit clos.

Ainsi, les multiples sources de pollution (figure 2) associées à un manque d'aération contribuent à l'accumulation des polluants qui sont parfois présents en concentration plus importante à l'intérieur qu'à l'extérieur des locaux.

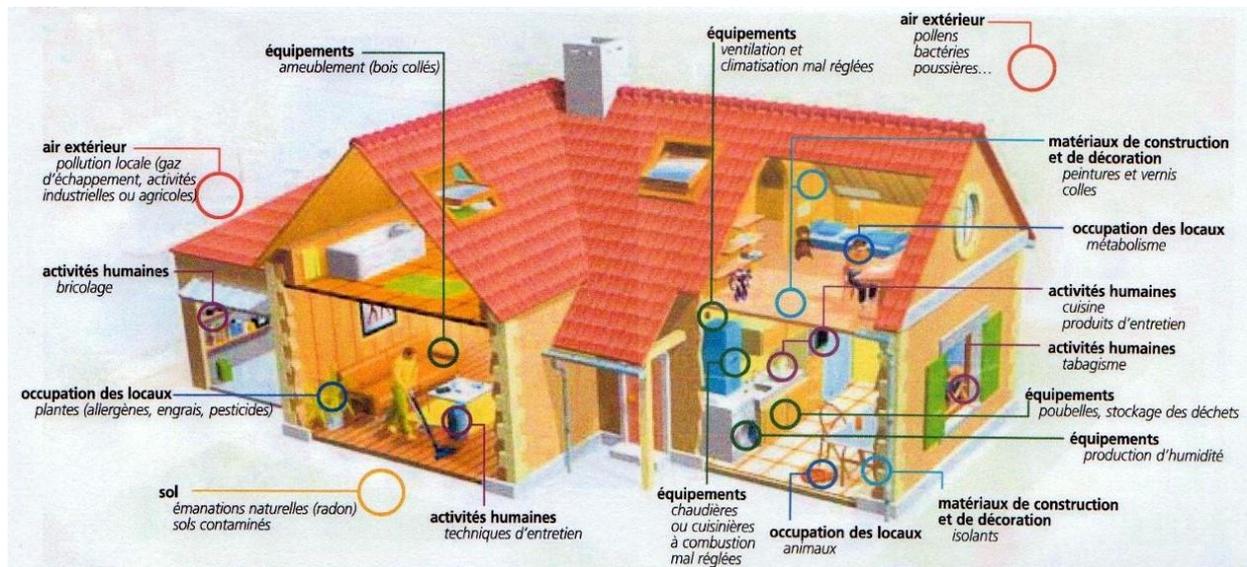


Figure 2 : Les principales sources de pollution de l'air intérieur [4]

2) La pollution de l'air intérieur: un enjeu de santé publique

1. Les dimensions du problème dans le monde [5]

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a procédé à une évaluation du rôle joué par différents facteurs de risque dans le taux de morbidité (nombre de personnes souffrant d'une pathologie pendant un temps donné) afin de quantifier l'état de santé d'une population et de faciliter la détermination des priorités en terme de santé publique.

D'après ce rapport, la pollution de l'air à l'intérieur des habitations serait responsable de 2,7% de la charge mondiale de morbidité [5].

Le principal facteur de risque réside dans le fait que plus de 3 milliards d'individus dans le monde dépendent encore de combustibles solides, y compris dérivés naturels (bois, fumier, résidus agricoles) et charbon pour leurs besoins énergétiques.

Ce type de chauffage et de cuisson des aliments génère une forte pollution de l'air intérieur, avec toute une variété de polluants nocifs pour la santé, dont de petites particules. La fumée présente dans une habitation mal ventilée peut contenir 100 fois plus de petites particules que la teneur acceptable. Ces dernières sont susceptibles de pénétrer profondément dans les poumons et de provoquer une augmentation du nombre de pathologies cardio-respiratoires.

Dans les pays en voie de développement où la mortalité est élevée, la fumée à l'intérieur des maisons est responsable de quelques 3,7% de la charge mondiale de morbidité ce qui en fait la cause de décès la plus meurtrière après la malnutrition, les rapports sexuels non protégés ainsi que l'absence d'eau salubre et d'assainissement. En effet, la pollution de l'air à l'intérieur des habitations, due à l'utilisation de combustibles solides, est responsable du décès de 1,6 million de personnes dans le monde, soit 1 décès toutes les 20 secondes [5].

Dans le monde, la pneumonie et les autres infections aiguës des voies respiratoires inférieures représentent de loin la plus importante de cause de décès chez les enfants de moins de cinq ans. L'exposition à la pollution de l'air à l'intérieur des habitations fait plus que doubler le risque de pneumonie et est de ce fait responsable de plus de 900 000 des 2 millions de décès annuels par pneumonie [5].

Les femmes exposées à la fumée à l'intérieur des maisons ont trois fois plus de risque de souffrir de bronchopneumopathies chroniques obstructives (BPCO), telle la bronchite chronique, que les femmes qui cuisinent et chauffent la maison à l'électricité, au gaz et à d'autres combustibles moins polluants. Chez les hommes, l'exposition à ce facteur de risque double presque le risque de maladies respiratoires chroniques. Ainsi, la pollution de l'air à l'intérieur des habitations est responsable de quelques 700 000 décès dans le monde sur les 2,7 millions qui sont imputables aux BPCO [5].

L'exposition à la fumée de combustion du charbon double le risque de cancer du poumon, en particulier chez les femmes, qui ont tendance à fumer moins que les hommes dans la plupart des pays en développement. Plus d'un million de personnes décèdent du cancer du poumon chaque année dans le monde, et la pollution de l'air à l'intérieur des habitations est responsable d'environ 1,5% de ces décès [5].

2. Les dimensions du problème en France

Jusqu'au début des années 2000, les connaissances dans le domaine de la pollution intérieure étaient peu nombreuses en comparaison à l'air extérieur. C'est probablement pourquoi la qualité de l'air dans les espaces clos a peu fait partie des principales préoccupations sanitaires jusqu'alors.

Pourtant, certains polluants ont un rôle prépondérant dans certaines pathologies. Parmi eux, figure le monoxyde de carbone (CO) dont l'intoxication, qui peut être mortelle, représente un risque important dans les foyers [6].

L'amiante reste également un véritable fléau avec un constat alarmant puisque depuis 1985, plus de 33000 maladies professionnelles liées à l'amiante ont été reconnues avec une augmentation du nombre de cancers dus à l'amiante passé quasi de 0 à 1328 en 2005 [7].

Bien évidemment, il est indispensable de soulever le réel problème lié à la fumée de tabac sur la santé. Malgré les campagnes d'information, selon l'académie de médecine, la fumée de tabac constitue encore « la source la plus dangereuse de pollution de l'air intérieur ». La fumée de tabac environnementale est encore associée chaque année en France à 3000 décès supplémentaires chez les non-fumeurs [8].

Ces dernières décennies ont connu une augmentation de l'incidence de certaines pathologies chroniques telles que l'asthme, les allergies, les maladies respiratoires ou neurologiques et les cancers. La prévalence de l'asthme en France a quadruplé en 30 ans et concerne plus de 3,5 millions de personnes dont un tiers d'enfants. La mortalité liée à l'asthme reste pourtant stable avec une moyenne de 2000 décès par an [9]. La prévalence des maladies allergiques a doublé en 20 ans et touche 10 à 30% de la population [10]. Ce phénomène pourrait être en lien avec le fait que la population soit de plus en plus fragilisée suite à l'exposition à un nombre croissant de sources de pollution notamment tabagisme passif, allergènes, pollution extérieure (surtout automobile).

D'après l'association française de sécurité sanitaire environnementale (AFSSE), 280 000 nouveaux cas de cancers par an sont à déplorer dont 7 à 20 % seraient associés à des facteurs environnementaux non liés à des comportements individuels [11].

On remarquera que ces pathologies voient leur profil évolutif modifié par l'urbanisation ou l'industrialisation, par le tabagisme actif et passif, par la modification du cadre de vie intérieur (habitat) ou professionnelle (industrie ou milieu rural).

Face à l'évolution de ces données épidémiologiques, il s'est avéré indispensable d'améliorer les connaissances sur les polluants présents dans l'air intérieur. En effet, il est nécessaire de mettre en œuvre des mesures de gestion appropriée pour un bon état sanitaire de l'air. Dans le cas du milieu ambiant

extérieur, la surveillance de la qualité de l'air en France est mise en œuvre par les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) au sein de dispositifs de surveillance régionaux couvrant l'ensemble du territoire national. A ce jour, un tel dispositif développé pour le milieu intérieur n'existe pas. Il y a pourtant plusieurs campagnes d'observation qui ont pour la première fois fait un état des lieux sur les niveaux de pollution retrouvés en air intérieur.

3) Observation de la qualité de l'air intérieur

1. A l'échelle nationale

A. L'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI)

Pour définir un cadre d'action contre la pollution de l'air intérieur, il est indispensable de mieux connaître les risques pour la santé, en s'appuyant sur des données fiables concernant les polluants pour lesquels il existe une exposition régulière de la population. C'est dans ce contexte que l'observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) a été lancé en juillet 2001, créé et financé par les ministères en charge du logement, de la santé, de l'environnement et l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

Cet observatoire a pour but de mieux connaître la pollution intérieure, ses origines et ses dangers. L'objectif principal est de mettre au point des recommandations pour améliorer la qualité de l'air intérieur. L'OQAI s'appuie sur un réseau d'expertise pluridisciplinaire qui remplit plusieurs missions [4] :

- Dresser un état des lieux pour l'air intérieur en France afin de mieux connaître l'origine des polluants à l'intérieur, leurs concentrations, et leurs spécificités.
- Mieux connaître les polluants de l'air intérieur et leurs effets pour définir des indices de qualité de l'air intérieur.
- Renseigner les pouvoirs publics pour faire évoluer les réglementations: matériaux, équipements, pratiques de constructions et étiquetage des produits de consommation.
- Informer le public et les professionnels pour prévenir et contrôler la pollution de l'air intérieur ainsi que promouvoir les bonnes pratiques.

B. Le programme logement

Une première étude « pilote » a été menée en 2001 sur 90 logements (272 personnes enquêtées) et 9 écoles sur trois secteurs : Aix-Marseille, communauté urbaine de Strasbourg et le Nord-Pas-de-Calais [12]. Cette étude pilote avait pour but de tester sur le terrain les outils nécessaires afin d'optimiser les méthodes d'observation de la qualité de l'air intérieur.

Les données recueillies dans le cadre de cette étude concernaient, d'une part, les niveaux de pollution, et d'autre part, des informations descriptives sur le bâtiment, son environnement ainsi que sur les occupants et leurs activités.

Les résultats ont mis en évidence l'existence d'une pollution intérieure assez spécifique ce qui a confirmé l'intérêt de mettre en œuvre des campagnes de mesure dans les locaux mais avec des effectifs plus importants et des procédures standardisées.

Après cette première phase pilote, une campagne nationale logement a été conduite par l'OQAI entre octobre 2003 et décembre 2005 [13]. Elle a permis de dresser un premier état des lieux de la pollution de l'air intérieur, représentatif de la situation des 24 millions de résidences principales en France et d'établir un bilan des origines de cette pollution.

Cette étude décrit essentiellement le niveau de base qui servira de référence de l'exposition de la population générale à la pollution des logements. Elle vise notamment à identifier des situations à risques (contaminants en concentration importante ou mesurés fréquemment) ou des pistes de réflexion (source de contamination ou comportement à risque) à partir desquelles des priorités pourraient être formulées.

Les données ont été recueillies dans 567 résidences principales (1612 individus enquêtés) en France métropolitaine réparties dans 74 communes sur une durée d'une semaine. Une trentaine de polluants ont fait l'objet de mesure en raison de leur impact potentiel sur la santé et sur leur fréquence d'apparition dans les environnements intérieurs (tableau 1). Des paramètres de confort tels que la température, l'humidité relative et le débit d'air des systèmes de ventilation ont également été pris en compte.

Paramètres mesurés lors de la campagne nationale Logements	
Allergènes d'animaux :	allergènes de chat (<i>Feld 1</i>) et de chien (<i>Can f1</i>) dans l'air
Allergènes d'acariens (<i>Derp1, Derf 1</i>) :	dans les poussières de matelas
Monoxyde de carbone (CO) :	dans l'environnement et dans l'air expiré (pour les occupants âgés d'au moins 6 ans)
Composés organiques volatils (COV) :	
<i>Hydrocarbures aromatiques</i> :	benzène, toluène, m/p xylène, o-xylène, 1,2,4- triméthylbenzène, éthylbenzène, styrène
<i>Hydrocarbures aliphatiques (n-C6 à n-16)</i> :	n-décane, n-undécane
<i>Hydrocarbures halogénés</i> :	trichloroéthylène, tétrachloroéthylène, 1,4-dichlorobenzène
<i>Éthers de glycol</i> :	2PG1ME (1-métoxy 2-propanol) et son acétate, EGBE (2 butoxyéthanol) et son acétate
<i>Aldéhydes</i> :	formaldéhyde, acétaldéhyde, hexaldéhyde, acroléine
Particules inertes :	PM ₁₀ , PM _{2,5}
Radon	
Rayonnement gamma	

Tableau 1 : Paramètres mesurés dans la campagne nationale logement [14]

Mis à part pour le radon, l'amiante et le monoxyde de carbone (tableau 2), il n'existe pas encore de valeurs réglementaires pour l'air intérieur.

Substance	Valeurs de gestion réglementaire	Actions de gestion à engager	Référence
Radon	En dessous de 400 Bq/m ³	La situation ne justifie pas d'action corrective particulière	Arrêté du 22 juillet 2004 relatif aux modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public
	Entre 400 et 1 000 Bq/m ³	Il faut entreprendre des actions correctives simples ou des travaux	
	Au-delà de 1 000 Bq/m ³	Des actions correctives éventuellement d'envergure, doivent être conduites dans un bref délai, car on aborde un niveau de risque qui peut être important.	
CO	Entre 20 ppm (10 ppm à compter du 1 ^{er} juillet 2014) et 50 ppm	La situation est estimée anormale et la personne chargée d'effectuer l'entretien doit informer l'utilisateur que des investigations complémentaires concernant le tirage du conduit de fumée et la ventilation du local sont nécessaires. Ces investigations peuvent être réalisées au cours de la visite ou faire l'objet de prestations complémentaires	Arrêté du 15 septembre 2009 relatif à l'entretien annuel des chaudières dont la puissance nominale est comprise entre 4 et 400 kW
	Supérieure ou égale à 50 ppm	La situation met en évidence un danger grave et immédiat. La personne chargée d'effectuer l'entretien enjoint l'utilisateur à maintenir sa chaudière à l'arrêt jusqu'à la remise en service de l'installation dans les conditions normales de fonctionnement	
Amiante	5 fibres/litre	Valeur seuil de gestion nécessitant d'engager des travaux sur certains matériaux	Article R1334-18 de la santé publique

Tableau 2 : Valeurs de gestion réglementaires (d'après Briand, 2010) [15]

Seules quelques valeurs guides de gestion de l'air intérieur (VGAI) établies par l'OMS en 2010 ou reconnues à l'échelle européenne, de nature indicative, ont vocation à aider à l'interprétation des résultats des mesures réalisées dans les environnements intérieurs, sans avoir cependant de portée réglementaire pour l'instant [15] (tableau 3). Une valeur guide de gestion de l'air intérieur est une valeur de concentration dans l'air associée à un pas de temps en dessous de laquelle, en l'état actuel des connaissances, aucun effet sur la santé n'est attendu pour la population générale. A noter que cette définition est applicable dans le cadre de valeurs construites pour protéger d'effets à seuil de dose. Dans le cas d'effets sans seuil de dose, les valeurs guides sont exprimées sous la forme d'excès de risque

correspondant à une probabilité de survenue de la pathologie associée à la substance considérée.

Afin de guider les pouvoirs publics dans l'élaboration de valeurs opérationnelles pour mettre en place des actions d'amélioration de la qualité de l'air intérieur, le Haut conseil de la santé publique (HCSP) propose, à partir des VGAI de l'ANSES, des valeurs dites « de gestion » (tableau 3). Ces valeurs permettront d'interpréter les résultats mesurés lors de la campagne et d'éclairer les gestionnaires du risque sur les niveaux de concentration à partir desquels des actions sont à entreprendre.

		France		International	
		ANSES	HCSP	Europe/Index	OMS
Formaldéhyde	Court terme	50 µg/m ³ (2 heures)	Valeur d'action rapide : 100 µg/m ³ Valeur d'information et de recommandations : 50 µg/m ³	30 µg/m ³ (30 minutes)	100 µg/m ³ (30 minutes)
	Long terme	10 µg/m ³	Valeur repère : 30 µg/m ³ Valeur cible : 10 µg/m ³	-	100 µg/m ³
Monoxyde de carbone	24 heures	-	-	-	7 mg/m ³
	8 heures	10 mg/m ³	-	10 mg/m ³	10 mg/m ³
	1 heure	30 mg/m ³	-	30 mg/m ³	35 mg/m ³
	30 minutes	60 mg/m ³	-	-	-
	15 minutes	100 mg/m ³	-	-	100 mg/m ³
Benzène	Court terme	30 µg/m ³ {1-14 jours}			-
	Long terme – effets à seuil	10 µg/m ³	Valeur d'action rapide : 10 µg/m ³ Valeur repère : 5 µg/m ³ Valeur cible : 2 µg/m ³	Concentration aussi faible que possible	-
	Long terme – effets sans seuil	2 µg/m ³ pour une exposition la vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 ⁻⁵ (a)			1,7 µg/m ³ pour une exposition la vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 ⁻⁵
Naphtalène	Court terme	-	-		-
	Long terme	10 µg/m ³	-	10 µg/m ³	10 µg/m ³
Trichloroéthylène	Court terme	-	-	-	-
	Long terme – effets sans seuil	20 µg/m ³ pour une exposition la vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 ⁻⁵	-	-	23 µg/m ³ pour une exposition la vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 ⁻⁵ (b)
Tetrachloroéthylène	Court terme	1 380 µg/m ³ {1-14 jours}	Valeur d'action rapide : 1 250 µg/m ³	-	-

		France		International	
		ANSES	HCSP	Europe/Index	OMS
	Long terme	250 µg/m ³	Valeur repère : 250 µg/m ³	-	250 µg/m ³
Dioxyde d'azote	Court terme	-	-	200 µg/m ³ (1 heure)	200 µg/m ³ (1 heure)
	Long terme	-	-	40 µg/m ³	40 µg/m ³
Benzo[a]pyrène {marqueur du mélange de HAP}	Court terme	-	-	-	-
	Long terme	-	-	-	0,12 ng/m ³ pour une exposition la vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 ⁻⁵
Acétaldéhyde	Court terme	-	-	200 µg/m ³	-
	Long terme	-	-	200 µg/m ³	-
Xylènes	Court terme	-	-	20 mg/m ³	-
	Long terme	-	-	200 µg/m ³	-
Toluène	Court terme	-	-	15 mg/m ³	-
	Long terme	-	-	300 µg/m ³	-
Styrène	Court terme	-	-	2 000 µg/m ³	-
	Long terme	-	-	250 µg/m ³	-
Ammoniac	Court terme	-	-	100 µg/m ³	-
	Long terme	-	-	70 µg/m ³	-
Particules PM _{2,5}	24 heures	-	-	-	25 µg/m ³
	Long terme	-	-	-	10 µg/m ³
Particules PM ₁₀	24 heures	-	-	-	50 µg/m ³
	Long terme	-	-	-	20 µg/m ³

Tableau 3 : Valeurs guides sanitaires et valeurs repères d'aide à la gestion pour l'air intérieur

[15]

Ainsi, les résultats ont démontré que 10% des logements peuvent être qualifiés de « multi pollués » (3 à 8 des composés recherchés sont mesurés à de fortes concentrations), 15% des logements sont « pollués » (1 à 2 composés présents à de fortes concentrations), 30% des logements sont « légèrement pollués » (4 à 7 composés présents à des concentrations supérieures aux médianes de l'ensemble des logements) et 45% des logements sont « peu pollués » (l'ensemble des composés étant présents à des concentrations inférieures aux médianes de l'ensemble des logements) [13].

Soulignons le point qu'il existe une spécificité de pollution à l'intérieur des logements par rapport à l'extérieur. En effet, certaines substances ont été mesurées à des concentrations nettement plus importantes à l'intérieur et d'autres, non observées à l'extérieur, ont été trouvées. Les polluants visés sont présents à des niveaux quantifiables dans la majorité des logements du parc. Les composés organiques volatils (COV) sont les principaux polluants identifiés dans les logements français mais leur répartition n'est pas homogène dans le parc. Seule une minorité de logements (9%) présente des concentrations très élevées pour plusieurs polluants simultanément; à l'inverse 45% des logements présentent des niveaux de concentration très faibles pour l'ensemble des polluants mesurés. Polluant par polluant, de 5 à 30% des logements présentent des valeurs nettement plus élevées que les concentrations trouvées en moyenne dans le parc [13].

2. A l'échelle régionale : exemple du Nord-Pas-de-Calais

Autour des problématiques émergentes telles que l'augmentation de l'asthme et de l'allergie, le programme « Habit'air Nord-Pas-de-Calais » a été mis en place afin d'obtenir un aperçu de l'exposition individuelle aux polluants intérieurs. Ce programme a été créé en 2003 à l'initiative du conseil régional, de l'ADEME et du Comité Départemental d'Habitat et d'aménagement Rural (CDHR du Pas de Calais). Il avait pour but de mieux connaître les facteurs de qualité d'air intérieur, de guider le réseau d'acteurs partenaires dans l'élaboration de scénario d'exposition (risque pour la santé) pour le développement de solutions et l'évolution de la prévention dans ce domaine [16].

Pour évaluer la qualité de l'air des logements dans le Nord-Pas-de-Calais, 60 logements ont été étudiés. Ils étaient répartis sur 34 communes du territoire régional

(17% de communes rurales et 83% de communes urbaines) avec une répartition en fonction de la densité de population soit 1/3 dans le Pas de Calais et 2/3 dans le Nord (figure 3).

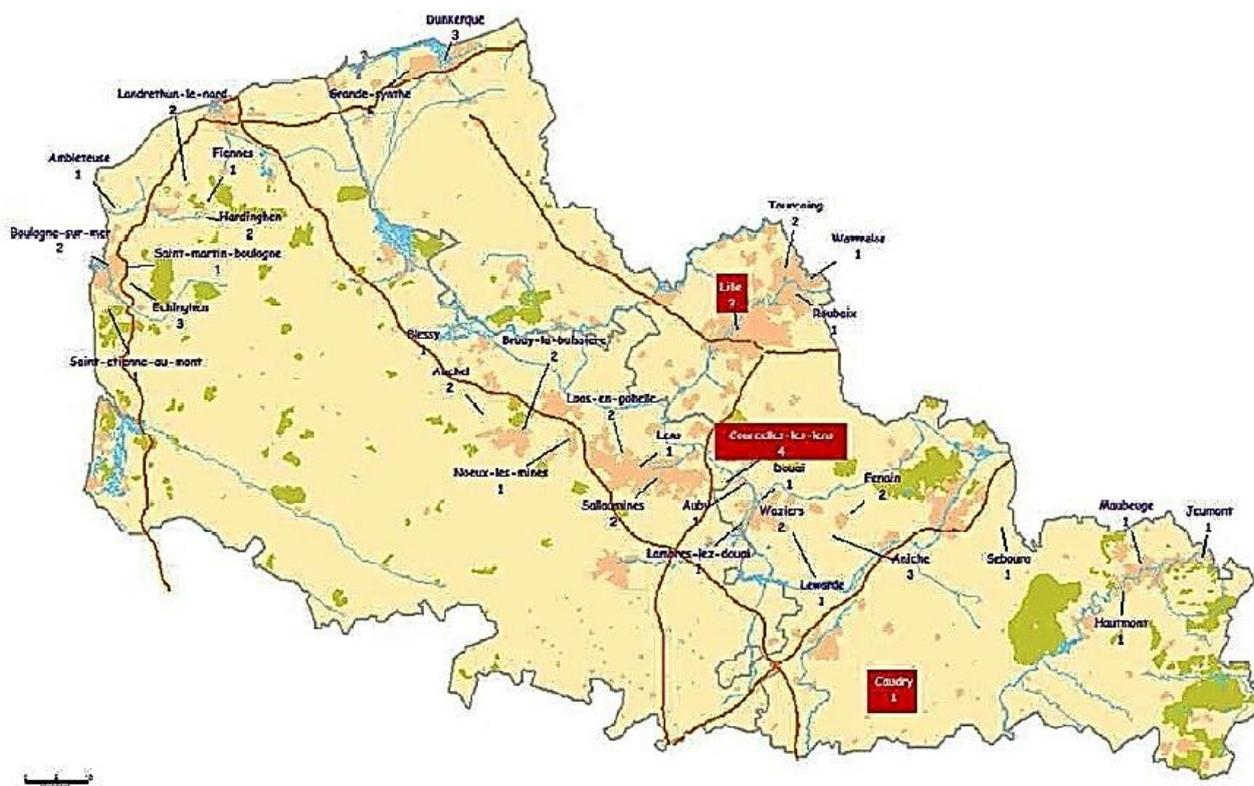


Figure 3: Répartition géographique des enquêtes [17]

Les 60 logements sélectionnés ont été répartis en trois catégories « cibles » : la catégorie 1 dite de « logements insalubres », la catégorie 2 représentant les « logements moyens ou de type HLM » et la catégorie 3 regroupant les logements « sains ou de type HQE (neufs ou réhabilités).

La campagne de mesure a été menée sur 10 mois (de novembre 2004 à août 2005). Les logements ont fait l'objet de mesures pendant une semaine et les occupants ont été sollicités pour répondre à des questionnaires. Ils ont également rempli un Budget Espace-temps-Activités permettant d'étudier l'exposition de chacun à l'ambiance de son domicile.

Les polluants mesurés au cours de cette étude sont les mêmes que ceux évalués par l'OQAI dans le cadre de la campagne nationale. Cependant, les mesures de quelques polluants « sensibles » dans le Nord-Pas-de-Calais comme les levures et les moisissures, les fibres minérales artificielles issues des isolants, les

hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) mais aussi les pesticides retrouvés dans l'air intérieur ont été ajoutés [17].

Le résultat reflète une situation contrastée selon les polluants. Globalement, la région Nord-Pas-de-Calais se situe dans la moyenne nationale voire en dessous pour les acariens et les allergènes d'animaux [17]. En revanche, la présence de composés organiques volatils a été révélée notamment celle du formaldéhyde, reconnu comme cancérigène et qui a été retrouvé dans 100% des logements [17] [3]. Le principal problème concerne en fait le monoxyde de carbone (CO) responsable d'un tiers des intoxications et des décès dans la région [17] [18]. Ce constat s'explique notamment par des raisons historiques, socio-économiques et climatiques. S'interrogeant sur des typologies différentes de logements, des mesures hebdomadaires de CO ont permis de mettre en évidence un risque accru chez les familles à faibles revenus. Si l'utilisation de chauffages d'appoint, plus spécifiquement de poêles à pétrole, est incriminée dans ce cas, les autres typologies de logements ne sont pas pour autant exemptes de cette exposition chronique au monoxyde de carbone. Elle est également repérée, en quantités et fréquences moindres, lorsque les logements sont équipés d'appareils à combustion pas ou mal entretenus ou qu'il existe un tabagisme actif. L'enjeu majeur dans l'habitat reste alors la présence d'une ventilation adaptée, qui fait souvent défaut.

Cependant, cette étude n'est pas significativement représentative à l'échelle du Nord Pas-de-Calais notamment de par son faible échantillonnage (60 logements). Mais il faut souligner qu'elle permet tout de même d'avoir une première approche de la qualité de l'air intérieur sur différents parcs de logements en région Nord-Pas-de-Calais et aussi de se positionner par rapport à une moyenne nationale (bilan des campagnes de mesure nationale lancée par l'OQAI citées précédemment).

II - Les principaux polluants mesurés dans l'habitat et leurs sources

Nous sommes constamment soumis dans les locaux à de nombreux polluants de sources multiples présents en plus ou moins grande quantité. Il s'avère extrêmement complexe de dresser une liste exhaustive de toutes les substances et c'est pourquoi nous ne décrivons que les principaux polluants et leurs sources en se basant sur les études réalisées en France.

Les sources de pollution intérieures sont très diversifiées et nécessitent, pour être résumées, d'être regroupées en différentes catégories: les substances d'origines chimiques, physiques et biologiques (tableau 4).

Agents chimiques
Composés Organiques Volatils (benzène, formaldéhyde, trichloréthylène, etc.) Oxydes d'azote (NO _x) Monoxyde de Carbone (CO) Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) Métaux (Plomb) Les Polluants organiques persistants : Pesticides, Polychlorobiphényles (PCB)... Phtalates Polybromo diphenyl éthers Autres composés de la fumée de tabac environnementale
Agents physiques
Radon Fibres minérales naturelles et artificielles Particules
Agents biologiques
Moisissures Allergènes d'acariens Allergènes d'animaux domestiques Végétaux Bactéries, virus

Tableau 4: Principaux polluants dans l'habitat par catégories d'agents [19]

1) La pollution chimique

Les polluants chimiques sont très abondants et très courants dans l'air intérieur, on y retrouve notamment le tabac environnemental (tabagisme passif), l'ozone, les particules en suspension, les oxydes d'azote, les composés organiques volatils, les pesticides, le monoxyde d'azote, les métaux lourds, etc....

Les expositions à ces agents sont essentiellement liées aux substances utilisées dans les matériaux de construction et le mobilier qui vont s'évaporer plus ou moins rapidement dans l'air du logement. Elles sont aussi liées aux activités humaines avec utilisation d'appareils à combustion (cuisine, chauffage), de produits ménagers, cosmétiques et bricolage...

1. La fumée de tabac environnementale

En présence d'un fumeur, le principal polluant dans les logements est la fumée de tabac dite environnementale qui correspond à la fumée qui s'échappe de la cigarette (courant secondaire), à laquelle s'ajoute celle exhalée par le fumeur et qui se propage ensuite dans l'atmosphère (courant tertiaire) (figure 4) [8] [20].

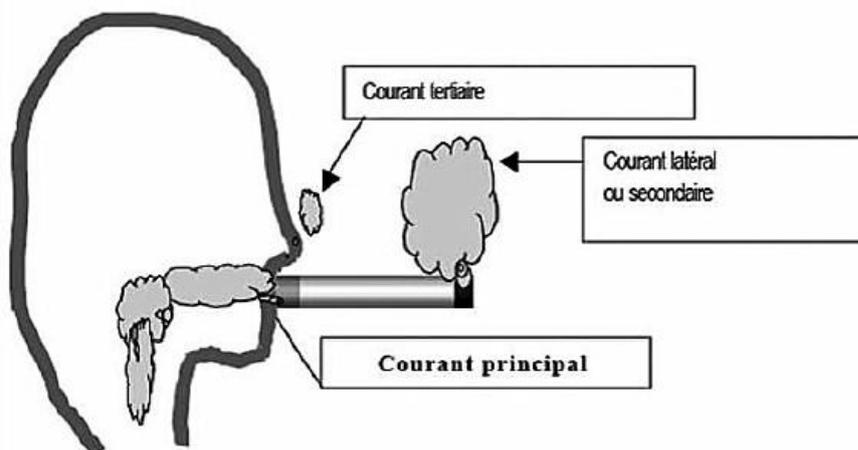


Figure 4: Les 3 courants de la fumée de cigarette [20]

La fumée de tabac représente un danger pour la santé du fumeur mais aussi pour son entourage qui subit un tabagisme passif. D'après une enquête Ipsos de 2001, 30% des individus interrogés ont déclaré être gênés par la fumée de tabac à leur domicile [19].

En effet, la fumée de tabac contient plus de 3000 substances nocives et irritantes, dont plus de 40 sont cancérigènes (figure 5). Il faut savoir que cette fumée environnementale inhalée par l'entourage du fumeur est plus toxique car plus riche en CO et en substances cancérigènes que celle inhalée directement par le fumeur [21].



Figure 5: La composition de la fumée de tabac [22]

La fumée de tabac contribue donc largement à la dégradation de la qualité de l'air intérieur. Par ailleurs, l'interdiction de fumer dans les lieux communs étant de plus en plus généralisée, à l'instar d'autres pays européens, le tabagisme passif peut être important dans les logements car le domicile pourrait bien devenir le seul espace clos où il sera autorisé de fumer.

2. Les composés organiques volatils et semi-volatils

Les composés organiques possèdent par définition au moins un atome de carbone par opposition aux composés inorganiques présents sous la forme d'ions (SO_2 , NO_x ...).

Les composés organiques volatils (COV) appartiennent à différentes familles chimiques dont le point commun est de s'évaporer plus ou moins rapidement à la température ambiante et de se retrouver ainsi dans l'air.

Plus de 500 COV ont été décelés à l'intérieur des bâtiments, ils sont largement utilisés (tableau 5) dans la fabrication de nombreux produits, matériaux d'aménagement et de décoration. Ces polluants sont également émis par le tabagisme et par les activités d'entretien ou de bricolage [15].

Les émissions de composés organiques volatils constituent des pollutions majeures de l'air intérieur et peuvent être de durées variables [23] :

- les composés organiques volatils dont la pollution décroît en quelques jours ou quelques mois, exceptionnellement quelques années. Cela concerne les matériaux et produits de réhabilitation du bâtiment tels que panneaux de bois reconstitués (agglomérés), bois de charpente et planchers, peintures, vernis, mousses isolantes, laines minérales, moquettes, revêtements de sols en linoléum, etc. ;
- les composés organiques volatils dont la pollution est ponctuelle. Sont concernés les produits d'entretien et de nettoyage, tels qu'essence de térébenthine, alcool à brûler, colles, cires, produits de décapage, etc. ;
- les composés organiques volatils dont la pollution ponctuelle est générée par la combustion de l'essence, du gaz, du bois ou du charbon.

De surcroît, ces différentes pollutions gazeuses peuvent être persistantes car elles sont absorbées au sens propre du terme par toutes sortes de « capteurs » présents à l'intérieur du logement tels que papiers peints, moquettes synthétiques, tentures, tissus. Ces « capteurs » rediffusent alors les pollutions qu'ils ont absorbées suivant un rythme plus ou moins long.

Composés organiques volatils	Sources
(+/-) alpha pinène	Désodorisant, parfum d'intérieur, produit d'entretien
1,4-dichlorobenzène	Anti-mite, désodorisant, taupicide
1,1,1-trichloroéthane	Colle
1,2,4-triméthylbenzène	Solvant pétrolier, carburants, goudrons, vernis
1-méthoxy-2-propanol	Laques, peintures, vernis, savons, cosmétiques
2-butoxyéthanol	Peintures, vernis, fongicides, herbicides, traitement du bois, calfatage siliconé
2-éthoxyéthanol	Peintures, laques, vernis
2-méthoxyéthyl acétate	Sources non connues
2-éthyl-1-hexanol	Solvants aqueux
Benzène	Carburants, fumée de cigarette, produits de bricolage, d'ameublement, de construction et de décoration
Butyl-acétate	Parquet, solvants
Cyclohexane	Peintures, vernis, colles
Décane	White-spirit, colles pour sol, cires, vernis à bois, moquettes tapis
Ethylbenzène	Carburant, cires
Isopropyl-acétate	Sources non connues
Limonène	Désodorisant, parfum d'intérieur, cires, nettoyeurs pour sol
m/p-xylène et o-xylène	Peintures, vernis, colles, insecticides
Styrène	Matières plastiques, matériaux isolants, carburants, fumée de cigarette
Tétrachloroéthylène	Nettoyage à sec, moquettes, tapis
Toluène	Peintures, vernis, colles, encres, moquettes, tapis, calfatage siliconé, vapeurs d'essence
Trichloroéthylène	Peintures, vernis, colles, dégraissant métaux
Undécane	White-spirit, colles pour sol, cires, vernis à bois

Tableau 5: Les principaux COV rencontrés dans l'air intérieur [15]

Compte tenu de la multiplicité des sources intérieures, les COV sont finalement plus nombreux et plus concentrés à l'intérieur qu'à l'extérieur des locaux [8] (Tableau 6).

Polluant	Air intérieur en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Air extérieur en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Formaldéhyde	19,6	1,9
Hexaldéhyde	13,6	0,5
Toluène	12,2	3,5
Acétaldéhyde	11,6	1,3
pUndécane	6,2	1,8
m/pXylène	6	2,6
nDécane	5,3	1,9
1-4 Dichlorobenzène	4,2	1,8
1-2-4 Triméthylbenzène	4,4	1,5
pXylène	2,4	1,2
Ethylbenzène	2,3	1
Benzène	2,1	nd
1-Methoxy-2 propanol	2	nd
2-Butoxyethanol	1,6	nd
Terachloréthylène	1,4	nd
Acroléine	1,1	nd
Trichloréthylène	1	nd
Styrène	1	0,4
1- Methoxy-é-propylacétate	nd	nd
2-Butoxy-ethylacétate	nd	nd

Tableau 6 : Comparaison des concentrations médianes intérieures et extérieures de COV [13]

Les résultats de l'étude menée par l'OQAI ont démontré, qu'excepté deux éthers de glycol, les COV sont détectés dans 2,3% (2-butoxy-ethylacétate) à 100% (acétaldéhyde, formaldéhyde, hexaldéhyde, toluène, m/p xylène) des logements [13]. On observe également des niveaux de concentration différents selon le type de COV analysé. Il faut noter que lorsqu'il y a présence d'un garage communiquant avec l'habitation, les taux de COV (tels que le toluène, l'éthylbenzène les o, m/p-xylènes, le n-décane, le n-undécane, le 1,2,4 triméthylbenzène et le styrène) sont nettement plus élevés par rapport à l'ensemble des logements [13].

Selon les résultats de l'étude Habit'air, dans le Nord-Pas-de-Calais, les valeurs des concentrations en COV sont globalement du même ordre de grandeur que les autres logements français [17].

Les composés organiques volatils étudiés par l'OQAI peuvent être classés en 3 grandes familles dont nous soulignerons les principaux représentants.

Les **aldéhydes** sont les composés les plus fréquents (99,4 à 100% des cas) et les plus concentrés dans les logements [13].

Parmi eux, on retrouve le formaldéhyde (CH_2O) qui est le COV le plus abondant dans les logements. En effet, ce dernier a de très nombreuses sources parmi lesquelles les sources de combustion (fumée de tabac, bougie, encens, cuisinière à gaz, poêle à pétrole), les produits de construction et de décoration (colle, vernis..), les produits d'usage courant tels que les produits d'entretien (détergent, désinfectant, lingette), et de traitement (insecticide), les produits d'hygiène corporelle et cosmétique [15].

Les concentrations de formaldéhyde retrouvées sont supérieures à l'air extérieur. Selon l'OQAI, 50% des logements présentent des concentrations supérieures à $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à l'intérieur contre $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à proximité des logements [13]. Ainsi, une majorité des logements du parc dépasseraient les valeurs guides de qualité de l'air intérieur recommandées par l'ANSES soit $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une exposition supérieure à un an et $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une exposition de 2 heures (tableau 3) [20]. Selon le rapport Habit'air, le formaldéhyde a été détecté dans 100% des logements à des concentrations comprises entre $2,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $47,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [17]. Ce résultat est probablement lié aux matériaux de construction et au mobilier ainsi qu'à d'éventuelles impuretés dans les produits qui ne sont pas connues du fabricant.

La famille des **hydrocarbures** est très fréquente puisque détectée dans 83% à 100% des logements [13].

Parmi ces hydrocarbures, le benzène (C_6H_6), est émis par la fumée de cigarette, les véhicules (air extérieur), les produits de bricolage (feutres, adhésifs), d'ameublement et les produits de décoration [15]. Selon le rapport de l'OQAI, la concentration de ce dernier dans les logements varie de $2,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La VGAI proposée par l'ANSE est de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une exposition supérieure à un an (tableau 3). Les concentrations relevées dans les garages communiquant avec les logements sont quant à elles beaucoup plus importantes car elles peuvent aller

jusqu'à 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [13] [20]. Selon le rapport d'Habit'air, le benzène est détecté dans un logement sur 3 (37%) à des concentrations inférieures à 2,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et allant jusqu'à 17,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

On retrouve aussi dans tous les logements le toluène (C_7H_8) et le m/p xylène (C_8H_{10}). Ils sont souvent utilisés comme solvant pour peintures, cires, vernis ou colle [15]. Selon l'OQAI, 50% des logements montrent des concentrations supérieures à des valeurs allant de 5,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (m/p xylène) à 12,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (toluène). Dans l'étude dans le Nord-Pas de Calais, les concentrations en benzène varient de moins de 2,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Enfin, parmi les COV évalués par l'OQAI, la famille des **éthers de glycols**, solvants amphiphiles, à faible toxicité aiguë massivement utilisés depuis les années 60, est utilisée comme solvant industriel et domestique dans la fabrication des peintures, vernis, laques, savons, cosmétiques, fongicides, herbicides ou encore produits de traitement du bois. Les résultats ont révélé que les éthers de glycol s'avèrent peu fréquents car détectés dans 2,3 % à 85 % des logements selon les composés et avec de faibles valeurs inférieures à 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [13].

Les composés organiques semi-volatils (COSV) sont des substances plus lourdes que les COV, non volatiles à température ambiante mais volatiles au contact d'une source de chaleur.

Parmi eux, citons les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) qui sont des contaminants produits par la combustion de la matière organique, notamment le bois et le tabac. Il existe plusieurs dizaines de HAP dont la toxicité est très variable : le benzo(a)pyrène, par exemple, est un cancérigène reconnu [11].

On retrouve également des polluants émergents [24] comme les retardateurs de flamme bromés (polybromés biphényles éthers = PBDE) utilisés couramment dans les plastiques, les textiles et les équipements électriques/électroniques pour les rendre moins inflammables. Les phtalates sont des esters de l'acide phtalique qui sont utilisés dans les matières plastiques (PVC) pour les rendre plus souples, flexibles, mais aussi dans des cosmétiques comme agent fixateur. Ces deux composés ne sont pas chimiquement liés aux constituants des matériaux mais mélangés au cours de la fabrication ce qui fait qu'ils sont progressivement émis.

3. Les oxydes de carbone

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz très toxique, incolore, inodore et sans saveur.

Il se forme lors de la combustion incomplète de matières carbonées telles que le charbon, le pétrole, l'essence, le gasoil, le gaz et le bois. Les principaux facteurs aggravants qui conduisent à une intoxication au CO peuvent être multiples : mauvais fonctionnement d'un appareil utilisant un combustible (appareil de chauffage ou de production d'eau chaude), appareil vétuste ou mal entretenu, mauvaise évacuation dans les conduits de fumée, risque de refoulement par absence d'amenée d'air, raccordement non conforme mais aussi appareils de chauffage d'appoint, fumée de tabac et gaz d'échappement de voiture en fonctionnement dans des pièces fermées [25].

Les résultats de l'étude menée par l'OQAI démontrent des niveaux de monoxyde de carbone en grande majorité voisins de zéro dans les différentes pièces des logements [13]. D'après les recommandations de l'ANSES et de l'OMS (tableau 3), quelques logements présentent des valeurs plus élevées selon la durée d'exposition. Selon les pièces considérées, les maxima observés vont de 130 à 233 ppm sur 15 minutes (VGAI<100 ppm), de 91 à 175 ppm sur 30 minutes (VGAI<60 ppm), de 53 à 120 ppm sur 1 heure (VGAI<30 ppm) et de 31 à 43 ppm sur 8 heures (VGAI<10 ppm). Les valeurs les plus élevées ont été observées dans les cuisines, salles de bain, WC et circulations intérieures des logements [13] [15].

Dans le Nord-pas-de-Calais, 1 logement sur 5 présente des valeurs supérieures à 10 ppm et dans 9 logements sur 60, l'exposition au CO peut aller jusqu'à 6 fois la valeur limite de 10 ppm.

D'après le rapport Habit'air, c'est l'absence de chauffage central qui conduit bien souvent les occupants à utiliser des moyens de chauffage d'appoint (tels que les poêles à pétrole) en mode continu. Ces usages, non adaptés, conduisent à un risque d'intoxication aiguë sévère pour les personnes vivant dans ces logements. De plus, il faut souligner que les foyers les moins favorisés (catégorie 1) sont les plus exposés au monoxyde de carbone notamment en hiver (période de chauffe) comme le montre la figure 6 ci-dessous [17].

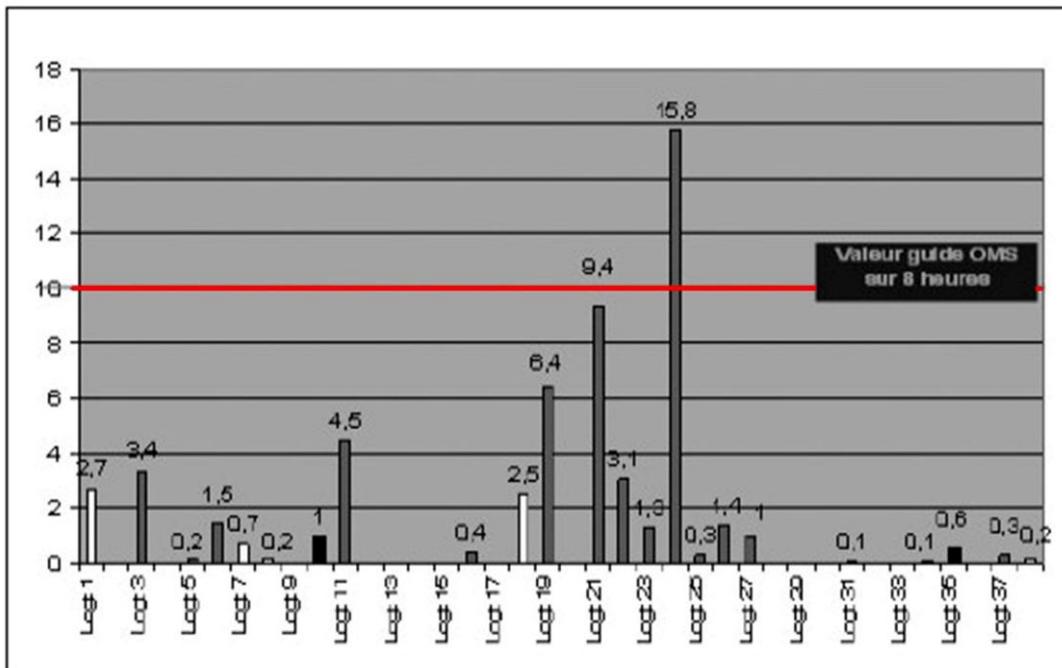


Figure 6 : Valeurs moyennes hebdomadaires de CO (en ppm) mesurées dans le séjour (constituant la pièce de vie principale) en période de chauffe [17]
 (En gris logements « à problèmes »; en blanc : logements « moyens »; en noir : logements « sains ou sans problème apparent »)

Le dioxyde de carbone (CO₂) est un gaz naturel de l'air incolore et inerte. Il est produit par la respiration ou lorsque du carbone ou des composés carbonés sont brûlés. A l'intérieur des bâtiments, le CO₂ est rarement à des niveaux de concentration dangereux pour la santé; 50% des logements présentent des teneurs qui dépassent 756 ppm pour les valeurs moyennes sur la semaine et 1161 ppm pour les valeurs mesurées de nuit [13] [26]. Cependant, le manque d'aération d'une pièce peut conduire à un état de somnolence et une perception de « manque d'air ». C'est pourquoi, il est très utilisé comme indicateur d'efficacité de ventilation d'une pièce [27].

4. Les oxydes d'azote

La famille des oxydes d'azote (NO_x) comprend : le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO₂), le protoxyde d'azote (N₂O), le tétraoxyde de diazote (N₂O₄), le trioxyde d'azote (N₂O₃).

Le NO est issu des phénomènes de combustion à haute température par oxydation de l'azote de l'air. Le NO₂ est, quant à lui, un polluant dit secondaire provenant de l'oxydation du NO. Ils sont émis par des sources extérieures au

logement (industries, trafic automobile) mais aussi à l'intérieur, principalement par les appareils fonctionnant au gaz (cuisinières et chauffe-eau) et dans une moindre mesure, par les poêles à bois ou à essence. Il faut également souligner la présence d'oxyde d'azote dans la fumée de cigarette [21].

Selon une étude de l'APPA (Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique), dans les cuisines mal ventilées où fonctionnent une cuisinière à gaz ou un radiateur en mauvais état, des pics de concentration ont pu être mesurés allant de 720 à 1800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Or, les normes préconisées par l'OMS sont de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 1 heure et de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur le long terme [15]. De plus, il faut remarquer que les taux de NO_2 étaient 2 à 4 fois plus élevés dans une maison chauffée au gaz que dans celle dont le chauffage est électrique.

2) La pollution physique

La pollution physique concerne d'une part des agents tels que le radon, l'amiante, les fibres minérales artificielles et certaines particules. D'autre part, on peut citer les expositions aux nuisances comme le bruit et les ondes électromagnétiques ou encore un taux d'humidité élevé qui peuvent contribuer à cette pollution.

1. Le radon

Le radon est un gaz inodore, incolore, insipide et radioactif (émetteur α de demi-vie= 3.5 jours). Il émane naturellement des sols et des roches granitiques volcaniques. L'irradiation naturelle occasionnée par le radon est la première source d'exposition aux radiations ionisantes en France [25].

Il provient de la désintégration radioactive de l'uranium 238 et du thorium présents en proportions variables dans la plupart des roches (et donc dans la plupart des matériaux de construction). Dans l'air, le radon se désintègre lui-même en plusieurs descendants qui vont alors émettre des particules alpha radioactives. Ces dernières se fixent sur des aérosols ou des poussières présentes dans l'air que l'on inhale ensuite, pour venir se déposer au niveau des voies respiratoires et ainsi endommager l'ADN.

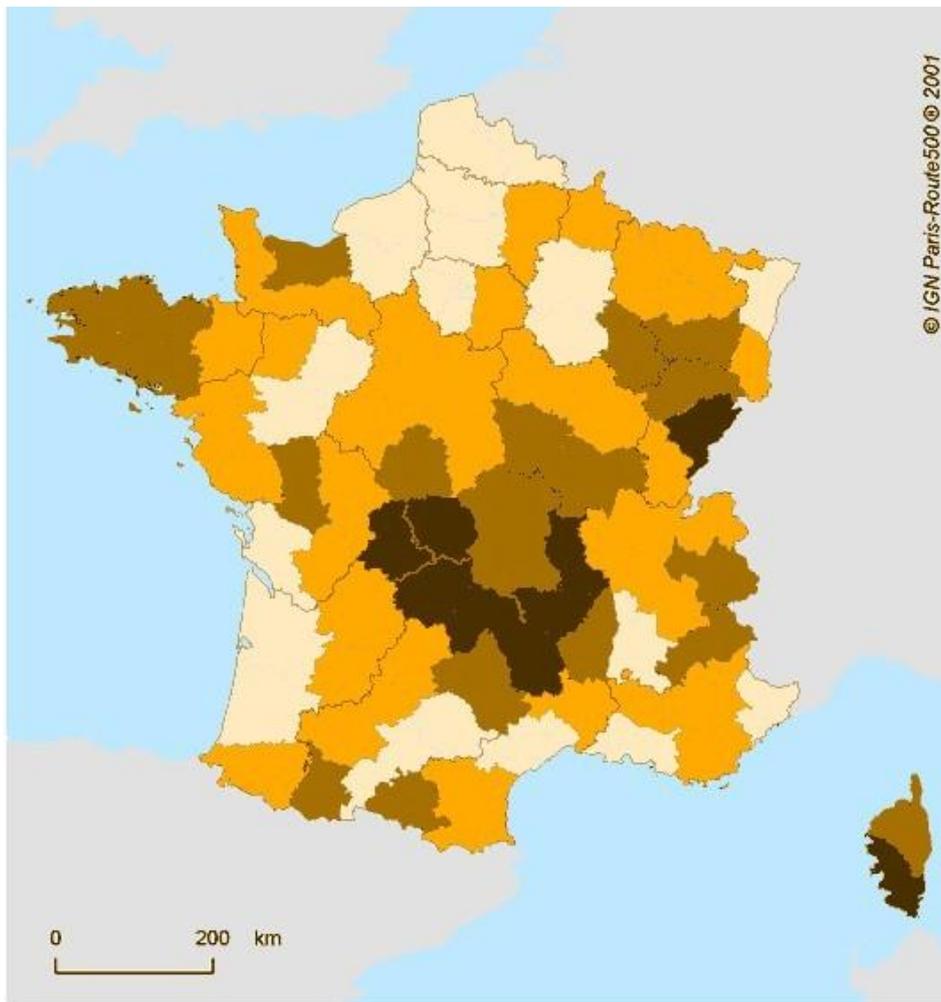
Généralement, ce gaz se dilue rapidement dans l'atmosphère dès qu'il atteint la surface du sol. Mais il n'en va pas de même lorsqu'il s'infiltré à travers pores et fissures jusqu'aux caves et pièces d'habitations. Piégé, il peut alors s'y accumuler et atteindre des concentrations inquiétantes [24].

La concentration en radon varie d'une maison à l'autre dans une même zone géologique. Elle varie aussi fortement d'une région à l'autre, en fonction de la nature géologique du sous-sol (le granit et le schiste en contiennent plus) (figure 7). En outre, certaines conditions exceptionnelles, liées à la composition du sol sous la maison (facteurs géologiques très locaux ou résultats d'activités humaines antérieures), peuvent engendrer des concentrations en radon très élevées.

La concentration en radon varie au cours de la journée (plus élevée le matin), d'une saison à l'autre (plus élevée en hiver) et aussi en fonction des conditions météorologiques (plus élevées lors des basses pressions et lors du phénomène d'inversion de température).

Plus on s'éloigne de la source (cave), plus la concentration diminue. Enfin, plus la ventilation est forte et efficace, moins il y a des risques d'avoir de fortes concentrations de radon dans l'habitat.

L'OMS propose une valeur de référence de 100 Bq/m^3 avec un maximum de 300 Bq/m^3 sachant qu'à partir de 400 Bq/m^3 des mesures sont à prendre [15]. Le risque est plutôt minime en France car les résultats de l'OQAI révèlent que seuls 0,4 à 2,6% dépassent 400 Bq/m^3 et que 50% des logements présentent des teneurs en radon inférieures à environ 30 Bq/m^3 [13].



Moyenne arithmétique départementale



Source : IPSN-DGS, 2000

Figure 7 : Le radon en France [24]

2. Les fibres minérales

Les matériaux fibreux sont largement utilisés dans les bâtiments en raison de leur caractère isolant thermique, phonique et de leur résistance au feu (dans les combles, toitures, greniers, faux plafonds...). Ces derniers peuvent libérer des fibres dans l'air lors de leur mise en place, leur enlèvement mais aussi tout au long de leur vieillissement.

Parmi ces fibres, on retrouve l'amiante, formé naturellement lors du métamorphisme des roches et obtenue ensuite sous forme de fibre minérale [19]. Ce sont des silicates magnésiens ou calciques possédant de nombreuses propriétés comme une résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques, un pouvoir absorbant et une résistance à la tension.

Sous sa forme friable, l'amiante a été utilisé massivement dans les bâtiments dans de nombreux calorifugeages et flochage, ainsi qu'en feuilles, feutres, colles, mastics, plaques cartonnées, ou tressé ou tissé. On le trouve aussi (forme non friable) incorporé dans des produits en ciment (amiante-ciment) ou dans des liants divers (colles, peintures, joints, mortiers à base de plâtre, béton bitumineux, matériaux de friction et même asphaltes routiers ou d'étanchéité...). Il a aussi été utilisé pour les patins de freins ou en garniture de chaudière ou fours électriques, ou encore dans diverses installations électriques (ex : plaques chauffantes) pour ses capacités d'isolation électrique à forte température.

De 400 à 500 fois moins épaisses qu'un cheveu, les fibres d'amiante invisibles dans les poussières de l'atmosphère se déposent au fond des poumons. Elles peuvent alors provoquer des maladies notamment des cancers. Les victimes de ces pathologies sont principalement les « travailleurs de l'amiante », mais aussi des personnes exposées de manière environnementale et souvent à leur insu. En France, bien qu'interdit depuis 1997, l'amiante est selon l'INRS « encore présent dans de nombreux bâtiments et équipements. Et le risque amiante reste sous-estimé dans certaines professions qui peuvent y être exposées. Or, les maladies liées à l'amiante représentent aujourd'hui la deuxième cause de maladies professionnelles et la première cause de décès liés au travail (hors accidents du travail) » [7].

Dès lors, ce sont les fibres minérales artificielles siliceuses qui sont employées par les industries et dans le bâtiment. Elles regroupent les laines d'isolation (de

verre, de laitier et de roche), les filaments continus de verre, les fibres de verre à usage spécial (ou Microfibres®) et les fibres céramiques réfractaires. Les fibres de verre, de roche et de laitier sont utilisées essentiellement en isolations thermique et phonique dans les habitations individuelles et collectives. Pour autant, ces fibres minérales ne semblent pas non plus dénuées de toxicité puisqu'elles sont suspectées d'être cancérogènes [19].

3. Les particules

Les particules sont « des poussières » qui restent longtemps en suspension dans l'air compte tenu de leur petite taille. On distingue les PM 10 (Particulate Mater) dont le diamètre est de 10 micromètres, les PM 2,5 appelées particules fines mesurant de 2,5 micromètres de diamètre et les PM 0,1 ou particules ultrafines de 0,1 micromètre.

Ces dernières sont principalement issues de la pollution de l'air extérieur notamment les sources industrielles et le trafic routier [19].

Il a été mis en évidence que des concentrations élevées de poussières fines dans l'air extérieur entraînent inévitablement une augmentation des valeurs à l'intérieur des bâtiments. Cependant, dans les pièces inoccupées, les concentrations sont quand même moins élevées qu'à l'extérieur car les particules grossières (de 2,5 à 10 micromètres de diamètre) se déposent relativement vite sur les surfaces et sur les sols. Par conséquent, l'air intérieur renferme globalement moins de particules que l'air extérieur.

En revanche, leur concentration s'accroît nettement lorsque des activités telles que le ménage ou le bricolage se déploient car celles-ci sont à nouveau remises en suspension et donc on constate une plus forte concentration en PM 10 qu'à l'extérieur. De plus, la concentration peut encore augmenter à cause de sources supplémentaires de particules liées au phénomène de combustion retrouvé pour le tabac, certains modes de chauffage (poêle à bois, cheminées ou chauffage à gaz) et de cuisson (cuisinière à gaz) mais aussi les bougies et les bâtonnets d'encens [28]. En plus de leurs effets directs sur la santé, les poussières peuvent adsorber certains polluants, permettre des réactions chimiques dans l'atmosphère (formation de polluants secondaires) et augmenter les effets de certaines substances (les pollens par exemple) [25].

En France, 50% des logements ont des teneurs en particules supérieures à $19,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM 2,5 et à $31,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM 10 [13]. Egalement, 50% des logements étudiés dans le Nord-Pas-de-Calais ont des teneurs en particules inférieures à $25,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM 2,5 et à $39,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM 10. On remarque alors que les PM 10 sont retrouvées dans des quantités supérieures aux PM 2,5 [17].

Selon le rapport Habit'air, si l'on tient compte des valeurs repères de risque en exposition chronique de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM 2,5 et de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 (tableau 3), on observe que la majorité des logements dépassent ces valeurs [17].

4. L'humidité

L'humidité n'est pas une pollution en tant que telle. Son augmentation trop importante, liée le plus souvent à un défaut d'étanchéité ou à la condensation de la vapeur d'eau générée par l'activité humaine, peut avoir des effets sur la santé et le confort des occupants [27].

En France, le taux d'humidité varie entre 20 et 80% dans les logements avec une médiane de l'ordre de 50% [13]. Or, un taux d'humidité supérieure à 60% associé à une faible ventilation et une température supérieure à 20°C dans les locaux favorise la prolifération et le développement de micro-organismes comme les acariens ou les moisissures à l'origine de pathologies [15]. L'humidité en excès peut également entraîner une augmentation des émissions de matériaux dégageant alors des substances nuisibles comme le formaldéhyde, l'ammoniac ou des composés odorants (notamment alcools).

3) La pollution biologique

Les biocontaminants de l'air à l'intérieur des bâtiments sont très hétérogènes puisqu'ils vont du pollen aux bactéries, certains insectes en passant par les champignons. Ils comprennent également un large éventail d'allergènes émis par les acariens, les animaux domestiques ou encore certaines plantes.

Ces biopolluants se retrouvent dans les moquettes, les revêtements muraux, les matériaux d'isolation, les installations sanitaires, les circuits de distribution d'eau, les systèmes de climatisation, etc. [21]

1. Les allergènes d'acariens

Les acariens sont des arthropodes microscopiques qui appartiennent à la même classe que les araignées. Ces derniers ont une prédilection pour tous les substrats textiles (tapis, moquette, peluche..) mais la literie est leur niche écologique préférée. La chaleur, l'humidité et l'obscurité sont les conditions optimales pour leur multiplication.

En fait, ce sont des décomposeurs de certains de nos détritrus (notamment les squames de peau) et ils émettent des particules fécales contenant des allergènes [21].

Dans le cadre de la campagne nationale logements, 2 allergènes d'acariens que sont le *Dermatophagoïdes ptérynyssimus* (identifié par l'allergène Der p 1) et le *Dermatophagoïdes farinae* (identifié par l'allergène Der f 1) ont été recherchés dans les poussières de matelas. Les résultats de l'OQAI ont révélé que la moitié des logements dépassent le seuil de sensibilisation aux allergènes d'acariens fixé à 2 µg/g de poussières à partir duquel il a été montré un risque pour certaines personnes de produire les anticorps de l'allergie [13]. La littérature scientifique montre toutefois que l'exposition aux allergènes d'acariens ne pose aucun problème de santé pour près de 80 % de la population [13].

Dans le Nord-Pas-de-Calais, les allergènes ont été mesurés dans 48 des 60 logements concernés. Parmi ces logements, 85 % dépassent la valeur seuil de sensibilisation aux allergènes d'acariens et 60 % dépassent le seuil d'apparition des symptômes allergiques de 10 µg/g de poussières [17]. Cependant, si on considère le seuil de 20 µg/g de poussières (Der f 1 + Der p 1) comme médiane dans les habitats

français, on constate que la médiane pour Habit'air se situe à 14,2 µg/g; elle est donc inférieure [17].

2. Les allergènes d'animaux domestiques

Un foyer sur deux possède un animal domestique, principalement un chien ou un chat. Les allergènes des animaux sont des protéines volatiles portées par des particules présentes dans l'air.

L'allergène majeur du chat, appelé Fel d 1, se situe dans la salive ou dans les poils mais aussi au niveau des glandes sébacées et anales. L'allergène de chat est le plus fréquemment responsable des allergies après les acariens d'autant plus qu'il peut être présent dans l'environnement intérieur sans la présence du chat.

Pour le chien, l'allergène majeur est une protéine appelée Can f 1 qui est présente surtout sur le pelage, les squames et dans la salive. Cet allergène est nettement moins violent et moins fréquent que celui du chat car, en se léchant, le chat s'enduit les poils d'allergènes [21].

Le rapport de l'OQAI retrouve les allergènes de chat et de chien dans 50 % des logements à la limite de la quantification [13].

D'après l'enquête Habit'air, les gammes de concentration dans le Nord-Pas-de-Calais sont les mêmes que celles rencontrées dans le reste de la France, sans distinction entre les catégories de logements. Toutefois, l'étude a pu mettre en évidence la présence allergènes majeurs de chat et de chien dans 59 logements sur 60, mêmes dits « sans animaux ». Ces résultats peuvent alors s'expliquer par la présence de poils d'animaux ayant vécu préalablement dans le logement ou par le fait de côtoyer des gens gardant des animaux domestiques [17].

3. Les plantes d'intérieur

Il apparaît que les végétaux peuvent être considérés comme sources de contaminants dans les habitations [29] [26].

En effet, hormis le pollen et autres allergènes, il a été démontré que les plantes sont capables d'émettre des composés dans l'air. Ainsi, près de 100 000 composés chimiques sont produits par les végétaux et au moins 1700 sont volatils.

Ils sont émis non seulement par les fleurs, mais aussi par les organes végétatifs dont les racines.

Parmi ces composés émis, on retrouve des métabolites secondaires qui sont des molécules synthétisées par les plantes qui interviennent dans les relations avec les stress biotiques, abiotiques ou améliorent l'efficacité de reproduction. Ces métabolites se rencontrent généralement en faible quantité et leur production est variable en fonction de la famille, du genre, de l'espèce et de l'organe considéré. Ils comprennent des solides (ex: les résines), des liquides (huiles essentielles) ou des volatils. Ils servent pour la plante à réduire l'impact des animaux prédateurs ou au contraire à attirer les insectes (odeur de nectar due à des métabolites secondaires aromatiques) afin de faciliter la pollinisation. Ces métabolites sont constitués de groupe de molécules très différents d'un point de vue structurel comme fonctionnel. Une de ces grandes familles est celle des terpénoïdes (hormones, majorité des huiles essentielles, stérols) dont certains composés sont reconnus pour être biologiquement actifs. Un grand nombre de ces terpénoïdes sont des monoterpènes et des sesquiterpènes : les variations dans la biosynthèse et l'émission de ces terpénoïdes dépendent de l'espèce et du stade de développement.

Par ailleurs, les végétaux sont aussi une source importante de COV qui, contrairement aux métabolites secondaires, se présentent en totalité sous forme de gaz ou de mélange inodore, incolore et sans saveur. Ainsi, les végétaux émettent en grande quantité de l'éthylène, des alcools, des isoprènes, des monoterpènes isopréniques ainsi que toute une série de composés chimiques dont le benzène et le toluène dans l'air ambiant.

Peu de travaux sur le sujet existent, les recherches de Yang et al. [30] ont effectivement montré que certaines plantes comme *Spathiphyllum wallisii*, *Sansevieria trifasciata*, *Ficus benjamina* ou *Chrysalidocarpus lutescens* dégagent des composés azotés et aromatiques volatils ainsi que des terpénoïdes.

De plus, la présence de plantes d'intérieur pose le problème de la contamination microbiologique (essentiellement bactérienne et fongique) dans les locaux. Les substrats sur lesquels poussent les végétaux constituent des réservoirs de moisissures qui peuvent être à l'origine du développement de pathologies [29]. Il faut rappeler que la présence de plante peut augmenter l'humidité d'une pièce ce qui peut favoriser le développement de micro-organismes. Seize espèces potentiellement pathogènes ont été isolées dans la terre des plantes en pot,

notamment *Aspergillus fumigatus* (53,5 UFC par gramme de sol sec) et *Scedosporium apiospermum* (97,0 UFC par gramme de sol sec) [29].

Enfin, l'entretien des plantes amène à utiliser des produits phytosanitaires qui peuvent avoir des conséquences néfastes sur notre santé.

A l'heure actuelle, aucune étude ne peut considérer les végétaux comme des polluants dangereux. Ainsi, des recherches complémentaires sur la caractérisation des contaminants, la mesure de leur concentration ainsi que leurs effets sur la santé restent à développer.

4. Les micro-organismes (moisissures, virus et bactéries)

Les moisissures sont des champignons microscopiques dont la croissance est notamment favorisée par la température et l'humidité.

Ainsi, les pièces humides et mal ventilées comme la salle de bain, le bas des murs mal isolés ou avec des défauts d'étanchéité sont des lieux propices au développement des moisissures. Elles sont donc capables de coloniser des supports de nature variée (bois, papier, tissus, produits alimentaires...), apparaissant sous la forme de petites taches de couleur [25].

L'exposition aux moisissures se fait par ingestion, inhalation et contact cutané. Elles produisent des particules microscopiques appelées spores qui se retrouvent en suspension dans l'air [31]. Ces dernières, grâce à leur petit diamètre, peuvent pénétrer au plus profond des voies respiratoires et transporter allergènes et/ou toxines. Quelques espèces fongiques produisent des mycotoxines provoquant des réponses toxiques (*Acremonium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Stachybotrys* et *Trichoderma*) [29].

Dans le Nord-Pas-de-Calais, les moisissures, souvent mises en évidence dans les habitats insalubres, posent un véritable problème comme le prouvent les résultats de l'enquête Habit'air [17].

Tout comme les moisissures, certaines bactéries sont réputées pour leur pouvoir infectieux comme c'est le cas pour les bactéries du genre *légiennella*. Les légionnelles sont des bactéries d'origine hydrotellurique. Cette famille de bacilles à Gram négatif, comporte 43 espèces et 64 groupes sérologiques différents.

On retrouve fréquemment cette bactérie dans les réseaux d'eau chaude (douches, douchettes, bains bouillonnants, bassins à jets et à remous, humidificateurs d'air à gouttelettes d'eau) car elles préfèrent les températures entre 25 et 45 °C mais elles séjournent également dans les réservoirs de tours aéroréfrigérantes des installations de climatisations [24].

Elles sont inoffensives pour l'homme dans l'environnement naturel mais nocives quand elles se retrouvent dans des microgouttelettes d'eau en suspension dans l'air. Ces aérosols atteignent les alvéoles pulmonaires, infestent les macrophages pulmonaires et provoquent leur destruction [11].

L'ensemble des polluants et de leurs sources que nous venons de décrire brièvement sont résumés dans le schéma ci-dessous (figure 8).

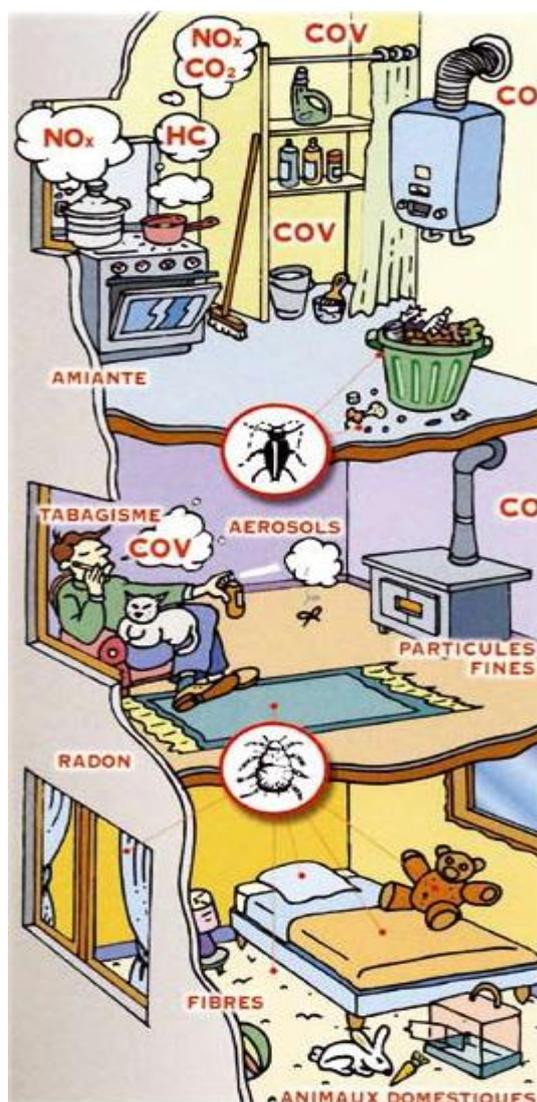


Figure 8 : Les principaux polluants et leurs sources dans l'habitat [19]

III - Les impacts sanitaires de la pollution à l'intérieur des locaux

Alors que les risques sanitaires causés par la pollution atmosphérique extérieure sont connus depuis de nombreuses années, l'interrogation concernant l'impact sur la santé des contaminants présents dans l'air intérieur est beaucoup plus récente. Mais les différents travaux réalisés sur ce sujet ont déjà pu mettre en évidence un grand nombre de polluants et identifier leurs sources. Ainsi, le lien entre certaines substances potentiellement toxiques dans notre environnement et leurs effets sur notre confort ou notre santé apparaît de plus en plus évident voire même avéré pour certains polluants.

1) Les polluants prioritaires

Aujourd'hui, il est fréquent d'avoir recours aux méthodes de hiérarchisation pour classer les substances présentes dans l'environnement selon le risque encouru, qu'il soit environnemental ou sanitaire. Les polluants de l'air intérieur sont nombreux et ne présentent pas tous un intérêt équivalent en termes de santé publique.

Un classement des polluants de l'air intérieur a été effectué sur la base de critères de toxicité à court et long terme, des niveaux d'exposition observés, de la traçabilité de certaines sources ainsi que sur la fréquence d'apparition des polluants dans les bâtiments. Une telle classification permet de disposer d'une vision prospective des enjeux sanitaires liés à la présence potentielle de ces substances dans l'air et aux poussières [15].

Au niveau européen, le comité SCHER (2007) [32] considère, dans son rapport préliminaire sur l'évaluation du risque sanitaire de la qualité de l'air intérieur, que le formaldéhyde, le CO, le dioxyde d'azote, le benzène, le naphthalène, la fumée de tabac environnementale, le radon et le plomb sont les polluants prioritaires à prendre en considération.

En France, l'OQAI a défini une liste de polluants prioritaires avec une classification de 359 substances dites « néfastes » pour la santé [15]:

- **15 substances sont « Hautement Prioritaires » (Groupe A) :** formaldéhyde, benzène, monoxyde de carbone, di-2-éthylhexylphtalate (DEHP), acroléine, plomb, acétaldéhyde, PM10 et PM2,5, cadmium, arsenic, benzo[a]pyrène, benzo[a]anthracène, 1,4-dichlorobenzène et chloroforme.

- **44 substances sont « Très Prioritaires » (Groupe B) :** déchlorane, chrome, fluorène, pyrène, tétrachloroéthylène, trichloroéthylène, furfural, pentachlorophénol, cuivre, éthylbenzène, dioxyde d'azote, antimoine, mercure, styrène, toluène, d-limonène, chlore, hydrocarbures aromatiques polycycliques (mélange exprimé en équivalent toxique de BaP), phosphore, di-méthylphtalate, alcanes chaînes chlorées en C10-13, mélange de PCB, barium, béryllium, cobalt, nickel, vanadium, benzo[b]fluoranthène, benzo[k]fluoranthène, chrysène, dibenzo[a,h]anthracène, indeno[1,2,3-cd]pyrène, éthanol, di(2-éthylhexyl)adipate, manganèse, mercure, anthracène, fluoranthène, phénanthrène, chlorométhane, propionaldehyde, méthyl-t-butyl éther, dibromochlorométhane, bromoforme.

- **292 substances sont « Prioritaires » (Groupe C)** soit 28% des polluants classés

- **8 substances sont « Non Prioritaires »** car elles ne disposent pas de suffisamment de données toxicologiques et d'exposition pour être classées comme telles.

Il faut remarquer que 667 substances sont « Inclassables » car elles ne disposent pas de données toxicologiques et/ou d'expositions suffisantes pour être hiérarchisées avec suffisamment de robustesse.

2) Les principaux facteurs influant l'effet des polluants de l'air intérieur sur la santé

Les effets de la pollution intérieure sur la santé sont complexes et les symptômes ne sont pas spécifiques. Plusieurs polluants peuvent être responsables de la même maladie. De plus, les effets des polluants de l'air intérieur sur la santé vont dépendre de nombreux facteurs.

➤ L'exposition

Les voies d'exposition majoritaires aux polluants sont les voies respiratoires (par inhalation), la peau (par pénétration cutanée) et la voie digestive (par ingestion) [33] (figure 9).

Dans les cas des polluants de l'air intérieur, l'inhalation des substances est bien sûr la plus fréquente même si certains contacts peuvent entraîner des effets cutanés nocifs.

Le niveau d'exposition va varier en fonction de la présence des sources décrites dans le chapitre précédent, de notre mode de vie (tabagisme, activités de loisirs...) ainsi que du taux de renouvellement de l'air.

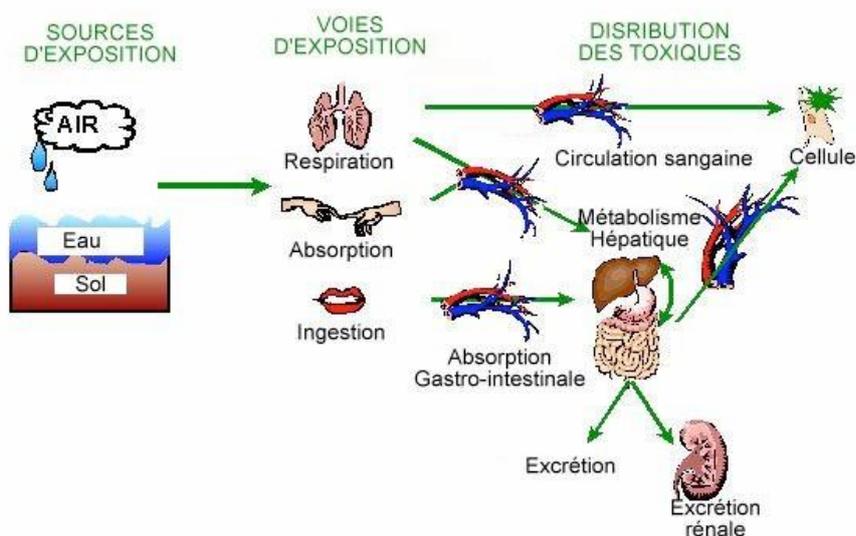


Figure 9 : Les sources et voies d'exposition des polluants ainsi que leur distribution [33]

➤ La durée d'exposition

De façon générale, on distingue les effets liés à de courtes expositions à des concentrations élevées de polluants, de ceux consécutifs d'expositions de longue durée à de faibles doses. Les premiers rassemblent notamment des symptômes qui peuvent aller de la simple irritation jusqu'à l'asphyxie voire la mort dans certains cas d'intoxication au monoxyde de carbone. Les seconds regroupent des pathologies à conséquences importantes à plus long terme pouvant aller jusqu'au développement de certains cancers [15].

➤ Le volume d'air inhalé

L'activité respiratoire est différente selon l'âge (tableau 7), elle est plus importante pour un nouveau-né qui absorbe plus de polluants car il inhale 2 fois plus d'air et respire 3 à 8 fois plus vite. De la même manière, l'activité physique va augmenter la quantité d'air inhalé (tableau 8) [24].

Nouveau-né	40 inspirations par minute
De 15 à 20 ans	20 inspirations par minute
A 30 ans	16 inspirations par minute

Tableau 7 : Influence de l'âge sur l'activité respiratoire [24]

Sommeil	280
Position allongée	400
Position debout	450
Marche	1000
Cyclisme	1400
Natation	2600
Alpinisme	3100
Aviron	3600

Tableau 8 : Influence de la quantité d'air requise (Litre/Heure) en fonction de l'activité physique [24]

➤ La susceptibilité génétique de la personne

Des différences dans le patrimoine génétique peuvent intervenir dans la capacité des individus à transformer les polluants [33].

➤ L'état physiologique de la personne

- L'âge : la sensibilité aux effets toxiques est différente chez les nouveau-nés, les jeunes enfants et les personnes âgées ;
- Le sexe ;
- L'état nutritionnel : la toxicité d'un polluant peut être influencée par la masse de tissus adipeux, la déshydratation, les carences en vitamines ... ;
- L'état de santé : les individus en bonne santé sont plus résistants, car ils métabolisent et éliminent les toxiques plus facilement que ceux qui présentent des atteintes du foie ou des reins où ont respectivement lieu ces 2 phénomènes [33].

3) La sensibilité des personnes exposées

Tout le monde est exposé aux polluants présents dans les environnements intérieurs mais il existe des populations plus sensibles et plus fragiles que d'autres, chez qui des symptômes apparaîtront précocement [31].

On peut citer comme groupe à risque les personnes âgées, les femmes enceintes et leur fœtus mais aussi les personnes souffrant de pathologies respiratoires (asthme, bronchite chronique), cardiovasculaires ou immunitaires.

Les nourrissons et les enfants constituent également une population plus à risque vis-à-vis des polluants intérieurs. En effet, leur système respiratoire est immature et ils inhalent deux fois plus d'air, ingèrent trois à quatre fois plus de nourriture, boivent quatre fois plus d'eau et ont un taux d'absorption cutané trois fois plus important qu'un adulte. Ils présentent aussi un risque élevé d'absorption des polluants lié à des comportements tels que le contact mains-bouche, fréquents chez les jeunes enfants.

4) Effets des polluants de l'air intérieur sur la santé des occupants

1. L'intoxication au monoxyde de carbone

L'intoxication aiguë au monoxyde de carbone est en France la première cause de mort toxique accidentelle (domestique). Chaque année, 4000 à 6000 cas d'intoxication au CO sont déclarés et entraînent environ 300 décès par an [8]. Un cinquième de ces décès surviendrait dans le Nord-Pas-de-Calais qui est une région particulièrement touchée avec en moyenne environ 1200 intoxications par an (figure 10) [18].

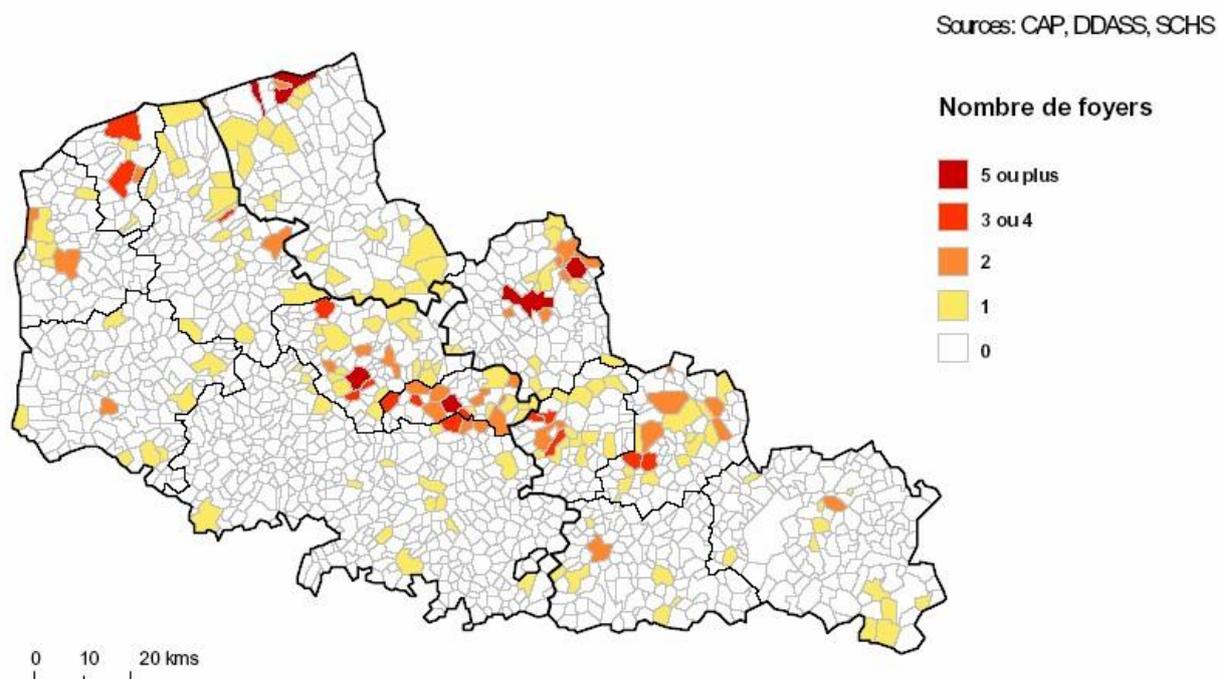


Figure 10 : Foyers d'intoxication au CO dans la région Nord-Pas de Calais en 2007 [24]

Le CO inhalé se fixe facilement et rapidement sur l'hémoglobine (Hb) du sang à la place de l'oxygène formant la carboxyhémoglobine (HbCO) et provoquant une hypoxie.

La gravité de l'intoxication dépend de la concentration en CO, de la durée d'exposition, du volume respiré et de la personne exposée (ventilation, tabac,...)

Les symptômes de l'intoxication aiguë au monoxyde de carbone (figure 11) varient selon l'intensité et la durée d'exposition : maux de tête, nausées, fatigue, perte de connaissance, coma voire la mort. A court terme, des séquelles

essentiellement neuropsychiatriques ont été rapportées : troubles cognitifs, de la personnalité, syndromes parkinsoniens, incontinence, démence, psychose [34].

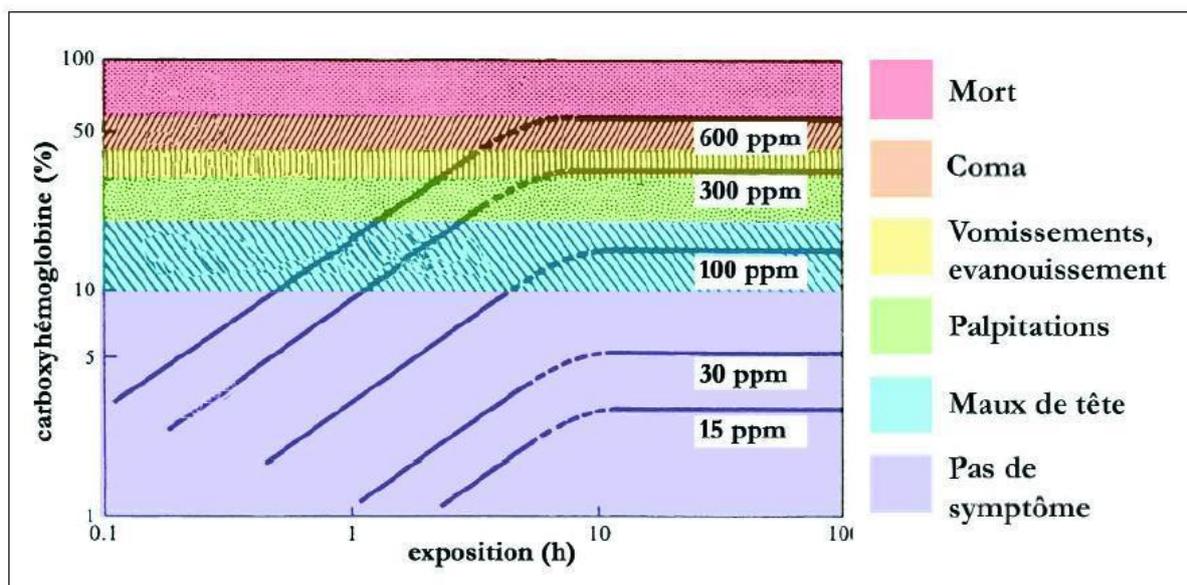


Figure 11 : Symptômes d'intoxication au CO en fonction de l'exposition et de la concentration en HbCO [34]

Il faut savoir qu'une exposition à long terme au monoxyde de carbone peut induire des céphalées et des vertiges auxquelles s'associent parfois des troubles digestifs, des palpitations et de l'angoisse [34].

Le risque d'intoxications au CO fait l'objet depuis quelques années de campagnes d'information auprès du grand public notamment dès le début des périodes de grand froid. Il est essentiel de rappeler les règles de sécurité concernant le fonctionnement des appareils de chauffage, des cheminées et des moteurs à combustion interne. Il faudrait aussi mettre davantage l'accent sur l'installation de détecteurs de monoxyde de carbone. Mais, en dépit des moyens mis en œuvre pour diminuer les effets de ce gaz toxique et des progrès observés en termes de diminution de la mortalité, les intoxications au CO continuent de provoquer des décès et des milliers de prises en charge médicale selon l'INVS [6].

2. Les pathologies respiratoires

A. L'Allergie et l'asthme

En France, 20 à 25% de la population générale présente un terrain atopique, donc propice au déclenchement de pathologies allergiques [19]. Depuis 20 ans, on observe une augmentation de l'asthme et de l'allergie en France. Il faut savoir qu'1 français sur 5 est atteint de maladies allergiques (rhinite, eczéma, urticaire, choc anaphylactique, allergies médicamenteuses, allergies alimentaires...) et que 5% de la population souffre d'asthme (soit 2.5 à 3 millions de cas, 25% sont des enfants) [24]. Egalement, 60 à 80 % des asthmes de l'enfant et 30 à 50 % des asthmes de l'adulte sont d'origine allergique.

L'allergie est une réaction anormale de l'organisme face à des substances extérieures appelées allergènes. Plus exactement, il s'agit d'un conflit immunitaire entre un antigène et un anticorps spécifique de cet antigène (IgE). La relation entre exposition allergénique et sensibilisation vis-à-vis de certains allergènes est clairement établie. Les allergènes (acariens, animaux domestiques, plantes...) sont des substances capables d'entraîner des réactions allergiques (rhinite, conjonctivite, eczéma, dermatite, asthme...) chez des individus exposés et qui présentent un terrain prédisposé, appelé l'atopie.

L'asthme est une maladie chronique qui favorise l'inflammation des bronches ce qui les rend très sensibles à la moindre agression extérieure. Lors d'une crise, les parois des voies respiratoires gonflent ce qui entraîne un rétrécissement de leur calibre et réduit le débit d'air inspiré/expiré.

Plusieurs facteurs sont en cause dont les facteurs génétiques qui jouent un rôle important. Le facteur environnemental est la partie la moins connue de l'allergie. Les personnes sont souvent exposées simultanément à de multiples agents d'où la difficulté d'estimer précisément le degré d'exposition et l'impact de ces expositions sur la santé.

Les acariens sont responsables à eux seuls de plus de 50 % des allergies notamment de l'asthme allergique. Représentant le facteur de risque domestique le plus fréquent, ils posent alors un véritable problème de santé publique [21]. La place

de l'allergie aux animaux domestiques est en deuxième position après l'allergie aux acariens.

La présence de moisissure a été associée à une augmentation de 30 à 50% des troubles respiratoires et/ou asthmatiques [27]. En effet, diverses substances élaborées par les moisissures telles que des mycotoxines, des composés organiques volatils ou encore la présence d'allergène dans les spores sont susceptibles de déclencher voire d'aggraver des pathologies respiratoires et cutanées diverses parmi lesquelles les manifestations allergiques qui occupent une place prépondérante [31] [25]. On estime que 5 à 10% de la population française est sensibilisée aux allergènes de moisissures, en particulier certains asthmatiques sont sensibilisés à *Penicillium*, *Bothrytis* ou *Aspergillus* [25] [21]. *Cladosporium cladospoides*, *Alternaria alternata*, *Aspergillus nidulans* et *Fusarium* semblent être les moisissures allergisantes les plus répandues. Bien que les mécanismes pathologiques soient bien documentés, aucune relation dose-réponse, espèce par espèce et par pathologie, n'est encore disponible. De plus, les sensibilités individuelles sont très variables.

De la même manière, des composés de nature lipopolysaccharidique présents à la surface des bactéries, appelés endotoxines, présentent un fort pouvoir inflammatoire lors de la lyse de ces bactéries. Ces endotoxines peuvent augmenter la sévérité des symptômes chez des patients asthmatiques et allergiques [25].

Egalement, on a démontré que les COV (surtout le formaldéhyde) ainsi que plusieurs autres polluants contenus dans la fumée de tabac présente dans les habitations, provoquent une inflammation des voies respiratoires et des poumons altérant ainsi la réponse immunitaire et favorisant le risque de manifestations respiratoires [19]. Les jeunes enfants exposés aux émissions de COV suite à des travaux de rénovation/décoration présentent un risque significatif de développer des symptômes allergiques [25]. On a pu mettre en évidence que les sujets les plus sensibles comme les nourrissons et les enfants de parents fumeurs sont plus souvent atteints d'affection de la sphère ORL (otites récidivantes, bronchites, crises d'asthmes..). Ils présentent un risque plus important de développer des problèmes respiratoires en grandissant. La fumée de tabac augmente la fréquence et la gravité des crises d'asthme chez les asthmatiques [21].

Tout comme la fumée de tabac environnementale, les particules sont mises en cause dans l'apparition de pathologies respiratoires car elles provoquent aussi une inflammation et une libération de radicaux libres nocifs pour les cellules. En effet,

si les particules les plus grosses se déposent sur l'oropharynx et pénètrent essentiellement par voie digestive, les particules les plus fines (PM 2,5) se déposent sur l'arbre trachéo-bronchique et peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires.

En ce qui concerne plus particulièrement le dioxyde d'azote, il entraînerait chez les asthmatiques, une dégradation de la fonction pulmonaire et une augmentation de la sensibilité aux broncho-constricteurs [25] [21].

Enfin, des effets respiratoires non cancérogènes concernant les fibres minérales de laine sont suspectés mais encore insuffisamment documentés.

L'allergie constitue aussi l'un des principaux risques sanitaires générés par les plantes [29]. Elles sont principalement dues à la présence de pollen, mais résultent également de l'exposition des individus sensibles à la sève ou au latex. Les réactions aux plantes d'appartement sont variées, eczéma ou toxicité cutanée, rhino conjonctivite et asthme. Elles sont plus fréquentes chez les professionnels mais se manifestent aussi par des symptômes respiratoires, dans l'environnement domestique, chez les atopiques.

Il existe aussi un phénomène de plus en plus fréquent d'allergies croisées [35] qui est une réaction à une substance donnée alors que le sujet est sensibilisé à une autre substance apparentée. Les allergies croisées sont ainsi dues à la présence de structures moléculaires semblables ou très voisines dans des substances aussi différentes que des pollens, des aliments, des poils d'animaux, etc. Les allergies croisées les plus fréquentes surviennent entre des pollens, entre des aliments ou entre des pollens et des aliments.

L'environnement professionnel a révélé de nombreuses allergies avant leur description en milieu domestique. Certaines étiologies se limitent actuellement à quelques cas publiés mais peuvent annoncer des pathologies allergiques émergentes.

Parmi les plantes les plus souvent mises en cause, on retrouve le *Yucca* (figure 12) et surtout le *Ficus*, notamment *Ficus benjamina* (figure 13), qui est impliqué dans plus de 20% des cas en milieu professionnel et 6% des cas dénombrés dans l'environnement domestique. La sensibilisation au latex de *Ficus benjamina* est observée chez 2,5% de la population [36].



Figure 12 : *Yucca* [37]



Figure 13 : *Ficus benjamina* [37]

Les allergènes de *Ficus benjamina* sont présents dans le latex (sève) de la feuille et sont transportés sous forme de poussière très allergisante. Ces derniers peuvent se retrouver dans la poussière de moquette, mais aussi de sofas et de matelas... et ce jusqu'à trois mètres de la plante elle-même. Six mois après l'éviction de la plante, ils peuvent encore être présents dans les extraits de poussière.

La symptomatologie allergique est perannuelle. Elle se traduit par des rhinites, des conjonctivites et de l'asthme mais aussi des eczémas atopiques dont l'apparition peut coïncider avec l'acquisition d'un *Ficus benjamina*. Il entrainerait aussi des urticaires par simple contact. Les troubles peuvent s'accroître lors de la manipulation ou du bouturage des ficus.

Il faut savoir qu'il existe une allergie croisée entre le latex de *Ficus benjamina* et celui d'*Hevea brasiliensis*. La fréquence de l'allergie au latex d'*Hevea brasiliensis* dans la population générale est inférieure à 1 %. Mais chez les sujets atopiques la prévalence de sensibilisation cutanée oscille entre 3 et 10%. Il a été évalué que 10 % des patients allergiques au latex d'*Hevea brasiliensis* réagissent également aux allergènes de *Ficus benjamina* [38]. Le contact avec la plante ainsi que l'inhalation

de particules végétales peuvent induire une réaction allergique soudaine et violente chez les sujets allergiques au latex. Toutefois, il semble que l'allergie au latex de *Ficus benjamina* soit largement indépendante de l'allergie au latex d'*Hevea brasiliensis*.

Cette sensibilisation est en revanche communément associée à une allergie à la figue puisqu'une réaction croisée existe aussi entre le ficus et le figuier qui appartiennent tous deux à la famille des Moracées. Des chocs anaphylactiques après ingestion de figue sont survenus chez des malades sensibilisés au ficus. Des allergies croisées pourraient concerner d'autres fruits exotiques comme le kiwi, la banane, l'avocat, l'ananas ou encore la papaye.

Les allergènes responsables de ces réactions croisées sont vraisemblablement des enzymes notamment des thiolprotéases comme la papaïne.

D'autres allergies aux plantes vertes se retrouvent essentiellement dans l'environnement professionnel (horticulteurs). Parmi les espèces concernées, on peut citer des cactus appartenant au genre *Schlumbergera* (cactus de Noël) (figure 14) qui sont responsables d'urticaire de contact lors de la manipulation de ces plantes et de quelques cas de rhinoconjonctivite et d'asthme.



Figure 14 : *Schlumbergera truncata* (37)

Le latex des poinsettias (*Euphorbia pulcherrima*) (figure 15) peut déclencher asthme, rhinoconjonctivite et éruption généralisée. Il existe un haut degré d'allergie croisée entre ce latex et celui d'*Hevea brasiliensis*.



Figure 15 : *Euphorbia pulcherrima* [37]

Des manifestations d'allergie respiratoire et cutanée peuvent aussi survenir avec le *Spathiphyllum wallisii* (fleur de lune) (figure 16) et le *Cyperus papyrus* (figure 17).



Figure 16 : *Spathiphyllum wallisii* [37]



Figure 17 : *Cyperus papyrus* [37]

Un cas d'allergie à la misère (genre *Tradescantia*) (figure 18) a été rapporté chez un patient atopique avec une réaction sous forme de prurit de la face, du pharynx et des conjonctives, un œdème des lèvres ainsi que de l'asthme.



Figure 18 : Tradescantia fluminensis [37]

Il existe également des allergies à certaines fleurs coupées ou séchées : tournesols, chrysanthèmes, gerberas, mimosas, tulipes, pois de senteur, freesia, iris... [21] Un risque de choc anaphylactique existe chez les patients allergiques aux fleurs lors de leur consommation dans certaines salades [36].

B. La bronchopneumopathie chronique obstructive

La bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) est une affection pulmonaire caractérisée par un blocage persistant de l'écoulement des gaz inspirés au niveau des poumons engageant le pronostic vital. La BPCO se caractérise par des troubles respiratoires progressifs associés à une réponse inflammatoire des poumons à des particules ou à des gaz nocifs. Cette pathologie concerne environ 4 à 10% de la population européenne. La principale cause est associée dans 70% des cas au tabagisme et à la fumée de tabac mais on suspecte également les gaz de combustions, les particules de l'air ambiant et l'exposition chronique aux moisissures associés à une réponse inflammatoire des poumons [27].

C. Les infections respiratoires

Le développement de bactéries telles que *Legionella pneumophila* peut favoriser l'apparition d'infections comme la légionellose. Cette pathologie affecte surtout l'appareil respiratoire entraînant, dans sa forme bénigne, un syndrome grippal appelé fièvre de Pontiac. Dans sa forme maligne, appelée légionellose ou maladie des légionnaires, une pneumopathie aiguë grave peut se déclencher. La létalité, de l'ordre de 15%, peut atteindre 40% chez les malades hospitalisés et plus chez les immunodéprimés [24]. Cette maladie, à déclaration obligatoire, affecte plus de 500 personnes par an en France [2] [27].

Certaines moisissures comme *Aspergillus* sont réputées pour leur pouvoir infectieux au niveau des poumons provoquant une aspergillose invasive. Cette infection pulmonaire menace le pronostic vital et apparaît essentiellement chez les personnes aux défenses immunitaires abaissées par une pathologie (exemple le SIDA) ou un traitement [25]. L'aspergillose broncho pulmonaire allergique (ABPA ou maladie de Hinson-Pepys) est une pathologie très rare et due à une réaction de l'appareil respiratoire des asthmatiques à l'*Aspergillus*. D'autres espèces comme *Phialophora verrucosa*, *Fusarium solani* et *Scedosporium inflatum* ont été récemment décrites comme pathogènes susceptibles de provoquer de graves infections opportunistes [39].

Il convient de souligner que diverses études indiquent que la présence de plantes en pot dans les locaux constitue un risque sérieux de colonisation respiratoire, surtout chez les personnes souffrant de mucoviscidose, ou présentant des troubles sévères du système immunitaire (chimiothérapie, transplantation d'organe ou de moelle osseuse, SIDA...) [29]. Cependant, la contribution exacte des plantes dans le problème de la contamination microbiologique n'est pas encore clairement estimée. Les quelques travaux sur ce thème tendent à montrer qu'elle n'est pas significative compte tenu notamment des nombreuses sources potentielles de contaminations microbiologiques au sein d'un local. Toutefois, la lutte contre les maladies nosocomiales impose la suppression des plantes en pot des environnements où séjournent des personnes sensibles (hôpitaux, cliniques...).

Enfin, les symptômes de ces maladies respiratoires peuvent être aggravés par la fumée de tabac mais aussi par les particules de combustion qui véhiculent des micro-organismes favorisant ainsi la dissémination de maladies infectieuses [2] [27].

3. Les syndromes

A. Le syndrome des bâtiments malsains

L'OMS a regroupé, sous le terme de « Syndrome des Bâtiments Malsains » (SBM) ou Sick Building Syndrome (SBS), un ensemble de symptômes non spécifiques et mal définis. Ces derniers seraient associés à un séjour plus ou moins prolongé dans un bâtiment (essentiellement des immeubles à usage de bureau) dont l'agent causal ne peut clairement être identifié.

Ainsi, le SBM pourrait se définir par quatre caractéristiques [24] :

- une association de symptômes hétérogènes (Tableau 9) ;
- une pathologie « collective » : le terme de bâtiment malsain est retenu si plus de 20 % des personnes sont atteintes, chiffre arbitraire ;
- un même lieu, climatisé ou non ;
- sans étiologie spécifique et univoque.

-
- irritation des muqueuses (nez, lèvres, langue, gorge secs, nez bouché, écoulement nasal, éternuements, picotements et écoulement oculaires)
 - symptômes respiratoires (dyspnée d'effort, toux, sifflements thoraciques)
 - symptômes neuropsychiques (céphalées, asthénie, difficulté de concentration, diminution des capacités mnésiques, engourdissement, étourdissements)
 - symptômes neurosensoriels (goût inhabituel dans la bouche, sensation d'éblouissement)
 - symptômes cutanés (prurit, sécheresse de la peau, éruptions)
-

Tableau 9 : Symptômes décrits dans le syndrome des bâtiments malsains [8] [27]

Il faut noter que certains polluants comme les composés organiques volatils sont connus pour être à l'origine de symptômes tels que des irritations de la peau, des muqueuses et du système pulmonaire, des nausées, des maux de tête ainsi que des vomissements [19]. En particulier, le formaldéhyde est connu pour être un irritant des yeux, du nez et de la gorge [25].

L'exposition aiguë au NO₂ provoque une toux, une irritation de la gorge et des yeux pouvant conduire en cas d'exposition prolongée à des difficultés respiratoires.

Certaines moisissures qui se développent peuvent entraîner, notamment chez les personnes sensibles, une irritation des muqueuses mais également de la toux, des maux de tête...

Certains facteurs aggravants comme l'atopie, le stress professionnel ou encore les problèmes relationnels augmenteraient la fréquence et l'intensité des symptômes [24].

Ces symptômes négatifs peuvent diminuer la capacité d'apprentissage en milieu scolaire ainsi que la productivité au travail avec notamment un impact économique non négligeable [8]. Cependant, des études ont mis en évidence que certains facteurs tels que les mauvaises odeurs, le bruit, la sur-occupation des locaux, l'ergonomie et un éclairage insuffisant pourraient générer un stress comportemental et ainsi développer des symptômes similaires à ceux provoqués une mauvaise qualité de l'air intérieur [27].

B. Le syndrome d'hypersensibilité chimique multiple

Le Syndrome d'hypersensibilité chimique multiple (SHCM) est une affection acquise, constituée de symptômes touchant de multiples organes et survenant à la suite d'une exposition à des substances chimiques dans des concentrations nettement inférieures à celles nécessaires pour générer des effets notoires dans la population générale [40].

En 1999, une conférence internationale de consensus a défini 6 critères permettant d'identifier le SHCM [24] :

- les symptômes sont chroniques ;
- les symptômes sont non spécifiques et touchent plusieurs organes ;
- les symptômes apparaissent en présence de l'odeur du produit chimique et disparaissent quand l'exposition cesse ;

- les symptômes sont reproductibles avec l'exposition ;
- les symptômes sont déclenchés par des expositions de faible niveau (inférieur à celui supporté auparavant ou habituellement supporté) ;
- les réponses apparaissent pour de multiples substances chimiques sans relation.

Les six critères doivent être présents pour affirmer la maladie, et toutes les investigations physiologiques ainsi que l'examen physique doivent être normaux.

Les toxiques chimiques incriminés sont par exemple les solvants organiques, les pesticides, le mercure, le sulfure d'hydrogène ou encore le monoxyde de carbone. Ainsi, les produits domestiques qui induisent le plus souvent ce syndrome sont les décapants, les produits de beauté et parfums ainsi que les produits dentaires.

Les hypothèses concernant l'origine du SHCM sont multiples : neurologique, endocrinienne, immunitaire et psychologique. Il faut remarquer qu'un terrain allergique est fréquemment retrouvé à l'interrogatoire. L'exacerbation de la sensibilité aux produits chimiques fait que le patient ne peut plus tolérer une exposition aux produits chimiques courants sans ressentir par ordre de fréquence des symptômes allant des maux de tête à une irritation oculaire en passant par asthme, gastralgies et autres vertiges mais aussi manque de concentration et douleurs musculaires.

4. Les pathologies cardiovasculaires

Il est important de souligner que les pathologies cardiovasculaires constituent la première cause de mortalité dans les pays industrialisés (42% en Europe) [19].

Les principaux facteurs sont bien sûr liés au mode de vie (mauvaise alimentation, activité physique insuffisante, stress...). Cependant, l'exposition à la fumée de tabac, aux particules fines, au monoxyde de carbone et à certains autres polluants gazeux (notamment les oxydes d'azote) pourrait être considérée comme un facteur favorisant le développement de troubles cardio-vasculaires [27]. En particulier, le tabagisme passif serait associé à une augmentation de 25% des accidents coronariens et augmente notamment de 50% le risque d'avoir une crise cardiaque [8] [41]. Il altère les parois des artères et double le risque d'accident vasculaire cérébral [41].

5. Les perturbations endocriniennes

Un perturbateur endocrinien est une molécule qui mime, bloque ou modifie l'action d'une hormone et perturbe le fonctionnement normal d'un organisme.

Une neurotoxicité développementale et une toxicité sur l'appareil reproducteur ont été mises en évidence chez l'animal suite à l'exposition aux retardateurs de flamme (PBDE notamment). Chez l'homme, les retardateurs de flamme sont responsables d'une altération des spermogrammes et d'une perturbation des hormones thyroïdiennes [24].

Egalement, la toxicité des phtalates a été démontrée chez le rongeur entraînant des problèmes hépatiques, rénaux, testiculaires et thyroïdiens. Chez l'homme, ces derniers présentent des effets sur la reproduction, comprenant les effets sur la fertilité et sur le développement du fœtus ou du nouveau-né.

6. Les cancers

Une exposition continue à la pollution intérieure engendrerait une prédisposition accrue pour de nombreux cancers (tableau 10).

En particulier, les composés organiques volatils présentent le risque cancérigène le plus élevé. Certaines substances telles que le formaldéhyde ou encore le trichloréthylène ont été classées respectivement comme cancérigène et probablement cancérigène chez l'homme par le CIRC [42]. Le benzène s'avère être nocif notamment au niveau du système hématopoïétique car à l'origine de certaines leucémies [43]. De plus, il a des propriétés mutagènes, carcinogènes et embryotoxiques avérées; il appartient au groupe « substance cancérigène » de la classification du CIRC. Le toluène reste un COV préoccupant en raison de ses possibles effets sur la fertilité et le développement [26].

Plus d'un million de personnes décèdent du cancer du poumon chaque année dans le monde. La pollution de l'air à l'intérieur des habitations serait responsable d'environ 1,5% de ces décès [5]. En Europe, le cancer du poumon représente la principale cause de mortalité par cancer. Les sources de combustion insuffisamment ventilées mais surtout le tabac et l'exposition à fumée de tabac environnementale dans les habitations augmentent très nettement les risques de cancer du poumon mais aussi de la sphère ORL. La fumée de tabac environnementale est classée

comme cancérogène par le CIRC [19] [42]. On estime qu'environ 17 % des cancers du poumon parmi les non-fumeurs sont attribués à un tabagisme passif durant les premières années de la vie. Il faut d'ailleurs souligner que le risque de développer un cancer du poumon chez un non-fumeur est augmenté de 25% si le conjoint fume.

Classé comme cancérogène pour l'homme [42], l'amiante est interdit en France depuis 1997 pour la plupart des usages courants et pour les constructions neuves. Cependant, il existe encore un risque pour les opérations de réhabilitation. En effet, après plusieurs années d'exposition, l'inhalation de ces fibres peut provoquer des mésothéliomes (cancers de la plèvre) et des cancers du poumon [2].

Des études montrent une association positive entre cancer du poumon et exposition au radon dans les habitations avec un excès de risque relatif estimé entre 6 et 9 % pour une augmentation de 100 Bq/m³ de l'exposition moyenne pendant 25 ans [24] [44]. Cette estimation est cohérente avec celle obtenue à partir des résultats des mineurs d'uranium mais elle se heurte aux faibles puissances des études prises isolément.

Le radon doit être considéré comme un agent carcinogène réel impliqué dans la genèse du cancer du poumon après le tabac, comme c'est le cas pour l'amiante. On peut considérer qu'en Europe l'exposition domestique au radon serait responsable de 9 % des décès liés au cancer du poumon [24]. Le radon serait responsable de 5 à 12 % des décès attribuables par cancer broncho-pulmonaire (2ème cause) en France [24]. Associé au tabagisme, le risque de cancer pulmonaire est multiplié par 3 [42].

Les fibres minérales artificielles seraient moins toxiques car moins persistantes dans le tissu pulmonaire [25] mais en l'absence d'informations supplémentaires, elles ont été définies par le CIRC comme « agent inclassable quant à leur cancérogénicité pour l'Homme » [42].

Enfin, il existe une présomption de risque de cancer du poumon [42] liée aux particules de combustion (cancérogène probable), dont les particules fines et ultra fines de l'air ambiant [25], qui se déposent plus facilement au niveau de l'arbre bronchique.

SUBSTANCES	EFFETS SANITAIRES DOMINANTS		
	Aigus	Chroniques	Cancers
BIOCONTAMIANTS			
Allergènes de chiens, chats, acariens	Respiratoires (allergies, asthme)	Respiratoires (allergies, asthme)	ne
COMPOSES CHIMIQUES			
CO	Cardiovasculaires et neurologiques	Cardiovasculaires	ne
Fumée de tabac environnementale	Irritations yeux, tractus respiratoire	Cancers pulmonaires	1
N02	Cardiorespiratoires	Cardiorespiratoires	ne
Acétaldéhyde	Irritations yeux, tractus respiratoire	Cancers: nasal, larynx	2B
Acroléine	Respiratoires	ne	3
Benzène	Neurologiques et immunologiques	Leucémie	1
1,4 dichlorobenzène	Développement	Rénaux	ne
Ethylbenzène	Développement	ne	3
Formaldéhyde	Respiratoires	Cancer naso-pharyngé	1
Styrène	Neurologiques et immunologiques	Neurologiques Cancers pulmonaires	2B
Tétrachloroéthylène	Rénaux	Neurologiques Cancers (œsophage, lymphatique)	2A
Toluène	Neurologiques	Neurologiques	3
Trichloroéthylène	Neurologiques	Cancers testicules, foie, lymphatique	2A
Xylènes	Neurologiques	Neurologiques	3
COMPOSES PHYSIQUES			
Particules fines	Respiratoires et cardiovasculaires	Cardio-pulmonaire et cancers broncho-pulmonaires	2A
Radon		Cancers pulmonaires	1
Amiante		Cancers pulmonaires	1
Fibres minérales artificielles	Irritations cutanées	ne	3

¹Classement des cancérrogènes selon le CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer): 1: Cancérrogène chez l'Homme ; 2A: Cancérrogène probable chez l'Homme ; 2B : Cancérrogène possible chez l'Homme ; 3: Inclassable; 4: probablement non cancérrogène chez l'Homme. **ne** = non évalué

Tableau 10 : Principaux polluants et effets sur la santé [15] [42]

Enfin, l'exposition à l'intérieur du logement est le résultat d'interactions complexes entre la structure du logement, les matériaux de construction, l'environnement extérieur, les caractéristiques et les activités des occupants. L'impact sur la santé des habitants en particulier celle des enfants n'est pas encore tout à fait bien connu.

La phytoremédiation de l'air intérieur

I - Généralités

Les résultats des premières investigations ont provoqué une véritable prise de conscience auprès des autorités. Ceci a entraîné une demande croissante de données afin d'adopter des stratégies de remédiation.

1) Les principaux moyens de remédiation

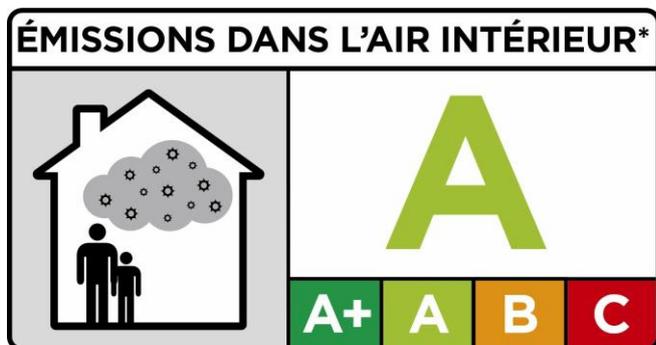
Le contrôle des sources d'émission et l'amélioration des systèmes de ventilation constituent les deux principales voies d'afin de limiter l'exposition humaine à la pollution intérieure.

1. Limiter les sources de pollution

Il apparaît d'abord évident d'agir en amont en limitant autant que possible les sources de polluants à l'intérieur des locaux.

Cela passe par l'adoption de certains réflexes: éviter de fumer à l'intérieur, faire entretenir ses appareils à combustion de chauffage et de production d'eau chaude, adopter une utilisation rationnelle des produits tels que les produits ménagers, de bricolage mais aussi bougies ou encens, etc.

Egalement, il convient de mieux choisir ses produits de construction et d'ameublement ainsi que ses revêtements muraux et de sol, ses peintures et vernis pour lesquels un étiquetage basé sur les émissions de COV est obligatoire depuis janvier 2012 [45] (figure 19) (tableau 11). Grâce à cet étiquetage, les consommateurs disposent d'informations sur le degré d'émissivité de ces produits et peuvent y faire attention lors de leur choix, par exemple pour une chambre d'enfant. Les produits les plus performants seront ainsi mis en valeur avec des effets bénéfiques attendus en matière d'innovation et une amélioration à terme de la qualité des produits disponibles sur le marché. De plus, certains matériaux portent éventuellement un écolabel (figure 20) qui signale des produits limitant leur impact sur l'environnement.



*Information sur le niveau d'émission de substances volatiles dans l'air intérieur, présentant un risque de toxicité par inhalation, sur une échelle de classe allant de A+ (très faibles émissions) à C (fortes émissions).

Figure 19 : Etiquette obligatoire basée sur les émissions de COV [46]

Classes	C	B	A	A+
Formaldéhyde	>120	<120	<60	<10
Acétaldéhyde	>400	<400	<300	<200
Toluène	>600	<600	<450	<300
Tétrachloroéthylène	>500	<500	<350	<250
Xylène	>400	<400	<300	<200
1,2,4-Triméthylbenzène	>2000	<2000	<1500	<1000
1,4-Dichlorobenzène	>120	<120	<90	<60
Éthylbenzène	>1500	<1500	<1000	<750
2-Butoxyéthanol	>2000	<2000	<1500	<1000
Styrène	>500	<500	<350	<250
COVT	>2000	<2000	<1500	<1000

Tableau 11 : Seuils limites des concentrations d'exposition aux COV [46]
 exprimés en $\mu\text{g.m}^{-3}$



Figure 20 : Ecolabels européens [4]

2. Aérer/ventiler les locaux

Il est aussi important d'agir en aval d'où la nécessité d'aérer et de ventiler les locaux afin d'assurer le renouvellement de l'air. Il s'agit dans ce cas de veiller à laisser l'air dans le logement (en évitant de boucher les entrées d'air et en entretenant son système de ventilation) et d'aérer plus largement en ouvrant les fenêtres lors des activités susceptibles de générer des polluants (travaux de bricolage ou de décoration, cuisson des aliments...) ou de l'humidité (séchage du linge, douches...). En outre, l'aération régulière permet d'amener de l'air neuf et d'évacuer de l'air vicié [4].

3. Les systèmes d'épuration de l'air

Toutefois, il est possible ensuite d'adjoindre des techniques complémentaires telles que des épurateurs d'air au sens large (figure 21). Parmi les systèmes d'épuration existants, beaucoup font appel à des processus physico-chimiques qui favorisent la dégradation des polluants. Il s'agit de traitement thermiques (incinération, condensation, plasma...), de procédés de transfert avec ou sans réactions chimiques (adsorption, absorption, oxydation catalytique), de systèmes biologiques (biofiltres, biolaveurs). Ces techniques existent dans le monde industriel depuis longtemps, mais leur application dans des milieux de vie nécessite une compatibilité avec certaines contraintes: traitement de mélanges complexes à faibles concentrations, fonctionnement à pression, température et humidité ambiantes, occupation d'un faible volume, génération d'un peu de bruit et entretien aisé. Actuellement, divers procédés sont développés tels que des filtres poussières ou encore des adsorbants (charbon actif, zéolithes...), dont certains peuvent être incorporés au chauffage central, à la ventilation ou à l'air conditionné. La photocatalyse présente l'avantage d'oxyder de nombreux contaminants jusqu'à leur destruction complète. Les applications de ces techniques pour l'air intérieur sont en expansion [47].



Figure 21 : Les différentes techniques d'épuration de l'air [48]

Cependant, il reste encore beaucoup de questions en suspens sur ces dispositifs: leur dimensionnement, les sous-produits éventuellement formés, leur durée de vie...

Ainsi, une évaluation normalisée de l'efficacité et de l'innocuité des systèmes de phytoremediation se révèle indispensable à mettre en place. En ce sens, une norme AFNOR pour les épurateurs d'air autonomes pour applications tertiaires et résidentielles (XP B44-200) a été publiée en mai 2011. Des normes AFNOR sur l'évaluation des performances des procédés photocatalytiques sont parues en 2009 : normes AFNOR XP B44-011 et XP B44-013 qui indiquent les méthodologies à mettre en oeuvre au niveau laboratoire pour tester des matériaux, prototypes ou systèmes commerciaux d'épuration d'air intérieur par photocatalyse, pour la dégradation des NOx et COV [49].

Parmi les différentes techniques d'épuration de l'air, l'utilisation des végétaux a sa place en répondant à une demande sociale qui s'inscrit dans le retour à des aspirations centrées sur le « naturel », le biologique et « l'éco-logis ».

2) Principes fondamentaux servant de base à l'utilisation des végétaux

L'épuration d'un milieu par les plantes porte sur le principe général de phytoremédiation, du grec « phyto » qui signifie plante et du latin « remedium » qui signifie rétablissement de l'équilibre (remédiation). La phytoremédiation peut se définir comme l'utilisation de plantes (avec ou sans association de micro-organismes), pour extraire, accumuler, et/ou dégrader les contaminants du milieu où elles se développent [50].

Ce procédé était initialement employé pour parler de décontamination des sols et des eaux par les végétaux. En effet, depuis plusieurs décennies, les propriétés de certaines espèces végétales sont exploitées dans ce but. On les emploie entre autres pour décontaminer les sols des sites militaires souillés par divers métaux, composés organiques et/ou TNT, les sols et les eaux de drainage des sites agricoles pollués par des herbicides et des pesticides, les sols et les eaux usées provenant de divers secteurs industriels ou encore domestiques.

La phytoremédiation est un large concept, qui implique différents processus qui peuvent, en fonction des besoins, faire appel à différentes voies physiologiques (figure 22) [51] [52] :

- **La phytostabilisation** vise à stabiliser le polluant dans le sol en diminuant soit sa mobilité, soit sa biodisponibilité notamment en limitant son transfert dans d'autres compartiments tels que les nappes phréatiques par exemple.
- **La phytoextraction** consiste en l'extraction par la plante de polluants comme les métaux lourds qui sont ensuite transportés puis concentrés dans différentes parties récoltables. La pollution des sols par les métaux est l'un des problèmes les plus difficiles à traiter dans la mesure où ils ne sont pas biodégradables. Pour véritablement dépolluer, il faut extraire ces métaux. Il existe des plantes, dites hyperaccumulatrices, capables d'accumuler plus de 1% de métaux dans leurs tissus. Ces végétaux deviennent le plus souvent des déchets industriels. Certains procédés visent à récupérer les métaux

accumulés mais ne sont utilisés que pour des métaux à forte valeur ajoutés (métaux rares) ou fortement accumulés.

Lorsque l'extraction des polluants du sol se fait au niveau des racines, on parle de rhizofiltration.

- **La phytovolatilisation** permet l'extraction de polluants du sol par le végétal qui sont alors relargués dans l'atmosphère par évapotranspiration.
- **La rhizodégradation** repose sur la dégradation des polluants par les racines de la plante associée à la présence de microorganismes dont le développement est dépendant de la présence de celle-ci.
- **La phytodégradation** consiste à la transformation des polluants dans la plante par voie métabolique en substances moins toxiques.

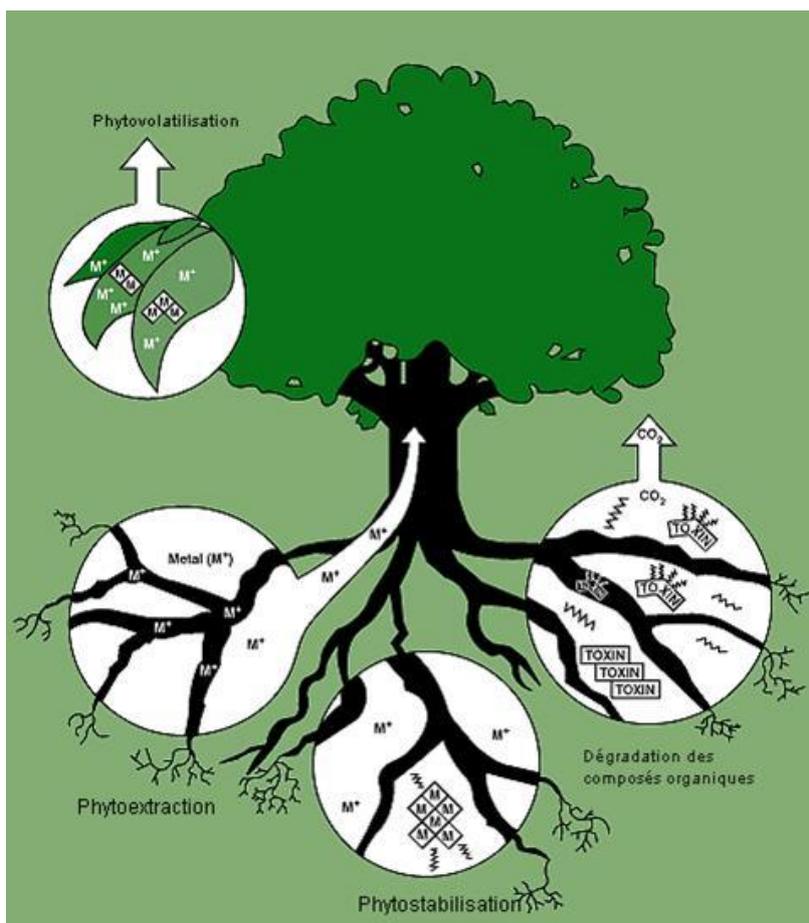


Figure 22 : Les processus de la phytoremédiation [52]

Bien que les plantes soient utilisées depuis longtemps pour dépolluer les sols et les eaux, d'importantes découvertes scientifiques ont contribué à améliorer le processus et à étendre son champ d'application. Ainsi, d'après les premiers travaux datant des années 80 du professeur Wolverton, chercheur américain à la NASA, la phytoremédiation a été envisagée pour l'épuration de l'air. Ce sont les agences spatiales américaines (principalement) et soviétiques qui ont mené des expériences afin d'étudier la purification de l'atmosphère des véhicules spatiaux. Ces recherches n'ont pas débouché sur des applications concrètes dans le domaine spatial, mais ont engendré un nombre croissant d'études sur l'épuration de l'air intérieur par les plantes. Le professeur Wolverton a d'ailleurs fondé en 1990 une société de service qui propose différentes solutions, essentiellement basées sur l'emploi de végétaux pour le traitement de l'eau et de l'air.

Aujourd'hui, la dépollution de l'air intérieur par les plantes est non seulement un sujet d'actualité du fait du lobbying du bien-être par 'le vert' mais elle est aussi à l'origine de différents travaux scientifiques. Ceux-ci ont pour principal objectif l'évaluation des capacités d'épuration mais aussi les mécanismes mis en jeu dans l'élimination des polluants [50].

II - Physiologie de la plante : les mécanismes mis en jeu dans l'élimination des polluants

Outre les propriétés ornementales des plantes d'intérieur, certaines d'entre elles seraient capables de mettre en jeu des mécanismes de stockage ou de transformation des polluants dans leurs cellules afin de purifier l'air de notre environnement.

Les polluants peuvent pénétrer dans la plante par des mécanismes qui se situent (figure 23):

- Soit au niveau du système racinaire après dégradation éventuelle par les microorganismes et solubilisation dans la solution du sol,
- Soit au niveau du système foliaire sous forme gazeuse, adsorbé à des particules en suspension ou présent sous forme soluble dans la phase aqueuse de l'atmosphère.

Les polluants peuvent être capturés à ce niveau par l'intermédiaire de deux voies :

- Soit par la voie des stomates : orifices qui régulent les échanges gazeux et hydriques entre l'extérieur et l'intérieur de la feuille ;
- Soit par la voie de la cuticule : structure lipidique qui recouvre et protège la feuille.

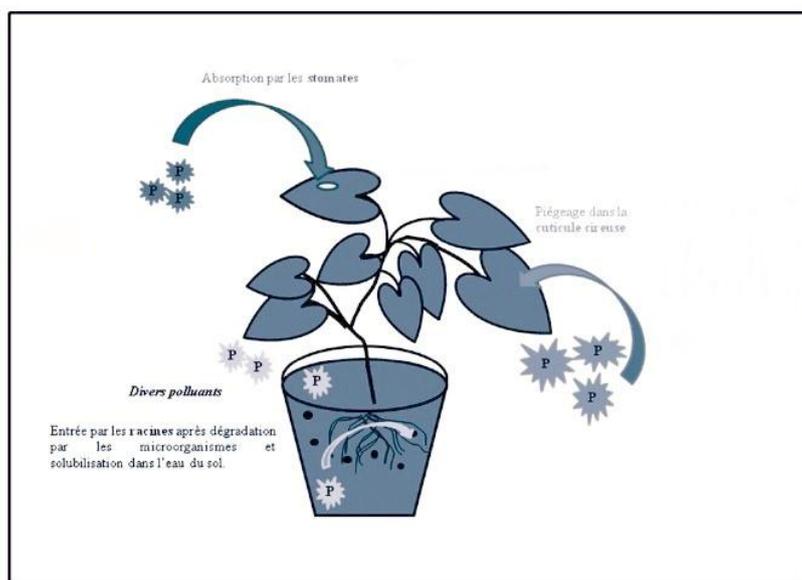


Figure 23 : Les voies de pénétration des polluants dans la plante [53]

Selon leur nature, les polluants utiliseront les racines et/ou les feuilles pour pénétrer dans la plante. Cette dernière va ensuite mettre en jeu différentes voies métaboliques pour les accumuler dans ses tissus ou au contraire les dégrader complètement pour intégrer les produits de dégradation dans son propre métabolisme.

1) L'absorption des polluants par la plante

1. Les paramètres agissant sur l'entrée des polluants dans la plante

La pénétration des polluants de l'air intérieur dans la plante va, quelle que soit la voie empruntée, être influencée par de nombreux paramètres notamment liés à l'environnement, aux propriétés du polluant et aux caractéristiques de la plante.

A. Les paramètres liés à l'environnement [54]

Les conditions d'exposition de la plante sont dépendantes de facteurs environnementaux qui agissent sur les capacités d'épuration.

a. La température

La température a un rôle reconnu sur la volatilité et la concentration de certains polluants. Il a notamment été démontré que des polluants organiques tels que les HAP sont plus facilement absorbés à de basses températures mais plus volatils à de hautes températures [55].

b. L'humidité

De la même manière, l'humidité peut influencer notamment pour le formaldéhyde, pour lequel un taux d'humidité élevé entraîne la décroissance rapide de sa concentration dans l'air. Une forte température et/ou une faible humidité provoquent une fermeture des stomates et donc une diminution de l'entrée des polluants gazeux par les feuilles.

c. Le vent

Le vent peut également agir au niveau de la variation de l'épaisseur de la couche d'air limite à la surface de la feuille. En effet, en l'absence de ventilation, une couche d'air non agité constitue une couche de résistance à l'entrée des gaz au niveau de la feuille. Or, plus la vitesse du vent est élevée, plus l'épaisseur de cette couche limite diminue, facilitant ainsi le temps de contact du polluant sur la feuille d'où l'intérêt de bien aérer la pièce.

d. La lumière

La lumière peut aussi avoir un rôle dans l'absorption en jouant sur l'ouverture des stomates.

B. Les paramètres liés aux polluants [56] [57]

Les caractéristiques intrinsèques des polluants jouent un rôle essentiel dans leur comportement (annexe 1). En effet, elles vont être déterminantes sur la manière dont ils vont migrer et donc être absorbés par la plante.

a. La nature et l'état de phase du polluant

Le caractère organique ou non d'un polluant va influencer son absorption par la plante.

Egalement, le polluant peut être disponible dans l'atmosphère sous forme de gaz ou lié à des particules sous forme de poussière mais aussi lié à l'eau en formant des aérosols. La phase dans laquelle le polluant va préférentiellement se concentrer (dissoute, gazeuse, solide) conditionne la voie de pénétration dans la plante. La répartition entre chaque phase dépend en grande partie des propriétés physico chimiques du composé.

L'équilibre entre phase vapeur (gaz) et liquide (dissoute) est décrit selon la loi de Henry où la constante H représente le rapport entre la concentration en phase gazeuse sur la concentration en phase aqueuse d'un composé pour une température donnée à l'équilibre selon l'équation [56]:

$$H = P_i / (C_w * RT)$$

Où P_i est la pression partielle, C_w est la concentration dans l'eau, H la constante de la loi de Henry. On détermine plus souvent H à partir de la pression de vapeur du composé et de sa solubilité dans l'eau [56]:

$$H = T/273 * v.p. \cdot 10^{-5} / 22,4 \text{ W.S.}$$

Où v.p. est la pression de vapeur (Pa) et W.S. est la solubilité dans l'eau (mol/L) mesurée à la température T(K).

La constante de Henry détermine ainsi la volatilité ou pression de vapeur d'un composé qui influe notamment sur la manière dont le polluant s'infiltré dans la plante au niveau du système foliaire ou racinaire.

Les polluants avec une constante de Henry élevée (exemples : halogénés volatils, naphthalène, certains chlorophénols...) ont une forte concentration dans la phase vapeur et donc une faible affinité pour l'eau, ils sont considérés comme volatils. Ceux qui présentent une constante faible, sont des composés peu ou non volatils, qui ont tendance à se répartir sur le sol, et les composés avec une valeur intermédiaire, dits semi-volatils tels que les HAP, sont absorbés par les deux voies.

b. La lipophilie et la solubilité dans l'eau du polluant

La polarité est généralement évaluée en utilisant le coefficient de partage n-octanol/eau appelé $\log K_{ow}$. L'octanol est un solvant qui possède une polarité très similaire à celle des membranes lipidiques des plantes, c'est pourquoi il est utilisé pour évaluer le caractère lipophile (ou hydrophobe) d'une substance.

La lipophilie (ou hydrophobicité) c'est-à-dire l'équilibre entre l'affinité pour la phase aqueuse et pour la phase lipophile, est l'une des principales propriétés contrôlant la facilité de pénétration et de transport au travers des membranes cellulaires.

Elle peut être estimée à partir de la solubilité dans l'eau (capacité d'une molécule à se dissoudre dans l'eau) par les équations suivantes [58]:

- pour les liquides $\text{Log W.S.} = 0,84 - 1,18 \log K_{ow}$

- pour les solides $\text{Log W.S.} = 0,01 - \log K_{ow} - (0,01 T_m - 0,25)$

Où W.S. représente la solubilité dans l'eau (mol/L) et T_m est le point de fusion en °C.

Les composés à faible $\log K_{ow}$ ($< 1,5$) sont des composés polaires ayant une forte solubilité dans l'eau contrairement à ceux dont le $\log K_{ow}$ est élevé (> 3) qui sont très hydrophobes. Les polluants sont moyennement polaires lorsque le $\log Kow$ est compris entre 1,5 et 3.

Le $\log K_{ow}$ permet de prévoir l'efficacité d'absorption d'un composé par la plante. En effet, $\log K_{ow}$ peut être corrélé dans des modèles mathématiques au facteur de bioconcentration (FBC) représentant la proportion entre la concentration d'un polluant dans la plante et la concentration de ce polluant dans le milieu environnant.

C. Les paramètres liés à la plante [50] [29]

a. Les paramètres morphologiques

Les critères morphologiques et physiologiques en fonction de l'espèce végétale vont influencer sur la capacité d'adsorption et d'absorption des polluants.

En effet, les caractéristiques foliaires comme la surface des feuilles (taille, rugosité...) peuvent jouer nettement sur l'absorption plus ou moins importante des gaz. Une densité de feuillage trop grande peut, au contraire, représenter un facteur limitant l'accessibilité des gaz aux feuilles [59]. Egalement, la structure de la feuille intervient sur l'absorption avec des paramètres comme la teneur en lipides ou la densité stomatique mais aussi celle des racines (profondeur, densité, architecture).

b. Les paramètres physiologiques

Il faut aussi prendre en compte l'espèce végétale, l'état physiologique de la plante notamment son âge, son état nutritionnel et hydrique etc.

2. La voie foliaire

A. L'anatomie de la feuille [60]

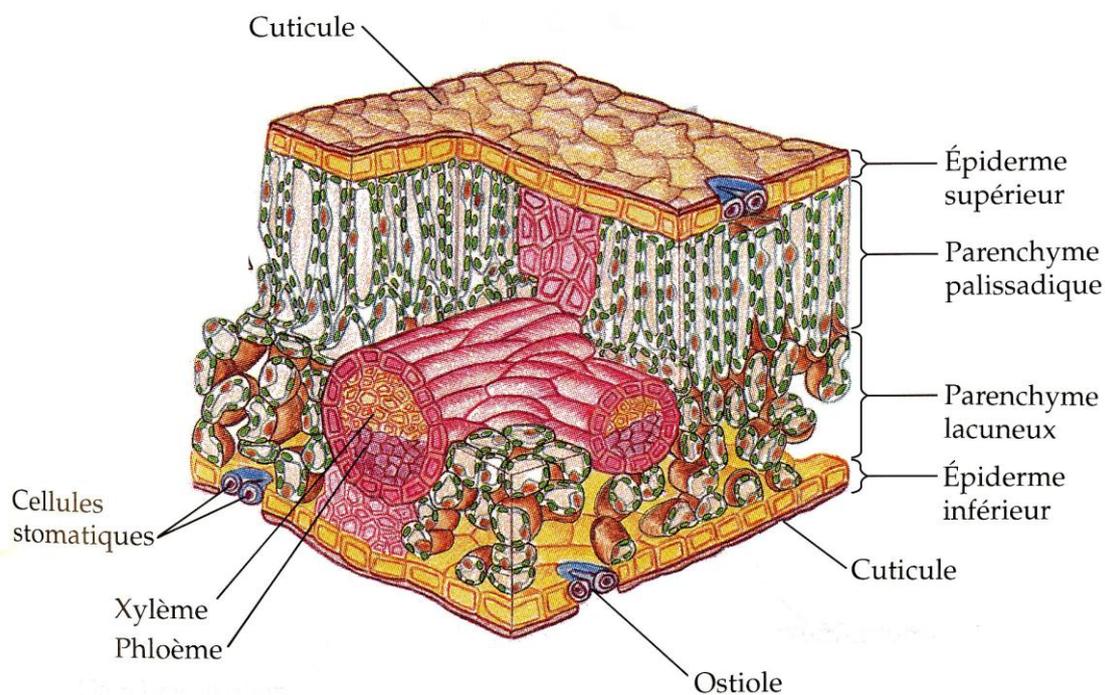


Figure 24 : Coupe d'un limbe foliaire [60]

La feuille est constituée d'un pétiole la reliant à la tige et d'un limbe délimité sur chaque face par un épiderme (figure 24).

a. L'épiderme inférieur

L'épiderme inférieur est celui de la face de la feuille la moins éclairée. Il est formé de cellules serrées les unes contre les autres et recouvertes d'une couche cireuse appelée la cuticule.

Cet épiderme est surtout caractérisé par la présence de nombreux stomates (figure 25). Les stomates sont des orifices constitués d'un ostiole entouré de deux cellules de garde (cellules stomatiques) permettant la régulation hydrique ainsi que les échanges gazeux.

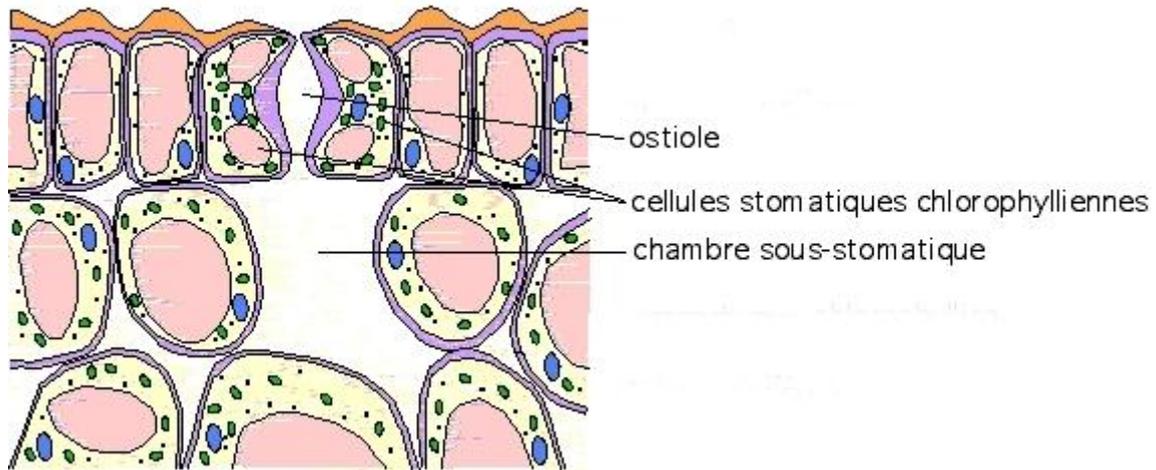


Figure 25 : Coupe transversale d'un stomate [61]

b. L'épiderme supérieur

L'épiderme supérieur est aussi formé de cellules serrées les unes contre les autres mais ne présente que très peu ou même pas de stomates.

Une couche cireuse (ou cuticule) recouvre également ces cellules et permet d'imperméabiliser la feuille. Cette cuticule n'est pas seulement en surface mais possède un relief et des prolongements vers l'intérieur de l'épiderme [50]. Elle est constituée de 2 parties [62] :

- la cuticule proprement dite, formée de cutine, un polyester d'acides gras hydroxylés
- les cires cuticulaires, mélange complexe de longues chaînes d'hydrocarbures, d'alcools, d'aldéhydes et de cétones. On distingue les cires intracuticulaires assurant le lien entre la cuticule et la paroi, des cires épicuticulaires se trouvant à la surface de la cuticule.

c. Le parenchyme chlorophyllien

Entre ces deux épidermes se trouve le parenchyme chlorophyllien appelé mésophylle.

Contre l'épiderme supérieur, le parenchyme palissadique est constitué de cellules allongées riches en chloroplastes, donnant à la feuille sa couleur verte (chlorophylle), qui vont effectuer la photosynthèse.

Contre l'épiderme inférieur, le parenchyme lacuneux se compose de cellules pauvres en chloroplastes, laissant entre elles lacunes et méats, ce qui permet la circulation des gaz captés au niveau des stomates.

On retrouve aussi des vaisseaux transportant la sève appelés vaisseaux du phloème et du xylème.

Au niveau de la feuille, les polluants peuvent donc être capturés soit par l'intermédiaire des stomates, soit par dépôt sur la cuticule.

B. L'absorption par les stomates

a. Les stomates

Les stomates sont, au niveau de l'épiderme des feuilles, le lieu de passage des gaz (CO₂, CO, vapeur d'eau) nécessaires à la régulation hydrique mais aussi à la respiration et à la photosynthèse.

Le réglage des échanges gazeux se réalise grâce à une propriété physiologique fondamentale des stomates. Ils peuvent ouvrir ou fermer plus ou moins leur ostiole sous l'influence d'important changement de pression osmotique donc de turgescence.

Les mouvements de ces stomates sont régulés par la lumière, la concentration en CO₂ et le statut hydrique de la plante [61].

b. Les polluants absorbés par les stomates

Les stomates constituent donc une véritable interface pour les échanges gazeux entre l'atmosphère et la plante permettant l'absorption de certains polluants gazeux. Cependant, tous les polluants ne pourront entrer par cette voie. Seuls l'emprunteront, les composés de faible poids moléculaire très volatils (COV par exemple) et souvent solubles dans l'eau donc hydrophiles avec $\log K_{ow} < 1$ (SO₂, NO_x, O₃, formaldéhyde,...) (figure 28). Ces derniers pénètrent dans la feuille par simple diffusion à travers les stomates [50].

c. Paramètres agissant sur l'entrée des polluants par les stomates

La pénétration des polluants par la voie stomatique est influencée par de nombreux paramètres (figure 26) parmi lesquels la densité stomatique qui est différente pour chaque espèce.

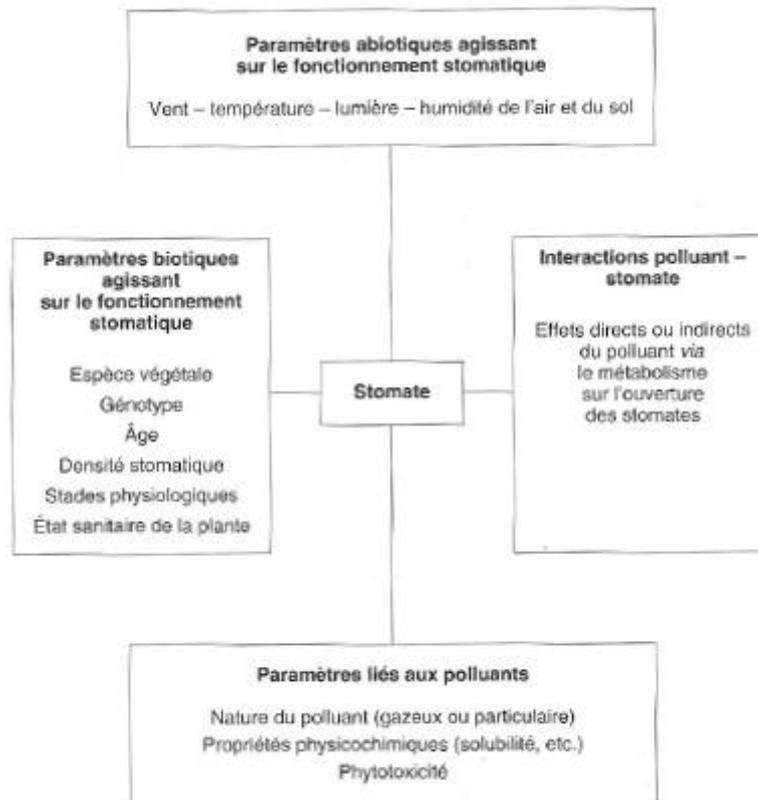


Figure 26 : Les paramètres agissant sur l'entrée des polluants par les stomates [29]

Chez la majorité des plantes, sous l'effet de la lumière du soleil, les stomates s'ouvrent permettant ainsi l'entrée du CO₂ pour la photosynthèse. Il s'agit d'un processus énergétique de production de matière carbonée et de glucides par la plante à partir de l'eau et du gaz carbonique. Il apparaît alors logique que les polluants soient absorbés essentiellement le jour ce qui a été démontré dans certaines études [63] [64]. Or, d'autres chercheurs ont mis en évidence que la quantité de polluants absorbés dans le noir serait identique à celle observée pendant la journée. Ainsi, pour chaque espèce de plantes, le système resterait parfaitement opérationnel dans des conditions nocturnes [65].

Après avoir traversé les stomates, les polluants se retrouvent dans la chambre sous stomatique (figure 25) où ils seront solubilisés dans l'eau qui sature l'atmosphère présente et tapisse les parois cellulaires. Une fois en phase liquide, les composés pourront pénétrer dans les cellules pour y être métabolisés ou éventuellement stockés.

C. L'absorption par la cuticule

a. La cuticule

La cuticule constitue une véritable interface entre les plantes et leur environnement. En effet, elle intervient dans le contrôle de la perte en eau et donc de la concentration et du transport des solutés au sein de la plante. Elle sert aussi de barrière efficace contre les agressions environnementales (sécheresse, température, UV...) ou mécaniques [62].

b. Les polluants absorbés par la cuticule

Pour certains polluants, notamment organiques, c'est la seconde voie d'entrée possible dans les feuilles. Les polluants, selon leur nature et leurs propriétés, vont alors se déposer à la surface de la feuille et entrer en contact avec la cuticule.

Ce sont les composés gazeux de volatilité intermédiaire qui sont principalement sujets à ce qu'on appelle une déposition sèche à la surface des feuilles.

Les polluants moins volatils, sous forme de poussière et d'aérosols, vont aussi pouvoir se déposer même s'ils restent peu de temps dans l'air [50] [66].

La cuticule est essentiellement composée de lipides (sauf au niveau des stomates), c'est donc une couche fortement hydrophobe. C'est pourquoi, les composés lipophiles, avec un log de K_{ow} élevé, sont généralement plus facilement absorbés par la cuticule, notamment ceux avec un haut poids moléculaire (comme les HAP par exemple) (figure 28) [50]. Cependant, en fonction des plantes ou de leur âge, des pores hydrophiles apparaissent, telles des fractures dans la couche cireuse, qui permettent le passage de molécules plus hydrophiles [56].

c. Paramètres agissant sur l'entrée des polluants par la cuticule

Le dépôt des polluants à la surface des feuilles et en particulier au niveau de la cuticule est conditionné par de nombreux facteurs environnementaux mais aussi par les caractéristiques morphologiques de la plante selon l'espèce végétale (figure 27) [50] [29].

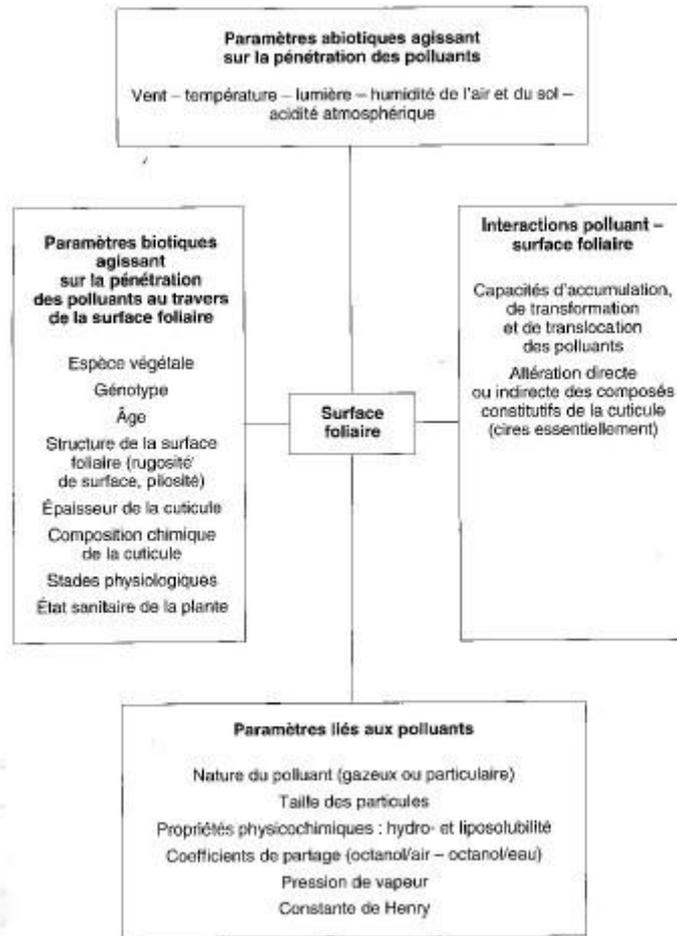


Figure 27 : Les paramètres agissant sur l'entrée des polluants par l'intermédiaire de la surface foliaire [29]

Les polluants ainsi déposés à la surface des feuilles et absorbés par la cuticule vont donc être accumulés dans les cires. Cependant, il faut savoir que cette accumulation au niveau des surfaces foliaires est « plafonnée », car au bout d'un certain temps, un équilibre, en fonction des niveaux de pollution, s'installe entre la capture permanente de polluants sur ces surfaces, et des pertes continues. Ces pertes ont de multiples origines : les frottements, la volatilisation, la production permanente de cires, la croissance des feuilles, le lessivage... [29]

Par la suite, certains polluants vont pouvoir traverser la cuticule et migrer progressivement vers d'autres tissus de la plante.

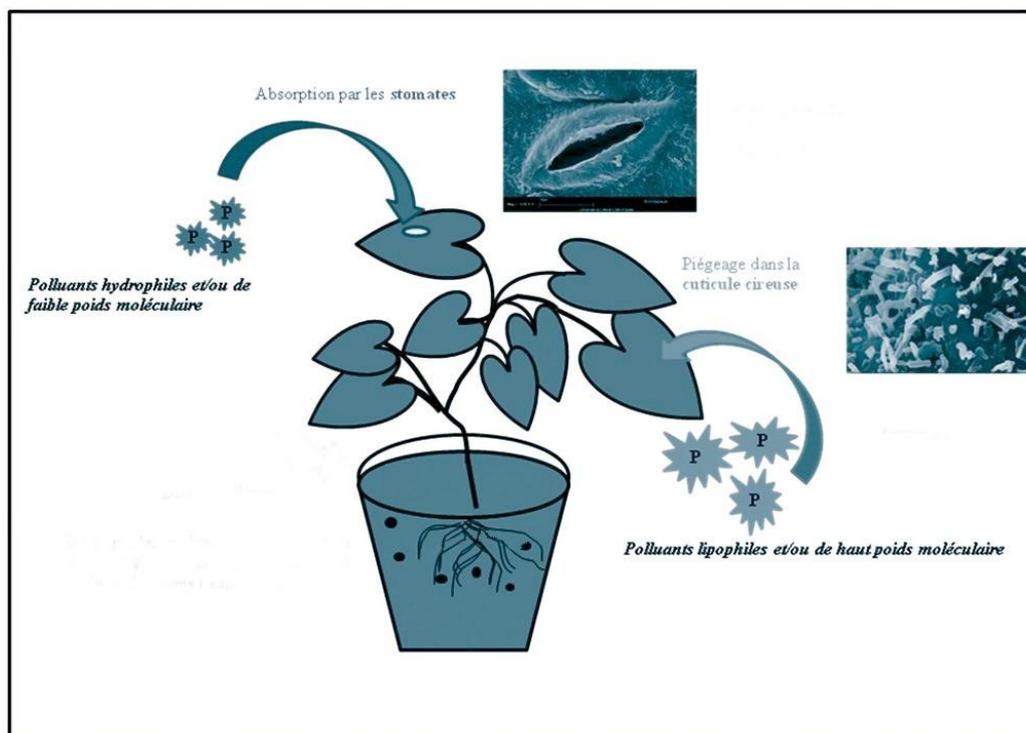


Figure 28 : L'absorption des polluants par les feuilles [53]

3. La voie racinaire

Les polluants arrivent à la surface du sol par simple déposition sèche, et diffusent à travers celui-ci. Une fois dans le sol, les composés subissent un ensemble de processus physico-chimiques et biologiques (avec la participation de micro-organismes) afin d'être dégradés. Après la mise en solution des métabolites et des composés restant dans le sol, ces derniers peuvent atteindre les racines de la plante qui pourra alors les absorber.

A. La disponibilité des polluants dans le sol [56] [66] [67]

a. Le sol

Le sol est un système hétérogène et complexe, composé d'une phase solide représentée par les particules du sol, une phase liquide représentée par l'eau du sol et une phase gazeuse constituée par l'air emprisonné dans le sol.

Il est constitué par une fraction minérale faite de fragments de roches de granulométrie variable (sable, limon, argile...). On y retrouve également une fraction organique (matière organique) appelée humus issue de la décomposition

d'organismes vivants (végétaux ou animaux) ainsi qu'une multitude de micro-organismes qui transforment la matière organique en matière minérale. Des pores remplis d'air et d'eau occupent les espaces libres du sol [68].

b. Les facteurs de disponibilité d'un polluant dans le sol

Dès leur arrivée sur le sol, les polluants peuvent se répartir entre les trois phases du sol c'est-à-dire se dissoudre dans l'eau du sol, s'équilibrer avec la fraction gazeuse du sol et circuler par les pores libres à l'air ou encore s'adsorber sur les particules du sol.

En grande partie, la disponibilité des polluants dans le sol est fonction de leur mobilité et, par conséquent, de leurs propriétés physico-chimiques mais aussi de la capacité du sol à les ralentir, à cause de la tortuosité de leur chemin en solution, et surtout à les immobiliser par adsorption, réaction et précipitation.

En effet, certains composés sont soumis au phénomène de sorption sur les particules du sol; ils sont dits persistants car moins mobiles et donc moins disponibles pour l'absorption par la plante.

L'immobilisation d'un composé sur les particules du sol peut être exprimée par le facteur de distribution (K_d) défini comme le rapport de concentration en phase solide et en solution. L'adsorption d'un composé sur la matière organique est généralement proportionnelle à la lipophilie des composés et au taux de matière organique du sol.

L'adsorption sur la matière organique (K_{om}) peut ainsi être déterminée à partir du K_d par l'équation [56] [66] :

$$K_d = \frac{\text{Kom \% de matière organique}}{100}$$

La valeur de K_{om} peut aussi être évaluée à partir de celle de K_{ow} [56] [66] :

$$\text{Log } K_{om} = 0.52 \text{ log } K_{ow} + 0.62$$

Les composés les plus hydrophobes, c'est-à-dire avec un $\text{log } K_{ow}$ élevé, pourront se fixer fortement sur la matière organique du sol et seront donc peu disponibles pour la plante. Au contraire, les polluants très solubles, c'est-à-dire avec un faible $\text{log } K_{ow}$, auront tendance à se dissoudre dans l'eau et à migrer facilement.

Certaines substances moyennement lipophiles, avec un K_{ow} compris entre 1 et 3, seront modérément adsorbés sur la matière organique et donc pourront aussi atteindre les racines.

La valeur du facteur de distribution dépend de la nature de l'élément mais aussi de la composition du sol, un sol riche en matière organique ou argileux retiendra plus facilement des composés hydrophobes qu'un sol sablonneux. Egalement, le pH, les conditions d'oxydoréductions et la concentration en divers éléments (éléments nutritifs, cations homologues...) peuvent influencer la répartition entre solution et phase solide d'un composé.

Les polluants les plus mobiles sont donc essentiellement les composés dissous dans l'eau et à l'état gazeux, la proportion entre chaque itinéraire dépend encore des propriétés du composé notamment de sa constante de Henry.

Le polluant avec une constante de Henry élevée aura une forte concentration dans la phase vapeur et par conséquent une faible affinité pour l'eau, il est donc peu probable qu'il soit transféré jusqu'aux racines. En revanche, un composé de faible H va plutôt diffuser à partir de la phase aqueuse car soluble dans l'eau et donc atteindra facilement les racines.

B. La transformation des polluants dans le sol [69]

Dans le sol, selon leur nature chimique, les polluants peuvent subir certaines transformations abiotiques et biotiques. Elles sont initiées soit par les constituants minéraux et organiques du sol, soit par les micro-organismes. En effet, étant donné que les sols non saturés en eau sont perméables aux gaz, les micro-organismes sont en contact étroit avec l'atmosphère [70]. Ainsi, ces derniers peuvent utiliser certains polluants comme nutriments (source de carbone et d'énergie) afin d'assurer leur fonctions cellulaires [71]. Ils réalisent alors la biodégradation qui se fait souvent en plusieurs étapes et aboutit à un changement mineur du composé à dégrader, ou à une fragmentation de ce composé, ou enfin à une minéralisation c'est-à-dire à une oxydation complète sous l'action d'enzymes [70].

La plupart des transformations obéissent à des réactions physico-chimiques (oxydation, réduction, hydrolyse,...) entraînant des modifications de structure du composé donc la formation de métabolites voire la dégradation de certains polluants

Cependant, quelques molécules offrent une résistance à la dégradation, elles sont dites récalcitrantes comme certains pesticides par exemple (DDT, PCP) ou explosifs. Les plantes peuvent alors libérer dans le sol des enzymes telles que des deshalogénases, des nitroréductases, des nitrilases, et des peroxydases capables de dégrader certains polluants parmi les plus récalcitrants [72].

Ces métabolites ainsi que le reste de polluants qui n'ont éventuellement pas été dégradés sont ensuite mis en solution afin d'être absorbés par les racines.

C. L'absorption par les racines [73] [56] [67]

a. Les racines

A l'interface racine-solution du sol, les éléments polluants et nutritifs (potassium, magnésium, calcium, phosphore, soufre, chlore...) sont adsorbés et absorbés par les racines.

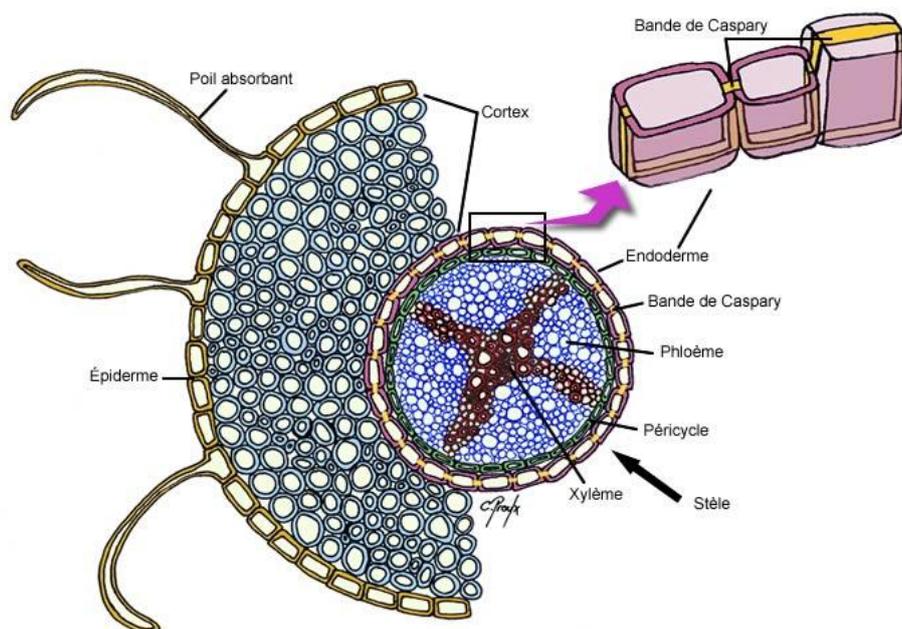


Figure 29 : Coupe transversale d'une racine [74]

Les polluants sont prélevés de la même manière que les éléments nutritifs qui ont des propriétés similaires. Ces derniers traversent le cortex par différentes voies et doivent pénétrer jusqu'à l'endoderme pour atteindre la stèle (cœur de la racine aussi nommé cylindre central) et être transférés vers les parties aériennes. L'endoderme est constitué d'une gaine cylindrique de cellules étroitement liés

ensemble par les bandes de Caspary entourant les tissus vasculaires (phloème et xylème) contenus dans la stèle (figure 29).

b. Les polluants absorbés par les racines

L'efficacité d'absorption au niveau des racines pour un polluant organique peut être évaluée par le Root Concentration Factor (facteur de bioconcentration racinaire) qui détermine sa répartition entre les racines et le milieu environnant (sol et/ou eau). Le RCF peut être corrélé à l'hydrophobicité donc au $\log K_{ow}$ selon l'équation [75] :

$$\text{Log (RCF-3,00)} = 0,65 \log K_{ow} - 1,57$$

Cependant, ce facteur ne définit que le taux retrouvé dans les racines mais ne préjuge ni du taux de transfert vers les parties aériennes ni des phénomènes d'adsorption sur les constituants racinaires.

Il existe une lipophilie optimale qui permet de se lier à la bicouche lipidique membranaire des cellules et notamment de franchir la barrière de l'endoderme tout en facilitant le transport.

Les composés hydrophobes ($\log K_{ow} > 3,5$) sont trop fortement liés aux racines ou adsorbés sur le sol; ils concernent plutôt la phytostabilisation et la rhyzodégradation en raison d'un long temps de séjour autour des racines. Egalement, les contaminants trop solubles ($\log K_{ow} < 1$) ne sont pas suffisamment absorbés par les racines.

C'est pourquoi, les composés modérément lipophiles tels que le benzène, le toluène, l'éthylbenzène et le xylène peuvent être directement absorbés par les racines.

c. Paramètres agissant sur l'entrée des polluants par les racines

Outre les propriétés physico-chimiques des polluants et la nature du sol, il faut noter que tous ces processus de sorption dépendent aussi de l'espèce végétale pour laquelle des paramètres tels que la densité, l'architecture et la distribution verticale racinaires peuvent déterminer la probabilité de rencontre avec un polluant.

2) Le devenir des polluants dans la plante

Après être absorbés au niveau foliaire ou racinaire, les polluants diffusent jusqu'aux vaisseaux du phloème ou du xylème. Ils peuvent ensuite simplement se volatiliser ou être accumulés dans différentes parties.

Mais certains polluants subissent des transformations pouvant totalement les dégrader, ou partiellement, sous la forme de métabolites. Les polluants et leurs métabolites ainsi formés peuvent alors être intégrés dans de nouvelles structures cellulaires, séquestrer dans des vacuoles ou encore intervenir au cours de cycles métaboliques de la plante (figure 30). Il faut souligner que si ces processus de transformation visent à rendre les polluants moins toxiques, ils peuvent parfois au contraire engendrer des composés plus toxiques que le polluant de départ [74].

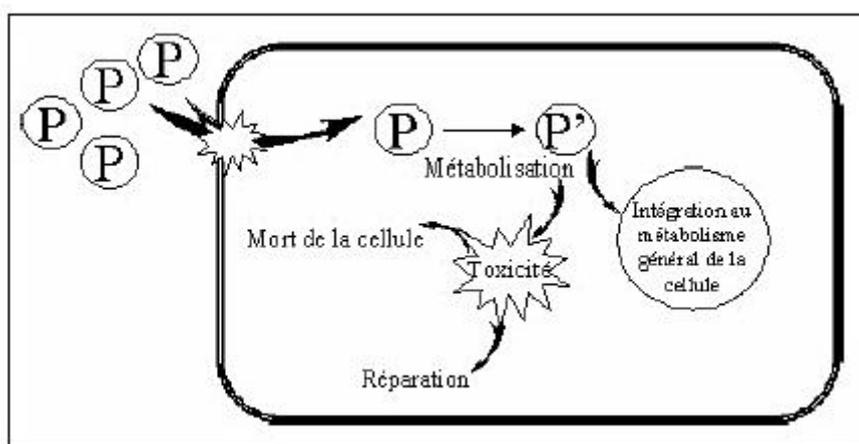


Figure 30 : Représentation schématique des principaux devenir des polluants absorbés au sein des cellules [50]

1. Le transport des polluants dans la plante

Le transport des polluants dans la plante est un phénomène de translocation (diffusion des polluants et/ou de leurs métabolites dans la plante). Les mécanismes développés ci-dessous sont décrits d'une manière théorique mais ne sont surtout pas généralisables. Ils seraient liés à certains gènes mais très peu sont connus. Si l'absorption d'éléments comme les métaux est bien documentée (les métaux absorbés par les racines ne transitent que très rarement vers les parties aériennes), la situation est encore très confuse pour les polluants organiques.

A. Les polluants inorganiques

Le transport des composés inorganiques tels que NO_x ou SO₂ se fait après leur dissolution dans l'eau apoplasmique. Ces derniers forment alors des ions qui vont entrer en compétition avec les nutriments et diffuser à travers les cellules par l'intermédiaire d'un système de transports actifs. L'état physiologique de la plante peut moduler certains transferts notamment pour la compétition entre espèces chimiques au niveau des membranes. Le nombre de transporteurs membranaires, la vitesse de transport ou encore l'affinité et la spécificité de substrat peuvent également varier pour chaque espèce [67].

B. Les polluants organiques

Certains composés de nature organique vont diffuser passivement de cellules en cellules à travers les membranes en fonction de leurs propriétés physico-chimiques [73].

a. Les vaisseaux du xylème et du phloème

Les polluants organiques vont utiliser les systèmes de transport du xylème et du phloème de la sève (liquide qui circule dans les végétaux et les nourrit) afin d'être transférés au sein de la plante (figure 31).

Ils peuvent emprunter les vaisseaux du xylème qui transporte l'eau et les éléments minéraux depuis le sol jusqu'aux parties aériennes. Les composés du sol sont attirés par un effet aspirant qui consiste en la perte d'eau par évaporation (transpiration) par les parties aériennes (principalement les feuilles) de la plante suite à un gradient de concentration. La pression racinaire va également (surtout la nuit) attirer les composés du sol suite à un gradient de pression et provoquer l'ascension du liquide dans le xylème.

Egalement, ils peuvent être transférés par les vaisseaux du phloème, qui transportent essentiellement des nutriments synthétisés, grâce à des différences de pression dans le phloème depuis les organes sources (producteurs) jusqu'aux organes cibles qui les utiliseront ou les entreposeront [72].

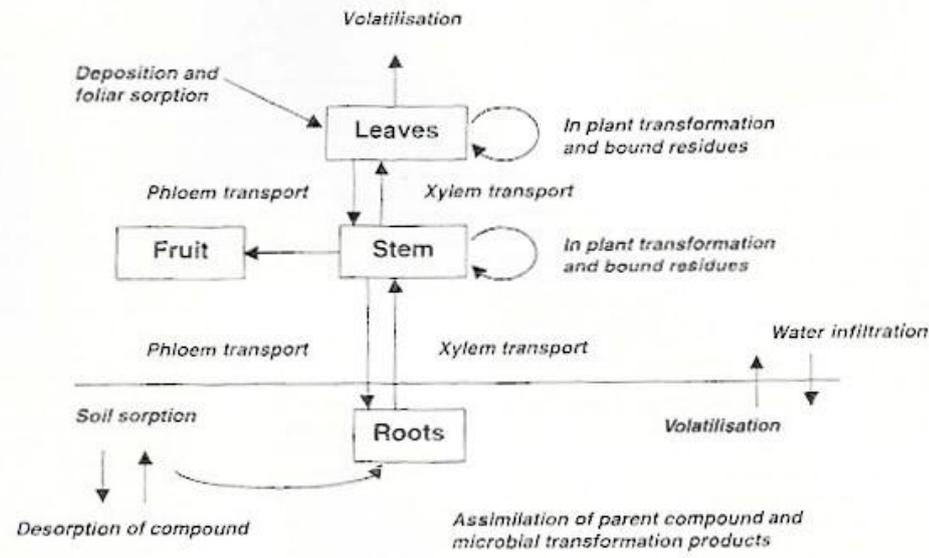


Figure 31 : Les mécanismes de transports de composés organiques [76]

b. Le transport à partir des racines [56] [73]

L'efficacité de transport des polluants par les vaisseaux du xylème à partir des racines, est définie par le facteur de concentration dans le flux de transpiration (TSCF) comme le rapport de la concentration d'un composé dans la sève xylémienne sur la concentration dans la solution externe.

Il dépend de nombreux paramètres liés à la plante (espèce, hauteur, surface des feuilles, état nutritif et hydrique) et à l'environnement (vent, température, humidité) qui influencent le taux de transpiration. En effet, un taux de transpiration élevé favorise une absorption rapide des composés. Egalement, ce facteur dépend des propriétés physico-chimiques du composé puisqu'il est lié à sa lipophilie dans une équation telle que [75] :

$$\text{TSCF} = 0,784 \exp [-(\log K_{ow}-1,78)^2 / 2,44]$$

Cette équation se traduit par une courbe de Gauss (figure 32) pour un certain nombre de polluants dont le benzène, le trichloréthylène, l'éthylbenzène et le m-xylène avec un pic d'absorption observé pour un $\log K_{ow} = 2,4$. Cependant, lorsque le composé est métabolisé au cours du temps, le TSCF apparent doit être corrigé.

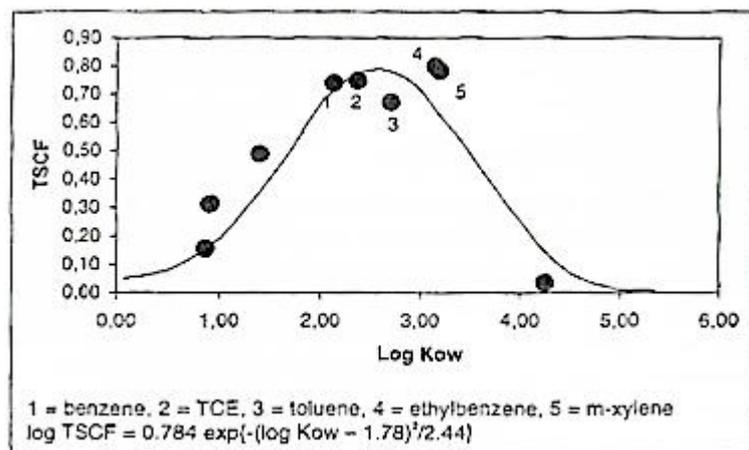


Figure 32 : Le facteur de concentration dans le flux de transpiration dérivé par Burken et Schnoor [75]

Les composés hydrophobes sont fortement liés aux racines ou aux membranes des cellules donc ne sont pas très mobilisables au sein de la plante. De plus, leur adsorption sur le sol limite leur absorption par les racines ce qui réduit la translocation par le xylème proportionnellement à l'augmentation du taux de matière organique dans le sol.

Les molécules solubles ne sont pas activement transportées à travers les membranes. Cependant, certaines études ont démontré que ces dernières peuvent toujours être transférées par les vaisseaux dans certains cas via des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau lors du flux de transpiration.

Les polluants moyennement lipophiles les plus facilement absorbés sont donc aussi les plus facilement transportables car ils peuvent aussi bien franchir les membranes lipidiques que le liquide cellulaire.

Le transport des xénobiotiques dans le phloème est depuis longtemps un sujet de discussion. Contrairement au xylème, le phloème est constitué de cellules vivantes donc les polluants doivent traverser une membrane semblable à celle de l'endoderme.

C'est pourquoi, les polluants mobiles dans le xylème, ayant déjà franchi des membranes biologiques, doivent être capables de pénétrer dans les vaisseaux du phloème.

Les composés empruntant le flux de transpiration et qui atteignent les parties aériennes, sans aucune perte, s'accumulent le plus souvent dans les sites où la

transpiration est la plus grande c'est-à-dire les feuilles matures et le pourtour des limbes.

Cependant, il peut y avoir des pertes réversibles de produits liés par adsorption sur les éléments solides des tiges et possibilité de piégeage pour certains composés par différents chélateurs. Ce dernier procédé est notamment utilisé dans la phytoextraction pour certaines plantes dites hyperaccumulatrices (métaux).

c. Le transport à partir des feuilles [56]

Le transport des polluants après absorption par les feuilles, en particulier au niveau de la cuticule, obéit aux mêmes équations que celles établies après absorption racinaire.

2. Le métabolisme des polluants dans la plante

La plante ne possédant pas d'organes excréteurs, le polluant reste dans la plante après absorption. Toutefois, il peut subir un certain nombre de transformations qui entraînent une baisse de sa concentration.

Le métabolisme chez les plantes ressemble à celui des animaux selon un certain nombre de critères. On retrouve notamment les mêmes familles enzymatiques avec similitude de masse moléculaire, de point isoélectrique et aussi de séquence d'ADN. Cette homologie a conduit certains auteurs à considérer la cellule végétale comme un foie vert, « green liver ».

Comme le métabolisme dans le foie, le métabolisme chez la plante peut être divisé en trois phases (tableau 12).

A. Les différentes phases de métabolisme [56] [73] [67] [72] [77]

Phase I	Transformation	Oxydation, réduction ou hydrolyse	CYP 450 oxygénase, estérases, aminases, deshydrogénases
Phase II	Conjugaison	avec glucose, glutathion, acides aminés	Glycosyltransférases, glutathion-S-ransférases, acyl-transférases
Phase III	Compartimentation	dans la vacuole dans les constituants cellulaires: résidus solubles ou liés	Exocytose, transporteurs membranaires ATP ou protons dépendants, autres transporteurs actifs

Tableau 12 : Métabolisme des polluants dans la plante [56] [77]

a. La phase I

Les réactions de phase I sont généralement des réactions d'hydrolyse catalysées par des estérases ou des aminases, de réductions catalysées par des déshydrogénases mais aussi d'oxydation catalysées par le système cytochrome P450 (CYP 450).

Le CYP 450 se localise au niveau du réticulum endoplasmique. L'existence de plusieurs isoformes de CYP 450 permet au système d'utiliser différents substrats et de catalyser un grand nombre de réactions.

Ainsi, des groupes fonctionnels tels que -OH, -NH₂, -SH sont introduits sur les composés permettant généralement la conversion de produits biologiquement actifs en métabolites primaires moins efficaces ou moins toxiques. Cependant, ces réactions peuvent parfois engendrer la formation de métabolites plus toxiques (l'acide muconique formé par les réactions de détoxification du benzène en est un exemple [50]).

b. La phase II

Cette phase consiste en la fixation de molécules endogènes comme le glucose, le malonate, le glutathion et certains acides aminés par des liaisons covalentes sur les métabolites primaires.

Ce mécanisme, appelé conjugaison, est un processus de régulation naturel qui permet à la plante d'augmenter la solubilité dans l'eau de composés potentiellement toxiques, réduisant ainsi leur activité et toxicité. De ce fait, les enzymes qui catalysent les réactions de la phase II, glucosyl-, malonyl- et glutathion transférases jouent un rôle important dans les mécanismes de détoxification.

c. La phase III

Une différence importante entre les systèmes métaboliques de la plante et de l'animal réside dans la phase III. En effet, les conjugués sont principalement excrétés chez les animaux tandis qu'ils sont stockés dans les tissus des plantes. Cette phase dite de compartimentation cellulaire est assurée par des transporteurs membranaires ATP ou protons (H^+) dépendants mais aussi parfois par exocytose.

Les conjugués solubles ou extractibles sont stockés le plus souvent dans la vacuole. Mais ces derniers peuvent aussi être incorporés dans les polymères de la cellule, ce sont alors des résidus non solubles appelés résidus liés. C'est le cas de certains composés aromatiques qui sont déposés dans la lignine (constituant majeur de la paroi) qui est le site préférentiel de fixation ainsi que dans d'autres composants de la paroi cellulaire.

B. Un exemple de métabolisme d'un polluant : le formaldéhyde

Plusieurs études se sont penchées sur le devenir du formaldéhyde au sein de la plante après son absorption.

a. Le marquage du formaldéhyde au ^{14}C

Des équipes ont mis en contact des plantes d'appartement (*Chlorophytum comosum*, *Epipremnum aureum* et *Ficus benjamina*) avec du formaldéhyde marqué au ^{14}C puis ont extrait et séparé les fractions métaboliques obtenues dans le but d'analyser la radioactivité dans les différentes parties de la plante [63] [78] [79] [80].

Le ^{14}C diffuse dans toute la plante à savoir aussi bien dans les feuilles, que les tiges ou les racines. De nombreux produits métaboliques tels que des sucres (saccharose, glucose, fructose), des acides organiques (malate, glycolate, fumarate), des acides aminés (serine, phosphatidylcholine...) ou encore des résidus insolubles (hémicellulose, pectines, lignine...) ont été marqués.

Des hypothèses ont alors été émises afin d'expliquer la présence et la répartition des métabolites marqués au ^{14}C dans la plante.

b. Les réactions d'additions spontanées

Le formaldéhyde n'étant pas libre dans la plante, il peut subir des réactions d'additions spontanées sur les groupes $-\text{NH}_2$ et les groupes sulfhydriles des acides aminés (arginine, asparagine), du tetrahydrofolate, ou encore se lier aux composants de la paroi cellulaire.

c. La dégradation enzymatique

Les progrès de la recherche ont pu mettre en évidence un système de dégradation enzymatique glutathion-dépendant du formaldéhyde notamment au niveau des mitochondries et des chloroplastes. Ce processus enzymatique est considéré comme la voie métabolique majeure de dégradation du formaldéhyde (figure 33). Dans un premier temps, le formaldéhyde se lie par adduction non enzymatique au glutathion pour former le S-hydroxyméthylformylglutathion (1). Puis, l'enzyme formaldéhyde déshydrogénase glutathion dépendante (FALDH) catalyse la formation du S-formylglutathion en présence d'un cofacteur qui est le NAD (2). Le S-formylglutathion est ensuite hydrolysé en formate et en glutathion par la S-formylglutathion hydrolase en présence d'eau (3). Le formate peut alors être intégré au métabolisme des folates mais une grande partie du formate est oxydée par une formate déshydrogénase (FTDH) en présence de NAD pour obtenir du CO_2 (4). Ainsi, le CO_2 peut être incorporé dans le cycle de Calvin (photosynthèse) le jour afin de fixer le carbone ou est émis vers l'extérieur de la feuille, la nuit.

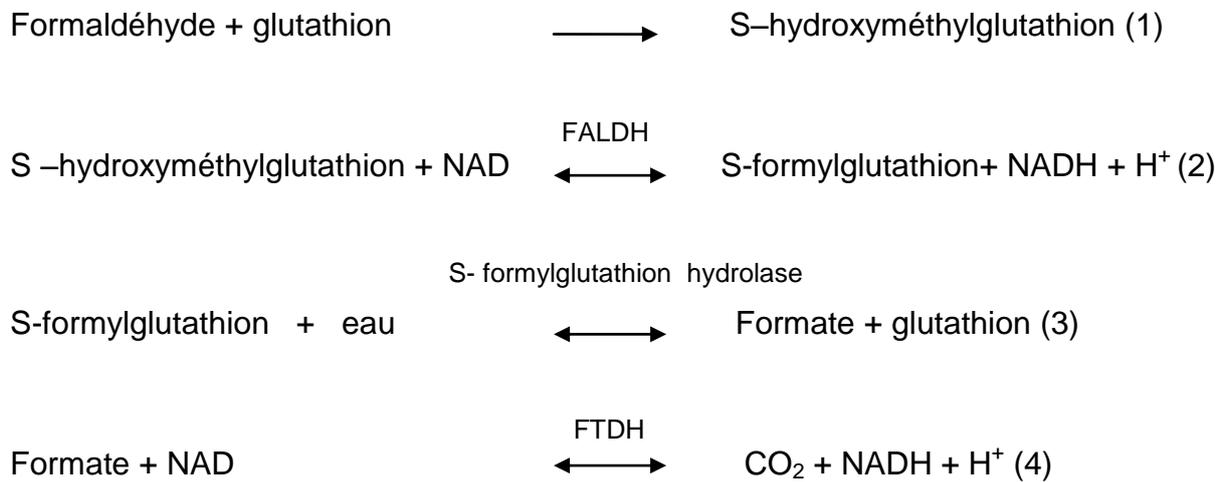


Figure 33 : Métabolisme végétal du formaldéhyde [78] [80]

Le formaldéhyde serait ainsi utilisé comme source de carbone et se disperserait à travers le métabolisme en C1 de la plante, encore peu connu, qui s'avère essentiel pour la synthèse de vitamines, de nucléotides, de protéines et de molécules méthylées.

3. Les effets des polluants sur la plante [50] [59] [53]

Les réactions de détoxification aboutissent à la formation de produits qui intègrent le métabolisme cellulaire. Cependant, les polluants et leurs métabolites dont le formaldéhyde peuvent posséder leur toxicité intrinsèque et engendrer des impacts à plusieurs niveaux biologiques (figure 34).

Le programme PHYTAIR a été mis en place par l'ADEME et le Conseil Régional Nord-pas-de-Calais avec la collaboration de scientifiques pour répondre aux questions de la qualité de l'air intérieur et du traitement de l'air par les plantes. Ce programme étudie les capacités d'épuration des plantes mais s'intéresse également aux mécanismes biologiques qui sont impliqués. Dans ce dernier cadre, ce sont principalement les réponses non visibles, au niveau des cellules ou du matériel génétique (ADN) qui sont recherchées dans les feuilles des plantes exposées aux polluants.

Les effets des polluants sur la plante ont été recherchés au niveau macroscopique (présence de nécrose...) et physiologique (perturbation de la photosynthèse). Ils ont aussi été mis en évidence au niveau cellulaire par le dosage

de marqueurs de stress oxydant ou par la recherche des cassures d'ADN pour évaluer des effets génotoxiques.

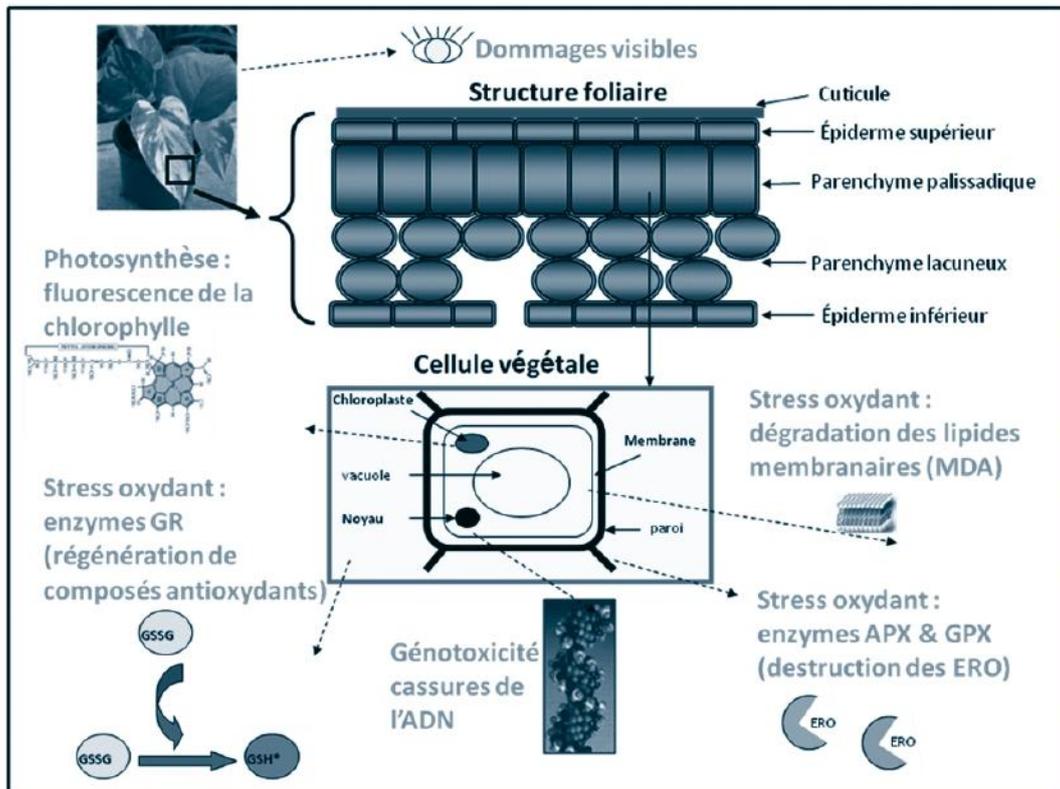


Figure 34 : Observation des effets des polluants sur les feuilles à différents niveaux [53]

A. Au niveau macroscopique et physiologique

Quelle que soit l'exposition réalisée, il n'a jamais été observé d'effet macroscopique (nécroses, chloroses, déformations foliaires...) significatif. En revanche, les mesures de fluorescence observées suite à une exposition au formaldéhyde ont pu mettre en évidence une perturbation de la photosynthèse.

B. Au niveau cellulaire

a. Le stress oxydant

➤ La dégradation des membranes cellulaires

Chez la plante, un stress oxydant va provoquer la dégradation des membranes notamment des lipides. Le malondialdéhyde (MDA) est un produit issu de cette dégradation, il représente un marqueur de stress oxydant.

Le formaldéhyde, stimulant la photosynthèse, générerait des espèces réactives de l'oxygène (ERO) qui sont à la base des différentes réactions de stress oxydant ce qui entrainerait une peroxydation des lipides intracellulaires. Le CO est, quant à lui, toxique pour certaines enzymes intervenant dans la protection cellulaire. Ces enzymes seraient perturbées et ne pourraient plus protéger efficacement les membranes cellulaires ce qui favoriserait une peroxydation des membranes cellulaires.

➤ Les mécanismes de défense

Un stress oxydant va pouvoir déclencher des mécanismes de défense au niveau des cellules. Ces mécanismes se traduisent par une augmentation d'activité d'enzymes telles que l'ascorbate peroxydase (APX) et la gâïacol peroxydase (GPX) qui transforment les ERO formées au cours des processus de stress oxydant. Le benzène est notamment relié à une augmentation de l'activité des peroxydases. Le métabolisme de celui-ci débiterait par une oxydation (phase I) par un complexe CYP P450 qui générerait des ERO. La toxicité du CO sur certaines enzymes permettrait la formation d'ERO prises en charge par les peroxydases d'où l'observation d'une augmentation de leur concentration

De même, les cellules possèdent des systèmes antioxydants non enzymatiques tels que le glutathion (GSH). Ce dernier s'oxyde pour neutraliser une ERO et forme un dimère (GSSS). La réduction de ce dimère (donc la régénération de l'antioxydant GSH) fait appel à une enzyme : la glutathion réductase (GR) dont la mesure de l'activité est corrélée au stress oxydant.

b. Les effets génotoxiques

Certains polluants, notamment le benzène et le formaldéhyde, peuvent avoir un effet génotoxique entraînant des lésions de l'ADN. Pour le benzène, ce sont deux de ces métabolites principaux alors que le formaldéhyde agirait directement sur les noyaux entraînant des cassures. Pour ces deux polluants, il a clairement été démontré qu'ils étaient responsables d'un stress oxydant qui au long cours peut causer des atteintes de l'ADN.

Les effets de ces mécanismes ne sont encore que très partiellement connus; c'est pourquoi les explications des résultats ne sont encore qu'hypothétiques et d'autres études seraient nécessaires pour les conforter.

III - Les principaux résultats des études menées sur les performances épuratoires des plantes

Une analyse bibliographique réalisée en 2010 montre que les travaux de recherche réalisés sur la capacité des plantes à épurer, à dépolluer ou à maintenir la qualité de l'air intérieur sont relativement peu nombreux [26] .

La faible attractivité de cette thématique pour les équipes de recherche pourrait s'expliquer par la récente prise de conscience de l'importance de la pollution intérieure. De plus, les plantes vertes d'intérieur ne sont pas des modèles courants pour les chercheurs notamment parce qu'elles présentent une très grande diversité tout comme les polluants rencontrés dans les locaux ce qui implique un grand nombre de situations expérimentales.

Les premières études ont été lancées par Bill Wolverton dans les années 1980. A la demande de la NASA, il a recherché des solutions pour épurer l'air intérieur des vaisseaux spatiaux en analysant les potentialités des plantes. Dans les années 1990, d'autres chercheurs, notamment en Allemagne et aux États-Unis, ont conforté les premiers résultats de Wolverton.

Depuis les années 2000, des études ont approfondi cette question en cherchant à mieux mettre en évidence les propriétés épuratrices des plantes en pot vis-à-vis d'un certain nombre de polluants.

Les travaux se concentrent essentiellement sur deux grandes familles de procédés : les systèmes dits « actifs » (ou systèmes de biofiltration) qui forcent l'air à passer au travers du substrat des plantes et les systèmes dits « passifs » dans lesquels l'air n'est pas forcé.

Les recherches sur les systèmes passifs se concentrent sur la plante elle-même en se basant principalement sur le système aérien mais intègrent également le rôle du sol, et celles sur les systèmes actifs s'intéressent à l'activité dépolluante du complexe air forcé/plante/sol, en chambre expérimentale et dans une moindre mesure en espace réel.

1) Les systèmes passifs utilisant des plantes

1. Le potentiel de dépollution des plantes

A. Les essais en laboratoire

a. Les conditions d'étude

La très grande majorité des études dans ce domaine a utilisé des expositions d'une ou de plusieurs plantes en enceintes contrôlées (figure 35).

Il s'agit, le plus souvent, d'enceintes en verre, de volume variable (de 100L à 1 m³) où la circulation de l'air est assurée par un ventilateur et les paramètres environnementaux tels que l'humidité, la température, la concentration en CO₂ ou la luminosité sont contrôlés. L'étanchéité du système et l'absence d'adsorption des gaz sur les parois sont testées grâce à des expériences contrôles (témoins) avec des enceintes vides.

Une centaine de plantes a été couramment utilisée dans la littérature dont les plus fréquentes appartiennent à la famille des aracées [81] :

Araceae: 36,05% (*Spathiphyllum*, *Scindapsus*...)

Araliaceae: 13,96%

Agavaceae: 13,96%

Arecacea: 8,13%

Moracea : 6,90%

Dracaenaceae: 4,65%

Marantaceae: 3,45%

Liliaceae: 2,32%

Acanthaceae: 2,32%

Ces plantes ont été choisies car elles sont très souvent utilisées dans les logements, elles possèdent une large surface foliaire et un certain nombre de dégâts liés aux paramètres environnementaux « classiques » (température, lumière humidité..) ont été bien décrits.

Ces dernières sont placées dans les enceintes avant le début des expériences afin d'assurer une acclimatation au système et d'éviter tout stress susceptible de fausser les résultats.

Les polluants sont ensuite injectés, soit en une fois (injection unique de polluant sur 24h) soit de façon continue (injection de polluant à un débit constant pendant 24h). Les polluants étudiés sont essentiellement des polluants organiques parmi lesquels le formaldéhyde, le benzène, le toluène, le trichloréthylène, etc [50].

L'expérimentateur mesure l'évolution de la concentration du polluant en présence des végétaux. Il peut ainsi quantifier l'activité potentielle de dépollution des plantes par différentes méthodes d'analyse (méthodes colorimétriques, méthodes chromatographiques telles que CLHP ou CPG...).

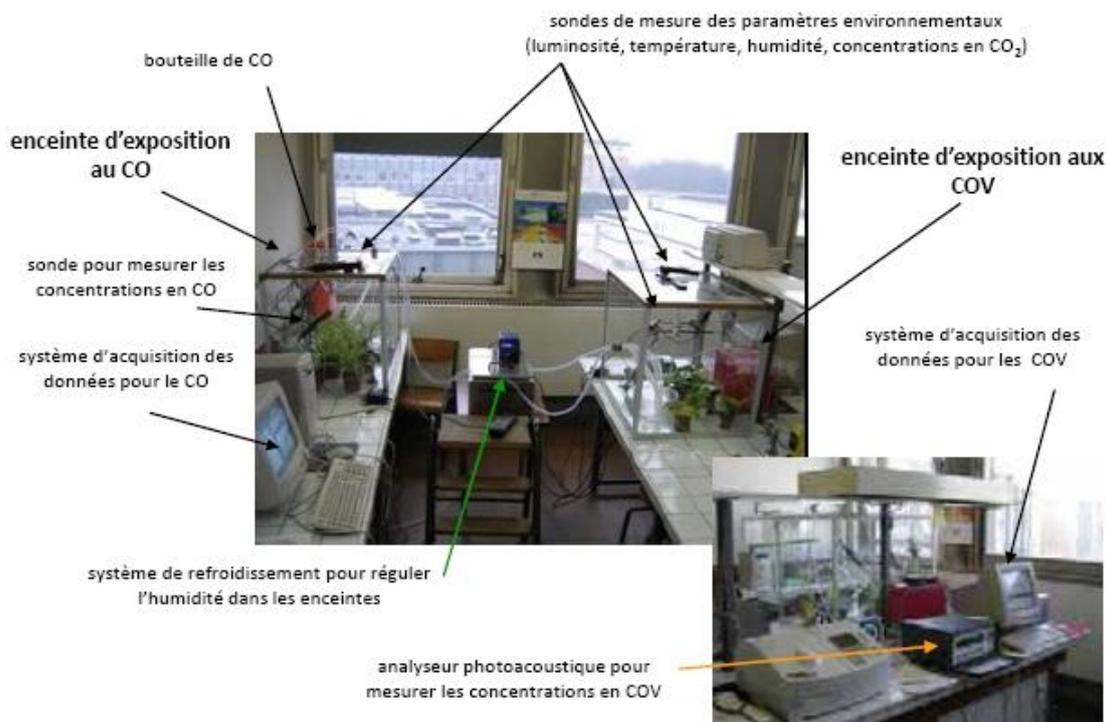


Figure 35 : Enceinte (300L) d'exposition des plantes au CO et aux COV par injection unique [82]

b. Les résultats de quelques études expérimentales

Les premiers travaux menés par Wolverton [83] sur la purification de l'air, d'abord dans les vaisseaux spatiaux puis en chambre expérimentale, l'ont conduit à étudier plus d'une cinquantaine de plantes d'intérieur.

Le volume de l'enceinte était approximativement de 0,31 à 0,88 m³. Plusieurs polluants ont été étudiés incluant le formaldéhyde, le benzène, le trichloréthylène, le xylène ainsi que l'ammoniac à des concentrations de l'ordre de 15 à 20 ppm.

Ces essais ont révélé, chez presque toutes les plantes testées, une diminution significative des concentrations en polluants (figure 36) variant de 10 à 70 % au bout de 24 heures. Des essais portant sur l'élimination du benzène et du trichloréthylène à des concentrations plus faibles de 0,1 à 0,4 ppm ont également été réalisés. La diminution des concentrations observée s'est échelonnée de 9,2% jusqu'à 90%.

Ces diminutions de concentration démontrent alors un rôle non négligeable du système sol/plante dans la dépollution de l'air intérieur.

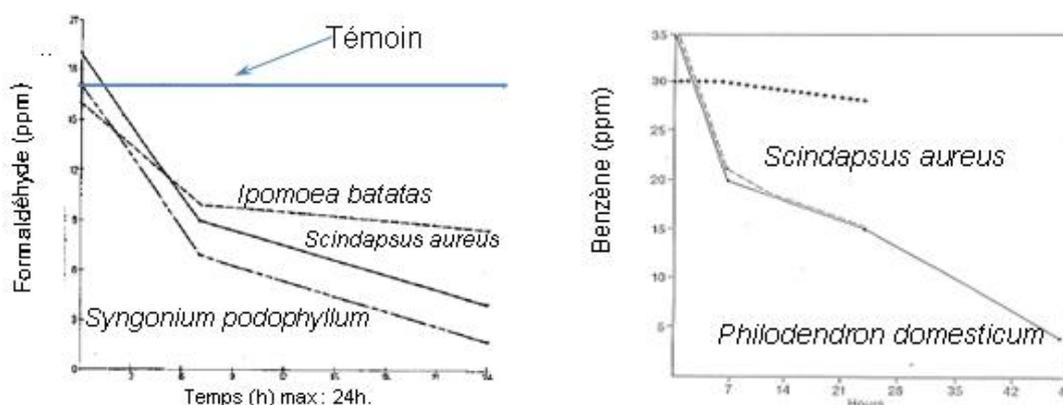


Figure 36 : Capacité d'épuration de différentes plantes soumises à des concentrations élevées de formaldéhyde ou de benzène en chambre expérimentale [83] [84] [85]

Ces résultats encourageants ont alors engendré d'autres études. Par exemple, Wood et al. [86] ont utilisé une petite chambre (0,22m³) et 3 plantes différentes (*Howea forsteriana*, *Spathiphyllum wallisii* et *Dracaena deremensis*) pour étudier l'élimination du benzène et de l'hexane avec des concentrations initiales respectivement de 25 ppm et 100 ppm pendant 24 heures. La diminution de

concentration, suite à l'exposition quotidienne de plantes en pot, a été estimée à 80% pour le benzène et 70% pour l'hexane.

Yang et *al.* ont analysé l'exposition de 28 plantes différentes à cinq COV (benzène, toluène, octane, trichloréthylène et α -pinène) à des concentrations entre 9 et 11 ppm pendant 6 heures [87].

La concentration de chaque COV a, comme précédemment, diminué au cours du temps, indiquant donc les capacités d'épuration de ces plantes. Cinq plantes (*H.alternata*, *H.helix*, *T.pallida*, *A.densiflorus*, *H. carnosus*) ont démontré des capacités d'élimination des COV supérieures aux autres. Ensuite, sept espèces ont été jugées comme ayant une efficacité intermédiaire : *Ficus benjamina*, *Polyscias fruticosa*, *Fittonia argyroneura*, *Sansevieria trifasciata*, *Guzmania sp.*, *Anthurium andreaeanum*, *Schefflera elegantissima*.

Cependant, tous les polluants n'étaient pas éliminés avec la même efficacité. En effet, les rendements variaient nettement pour chaque polluant et entre les espèces testées: benzène (0,03 à 5,54 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), toluène (1,54 à 9,63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), octane (0 à 5,58 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), TCE (1,48 à 11,8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), α -pinène (2,33 à 12,21 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) et COV totaux (5,55 à 44,04 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) (tableau 10). En outre, le taux de dépollution dépend du COV et aussi de l'espèce végétale. Il existe alors une importante disparité de résultats entre les différentes espèces. Ceci suggère qu'un mélange de différentes plantes en pot serait plus efficace dans l'élimination des différents COV de l'environnement intérieur.

En ce qui concerne les familles botaniques, peu de tendances discernables ont pu être repérées. Cependant, la famille des Aracées (*E. pinatum*, *S. podophyllum*, *P. scandens var. oxycardium*, *D. seguine*, *S. wallisii*) avait en général un faible potentiel de phytoremédiation alors que la famille des Araliacées (*H.helix*, *P. fruticosa* et *S. elegantissima*) démontrait généralement une meilleure efficacité de dépollution (tableau 13).

Plant	VOC removal efficiency ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)					Total
	Benzene	Toluene	Octane	TCE	α -Pinene	
Superior removal efficiency						
<i>Hemigraphis alternata</i>	5.54 ± 0.29	9.63 ± 0.94	5.58 ± 0.68	11.08 ± 0.99	12.21 ± 1.61	44.04 ± 2.98
<i>Hedera helix</i>	3.63 ± 0.33	8.25 ± 0.64	5.10 ± 0.49	8.07 ± 0.77	13.28 ± 0.95	38.33 ± 3.17
<i>Tradescantia pallida</i>	3.86 ± 0.58	9.10 ± 1.17	2.76 ± 1.08	1.20 ± 6.69	1.78 ± 11.40	5.52 ± 31.94
<i>Asparagus densiflorous</i>	2.65 ± 0.24	7.44 ± 0.28	3.76 ± 0.64	0.49 ± 5.79	0.78 ± 8.48	2.40 ± 26.08
<i>Hoya carnosa</i>	2.21 ± 0.21	5.81 ± 0.67	3.80 ± 0.62	0.75 ± 4.74	1.17 ± 8.68	3.40 ± 24.13
Intermediate removal efficiency						
<i>Ficus benjamina</i>	1.66 ± 0.07	5.06 ± 0.19	3.98 ± 0.19	0.15 ± 3.98	0.40 ± 8.30	0.86 ± 21.53
<i>Polyscias fruticosa</i>	1.53 ± 0.08	4.29 ± 0.04	3.43 ± 0.08	0.16 ± 6.15	0.12 ± 4.30	0.42 ± 20.05
<i>Fittonia argyroneura</i>	2.74 ± 0.28	5.09 ± 0.23	1.77 ± 0.25	0.36 ± 4.61	0.39 ± 5.49	1.46 ± 19.56
<i>Sansevieria trifasciata</i>	1.76 ± 0.48	4.97 ± 0.70	2.73 ± 0.50	0.81 ± 4.01	1.31 ± 6.43	3.68 ± 18.01
<i>Guzmania sp.</i>	1.46 ± 0.25	4.04 ± 0.56	2.07 ± 0.24	0.49 ± 3.58	0.55 ± 5.85	1.77 ± 16.78
<i>Anthurium andreanum</i>	1.31 ± 0.12	3.60 ± 0.37	2.45 ± 0.24	0.35 ± 3.87	0.54 ± 7.33	1.59 ± 17.46
<i>Schefflera elegantissima</i> ^z	0.66 ± 0.19	4.94 ± 0.37	0.65 ± 0.46	0.10 ± 4.74	0.36 ± 8.68	0.81 ± 24.13
Poor removal efficiency						
<i>Peperomia clusiifolia</i>	1.20 ± 0.10	2.75 ± 0.11	2.03 ± 0.01	0.13 ± 2.40	0.14 ± 4.61	0.39 ± 12.98
<i>Chlorophytum comosum</i>	0.75 ± 0.11	3.18 ± 0.14	1.70 ± 0.08	0.13 ± 2.86	0.21 ± 4.17	0.54 ± 12.66
<i>Howea belmoreana</i>	0.80 ± 0.10	2.95 ± 0.32	1.81 ± 0.28	0.28 ± 2.71	0.67 ± 4.25	1.64 ± 12.52
<i>Spathiphyllum wallisii</i>	0.75 ± 0.11	2.52 ± 0.13	1.55 ± 0.21	0.19 ± 2.25	0.21 ± 4.09	0.83 ± 11.15
<i>Schefflera arboricola</i>	0.44 ± 0.07	2.25 ± 0.23	1.75 ± 0.13	0.17 ± 1.78	0.34 ± 4.18	0.84 ± 10.40
<i>Codiaeum variegatum</i>	0.89 ± 0.04	2.28 ± 0.08	1.21 ± 0.03	0.10 ± 2.34	0.09 ± 3.61	0.31 ± 10.33
<i>Calathea roseopicta</i>	0.94 ± 0.18	2.70 ± 0.38	0.83 ± 0.14	0.40 ± 0.10	0.58 ± 3.25	1.62 ± 10.04
<i>Aspidistra elatior</i>	0.53 ± 0.08	2.22 ± 0.24	1.22 ± 0.17	0.20 ± 2.00	0.40 ± 3.17	1.06 ± 9.14
<i>Maranta leuconeura</i>	0.74 ± 0.19	2.67 ± 0.28	0.51 ± 0.19	0.40 ± 2.35	0.67 ± 2.76	1.68 ± 9.03
<i>Dracaena fragrans</i>	0.55 ± 0.01	2.01 ± 0.08	1.18 ± 0.08	0.09 ± 1.90	0.19 ± 3.31	0.44 ± 8.95
<i>Ficus elastica</i>	0.38 ± 0.07	2.29 ± 0.11	1.20 ± 0.13	0.19 ± 1.75	0.12 ± 2.66	0.56 ± 8.28
<i>Dieffenbachia seguine</i> ^y	0.18 ± 0.04	2.03 ± 0.10	1.01 ± 0.10	0.07 ± 1.83	0.20 ± 2.99	0.39 ± 8.05
<i>Philodendron scandens ssp. oxycardium</i>	0.49 ± 0.08	1.80 ± 0.11	0.98 ± 0.06	0.16 ± 1.66	0.12 ± 2.33	0.52 ± 7.26
<i>Syngonium podophyllum</i>	0.03 ± 0.02	1.84 ± 0.15	0.76 ± 0.16	0.22 ± 1.67	0.17 ± 2.75	0.70 ± 7.04
<i>Epipremnum pinnatum</i> ^x	0.44 ± 0.05	1.54 ± 0.15	0.86 ± 0.09	0.16 ± 1.52	0.21 ± 2.34	0.64 ± 6.71
<i>Pelargonium graveolens</i>	0.03 ± 0.02	1.67 ± 0.29	0.00 ± 0.00	0.44 ± 1.48	0.26 ± 2.37	0.99 ± 5.55

Data are means ± S.E.M. (n=3).

^z syn. *Dizygotheca elegantissima* (Veitch) R.Vig. & Guillaumin

^y syn. *Dieffenbachia amoena* Hort. & Bull.

^x syn. *Scindapsus aureus* Engl.

Tableau 13 : Capacité d'élimination (basée sur la surface foliaire) de 5 COV (benzène, toluène, octane, trichloréthylène et α -pinène) par 28 plantes d'intérieur [87]

Des résultats similaires de spécificité plante/polluant ont été démontrés par le programme PHYTAIR [53] [82].

La phase I de PHYTAIR a évalué en chambre d'essai les performances d'élimination de 3 plantes (*S. aureus*, *C.comosum*, *D.marginata*) suite à l'injection

unique de 5 à 30 ppm de CO, 3 ppm de benzène et 5,7 ppm de formaldéhyde. Chaque polluant a été étudié séparément pendant 24 heures.

Les expériences réalisées ont montré que les pourcentages d'épuration des polluants dans l'enceinte variaient en fonction des plantes et du polluant injecté.

plantes \ polluants	CO (10 ppm)	Benzène (3 ppm)	Formaldéhyde (~6 ppm)
<i>Chlorophytum comosum</i>	100 %	10 %	33 %
<i>Scindapsus aureus</i>	80 %	5 %	30 %
<i>Draceana marginata</i>	70 %	1 %	18 %

Tableau 14 : Pourcentage de diminution des concentrations en polluants (CO, Benzène, Formaldéhyde) avec 3 plantes (*C.comosum*, *S.aureus*, *D.marginata*) [82]

Les valeurs correspondent aux médianes des résultats obtenus pour au moins 6 expériences.

Comme le montre le tableau 14, la capacité d'abattement des polluants par les plantes était plus importante pour le CO que pour le formaldéhyde et le benzène avec toujours une différence d'absorption entre les plantes. En ce qui concerne le benzène, les résultats obtenus ont montré que ce polluant n'était que faiblement accumulé dans les feuilles. Il semble qu'il s'est créé une zone d'échange entre l'atmosphère et la surface foliaire dans laquelle les concentrations de benzène se sont équilibrées [53].

De plus, il faut souligner que durant les expériences, des paramètres tels que la température, l'humidité, l'éclairement, la concentration en CO₂ ont été reliés aux pourcentages d'épuration [53]. La température et l'humidité sont des variables qui sont systématiquement associées à l'épuration du formaldéhyde pour lequel une augmentation de l'humidité implique une diminution de l'épuration.

De la même manière, Cornejo et *al.* ont mené des tests en laboratoire avec six plantes pour évaluer leur capacité à éliminer le benzène, le TCE et le toluène [88]. Les plantes ont d'abord été exposées séparément au benzène pendant 24 heures. Il a été observé une sélectivité pour *Kalanchoe blossfeldiana* qui épure l'air enrichi en

benzène mais pas celui enrichi en toluène, ce qui conforte la notion de spécificité plante/polluant (figure 37).

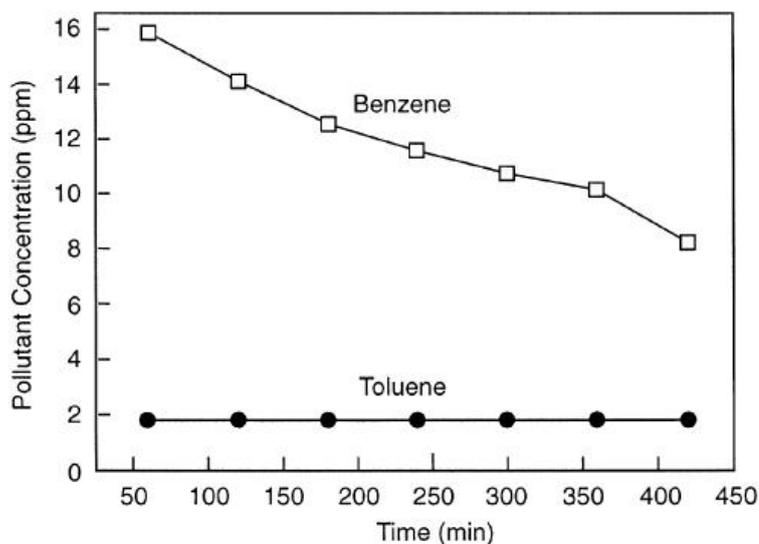


Figure 37 : Apparente sélectivité de *K. blossfeldiana* pour le benzène par rapport au toluène [88]

Ensuite, une plante (*Chlorophytum comosum*) a été exposée à un mélange de polluants pendant 8 heures. Dans cette expérience, la vitesse d'élimination du pentane et du benzène en présence de TCE était plus faible qu'en l'absence de TCE, suggérant ainsi une inhibition du pentane et du benzène par le TCE (figure 38).

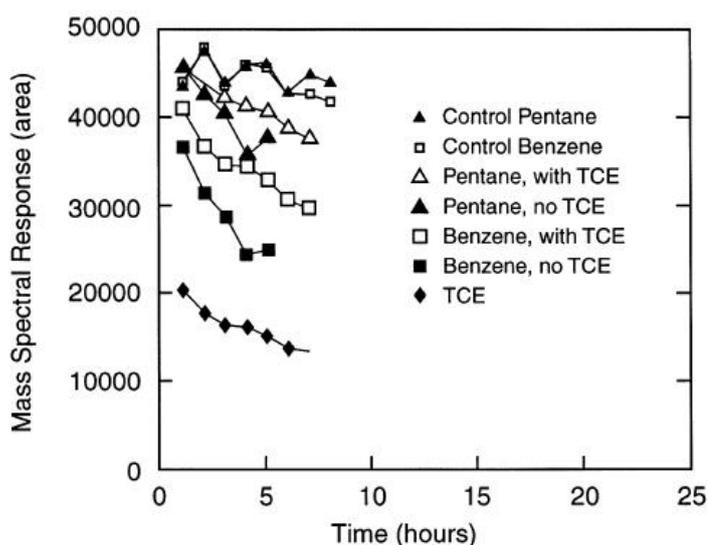


Figure 38 : Elimination de polluants gazeux de l'air intérieur par *C.comosum* [88]

Les travaux considérant le mélange de plusieurs polluants sont peu nombreux mais démontrent l'existence d'interactions entre les contaminants qui ont pour conséquences de faire varier l'efficacité dépolluante du végétal [89] [90].

D'une manière générale, les résultats d'études en laboratoires montrent que, dans ce contexte expérimental, certaines plantes présentent effectivement des capacités d'élimination des polluants injectés dans les enceintes.

B. Etudes en conditions «réelles»

a. Les effets bénéfiques des plantes

Quelques enquêtes ont été menées sur le terrain notamment dans le secteur tertiaire et de la santé (bureaux et centre de soins) afin d'évaluer l'impact des plantes vertes sur la qualité de vie des occupants [91].

Une étude menée aux Pays-Bas en 2001 a montré que les employés travaillant en présence de plantes se sentaient mieux, fournissaient un travail de meilleure qualité, avaient une productivité plus importante et une meilleure concentration (notamment chez le personnel travaillant devant un ordinateur) [92]. De même, en Suède, une étude a permis de montrer que le personnel ayant vue sur des espaces verts étaient moins stressés [93].

Dans un hôpital Norvégien, la présence de plantes d'intérieur permettrait de diminuer significativement des troubles de santé du personnel tels que fatigue (- 32%), maux de tête (- 46%), toux (-38%), gorge sèche (-31 %) et irritation des yeux (-15%). Au bout de six mois, l'absentéisme a reculé de manière durable en passant d'un taux de 15 % à 5 % [93].

Les plantes pourraient aussi contribuer à la diminution de ces symptômes en étant utilisées comme humidificateur d'air. En effet, certaines plantes qui ont besoin de beaucoup d'eau peuvent relever le degré d'humidité de la pièce d'au moins 10 % à 15 %. Plus de 97 % de l'eau d'arrosage est rendue à l'air ambiant via les feuilles ce qui limite les symptômes comme une bouche sèche, un nez bouché (rhume) et des irritations des yeux ou de la peau liés à un faible taux d'humidité [91].

Ainsi, il a fréquemment été démontré que la présence de plante est source d'équilibre et de bien-être. Elle permettrait d'améliorer la perception de l'environnement avec des conséquences sur la productivité voire la santé.

Cependant, si ces études ont révélé l'effet bénéfique de la présence de plantes dans les locaux sur les occupants, aucune corrélation n'a été établie avec les variations de quantités de polluants. Ces enquêtes n'ont donc pas apporté la preuve que ce résultat est dû à la diminution des polluants de l'air induite par les plantes.

b. Les résultats de quelques études de terrain

Très peu d'études ont été réalisées sur le sujet en conditions réelles (*in situ*) dans des locaux habités. Mais pour certaines, les résultats se sont montrés beaucoup moins enthousiasmants que ceux trouvés dans les laboratoires.

La transposition des résultats de laboratoire en conditions réelles n'a que très rarement été tentée selon une méthodologie stricte. En effet, la plupart des auteurs ont utilisé directement leurs résultats (les performances épuratoires étant souvent exprimées en fonction de l'aire foliaire) en appliquant une règle de proportionnalité directe. Certains travaux ont montré que cette approche reste à prendre avec du recul [50].

Ainsi, Dingle et *al.* [94] ont étudié l'élimination du formaldéhyde dans différents locaux (d'une vingtaine de m³).

Ils ont exposé différentes espèces en apportant dans les pièces de plus en plus de plants (0 au jour 1, à 20 plants au jour 9). Ils ont ainsi montré qu'avec 5 ou 10 plants les taux de formaldéhyde n'étaient pas différents de ceux dans la pièce témoin. L'apport de 20 plants a diminué les concentrations de 11%, ce qui aurait en réalité nécessité l'équivalent d'une plante/m³ ou de 2, 4 plantes/m² (figure 39). Pour une maison de 340 m³, il aurait donc fallu au moins 340 plants. De plus, alors qu'aucune étude sur le terrain n'a été réalisée, d'autres chercheurs ont même calculé que pour une maison de cette surface, 680 plants auraient été nécessaires ! [95]

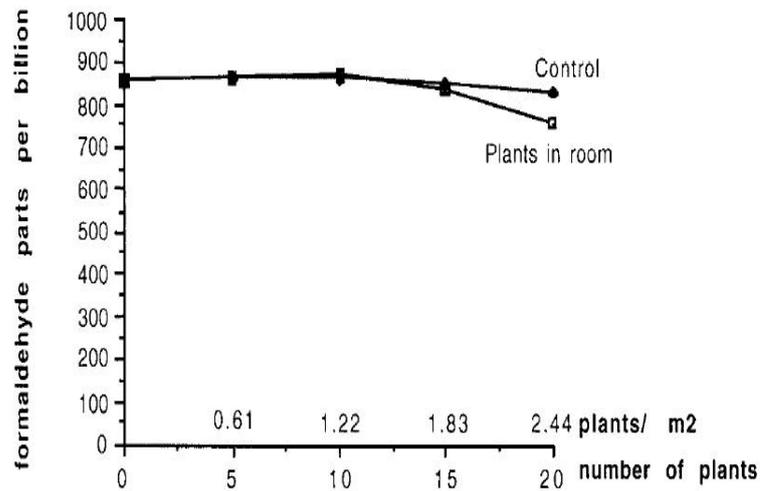


Figure 39 : Impact du nombre de plantes sur la concentration en formaldéhyde [94]

Wood et al. [90] ont également réalisé une étude pour évaluer la concentration des polluants en présence de plantes dans trois immeubles différents (soit 60 bureaux de 10 à 12 m²) aérés par air conditionné ou naturellement. Durant deux périodes de 5 ou 9 semaines, certains bureaux ont reçu au hasard 0, 3 ou 6 plantes en pot (*Dracaena deremensis*) et d'autres aucune. Des mesures de concentrations en COV totaux et individuels ont été réalisées dans les bureaux pendant 5 minutes chaque semaine sur différentes périodes.

Lorsqu'il n'y a pas de plante, la concentration en COV totaux mesurée était d'environ 190 ± 40 ppb alors qu'en présence de 3 plantes, elle était de 105 ± 15 ppb et de 100 ± 10 ppb en présence de 6 plantes. La présence de 3 ou 6 plantes a réduit les pollutions en COV totaux d'environ 50% quand les concentrations sont supérieures à 100 ppb. Toutefois, même si une diminution de concentration en COV totaux a pu être observée en présence de plante, elle n'était pas vraiment linéaire si on doublait le nombre de plante.

En ce qui concerne l'étude des COV mesurés séparément, il a été constaté qu'en présence de 6 plantes, les concentrations pouvaient être plus élevées ou plus basses qu'en absence de plante donc les concentrations en COV individuels n'ont apparemment pas diminué.

Pour tester la validité des résultats obtenus en laboratoire, une association d'entrepreneurs paysagistes associés d'Amérique (ALCA) soutenue par l'Healthy Building International (HBI) a mené une autre expérience sur le terrain [96].

Les concentrations en polluants tels que le toluène, le xylène, le 1,1,1-trichloroéthane et le benzène ont été mesurées pendant plusieurs mois dans deux étages de bureaux d'un même immeuble. Les conditions du système de ventilation étaient identiques pour les deux étages durant toute la durée de l'étude. Le premier mois a servi de témoin puisqu'aucune plante n'a été installée. Les quatre mois suivants, les plantes n'étaient présentes qu'au 9^{ème} étage et le dernier mois, elles étaient présentes au 9^{ème} et au 11^{ème} étage. Le nombre de plante installées n'a pas été indiqué mais il est probablement proche des recommandations de l'ALCA soit environ 1 plante pour 9,29 m².

Les résultats ont révélé que les concentrations en COV relevées au 9^{ème} étage étaient quasiment les mêmes que celles au 11^{ème} étage durant toute l'étude. Les auteurs ont donc conclu pour cette expérience que la présence de plantes n'a pas entraîné de diminution de concentration des polluants.

Enfin, les premiers résultats encourageants observés en laboratoire dans le cadre du programme PHYTAIR ont suscité la poursuite des travaux à l'échelle réelle dans une phase III [47].

Des expérimentations ont été entreprises pendant 8 semaines dans la maison expérimentale MARIA du CSTB, dans des conditions réalistes notamment en termes de ventilation de la pièce.

Les plantes utilisées appartenaient à l'espèce *Scindapsus aureus* et les différents polluants étudiés étaient: le CO, le benzène et le formaldéhyde. Ces polluants ont été générés à l'aide de sources artificielles (bouteille de gaz étalon) et réelles, ponctuelles (chauffage d'appoint et bâton d'encens) et continue (parquet). L'utilisation de sources réelles de pollution a permis l'investigation d'autres polluants (composés organiques volatils tels que l'alpha-pinène et les particules).

De plus, deux configurations de plantes (réparties sur deux murs de la pièce ou regroupées sur un seul mur) et deux conditions de ventilation (soit un taux de renouvellement d'air (TRA) de 0,6 h⁻¹ représentant une ventilation moyenne dans les logements, soit un TRA de 2,0 h⁻¹ simulant une ouverture de fenêtres) dans la pièce sont étudiées. Cette disposition n'est pas due au hasard mais est le résultat de simulations numériques réalisées au préalable grâce à des logiciels spécialisés. Les simulations numériques ont fourni un certain nombre d'informations quant aux futurs essais à réaliser dans la maison MARIA, comme les schémas d'écoulement d'air au sein de la pièce d'essai et les zones sous-ventilées afin d'optimiser l'étude.

L'ensemble des essais de cette étude PHYTAIR n'ont pas permis de conclure quant à un potentiel impact des plantes sur l'élimination du monoxyde de carbone, du benzène et du formaldéhyde, qui seraient émis dans une pièce par des sources réelles de pollution, dans des conditions réalistes de ventilation et de configuration.

2. Le potentiel de dépollution du complexe plante/sol

A. Les interactions plante/sol

La plupart des études mettent l'accent sur les performances dépolluantes des plantes notamment à travers le système aérien mais certains auteurs ont pris en considération le rôle du sol dans les processus d'épuration, que ce soit à travers le solide proprement dit, l'eau qui y est contenue et/ou les micro-organismes qui y sont présents.

a. La rhizosphère : une interface entre la plante et les micro-organismes [97] [98] [99]

Les micro-organismes, parmi lesquels les bactéries, les protozoaires, les algues ou encore les mycètes, peuvent avoir différents types de support, dont le sol dans lequel se développent les racines des végétaux [100].

On appelle rhizosphère la zone du sol influencée par les racines et les micro-organismes associés. Cette fine couche du sol (environ 1 à 2 mm) entourant les racines de la plante est le lieu de « rencontre » entre les micro-organismes et la plante.

« L'effet rhizosphère » est souvent exprimé par le ratio (R/S) du nombre de micro-organismes présents dans le sol de la rhizosphère sur le nombre de microorganismes présents dans le sol non rhizosphérique [70]. Ce R/S est plus important pour les bactéries, il est en général compris entre 10 et 20 voire plus [101].

Ainsi, la rhizosphère est beaucoup plus riche en microorganismes que le reste du sol avec notamment une population bactérienne pouvant parfois atteindre jusqu'à un milliard de cellules par gramme de terre sèche. Ces dernières couvrent notamment 4 à 10% de la surface totale des racines et sont surtout abondantes au niveau des poils racinaires.

Les relations qu'entretiennent les végétaux et la micro flore du sol sont très complexes mais un tel effet peut s'expliquer par la relation de bénéfices réciproques qui existe entre la plante et les microorganismes de la rhizosphère.

b. Des échanges à bénéfices réciproques

La zone rhizosphérique est un endroit privilégié pour les micro-organismes car ils trouvent de l'oxygène facilement renouvelable, de l'eau et des nutriments nécessaires à leur développement. En particulier, la plante met à leur disposition des nutriments assimilables issus du phénomène de rhizodéposition. On peut distinguer au moins deux origines de composés rhizodéposés.

Les premiers proviennent de la mort de certaines cellules végétales, soit environ 10 000 par jour, au cours de la croissance et de la maturation de la plante.

D'autres composés proviennent de l'activité métabolique du végétal et constituent les exsudats. Ceux-ci sont libérés au niveau des feuilles ou des racines : dans ce dernier cas, on les appelle "exsudats racinaires". Ils peuvent représenter de 10 à 30% du carbone fixé par photosynthèse; ce sont essentiellement des acides aminés, des acides organiques, des composés phénoliques (coumarines, flavonoides, catechines...), des sucres, des vitamines, des mucilages, des polysaccharides et des protéines.

Ces derniers permettent entre autres, de par leurs propriétés nutritives, la sélection et le développement des micro-organismes y compris ceux impliqués dans la dégradation de composés potentiellement dangereux pour la plante [98] [99] [100]. Ainsi, certains composés phénoliques sécrétés par les racines, comme par exemple l'acide coumarinique, sont utilisés en tant que co-métabolite (le polluant ne sert ni de source de nutriments ni d'énergie aux microorganismes qui le dégradent) par les bactéries dégradant des composés polychlorobenzoiques [72].

Les exsudats racinaires assurent d'autres fonctions : défendre la plante contre les microorganismes pathogènes, garder le sol humide autour des racines, aider la plante à obtenir ses nutriments ou encore inhiber la croissance d'autres plantes qui peuvent devenir envahissantes.

De plus, les exsudats peuvent modifier les propriétés chimiques du sol autour des racines lui conférant un pH, une concentration en oxygène et en CO₂ différentes du reste du sol ce qui peut influencer la croissance des micro-organismes au niveau de la rhizosphère.

Si la plante contribue à la vie biologique des sols, cette flore microbienne est indispensable à l'alimentation et à la survie de la plante.

La plupart des micro-organismes vivent probablement en saprophyte (ce qui signifie qu'ils n'exercent - a priori - aucune action sur le végétal), d'autres exercent un effet néfaste (organismes pathogènes) et d'autres peuvent, au contraire, protéger et favoriser le développement du végétal (symbiose).

Les micro-organismes peuvent aider à la solubilisation ou la métabolisation des minéraux, à la décomposition de la matière organique pour la rendre assimilable par la plante (minéralisation) ainsi qu'à la fixation de l'azote atmosphérique. Egalement, ces derniers peuvent sécréter des composés (vitamines, hormones et autres signaux chimiques) favorisant la croissance des plantes. Ils peuvent aussi protéger la plante des agressions chimiques de certains polluants en les dégradant, ou de certains pathogènes en produisant des agents antifongiques.

Cependant, il faut souligner que le fonctionnement de la rhizosphère reste encore mal connu, en dépit de son importance écologique ainsi que de sa répercussion sur la croissance et la santé de la plante.

B. Importance des micro-organismes du sol dans la dépollution de l'air

Des chercheurs ont mis en évidence le rôle joué par les micro-organismes du sol d'une plante en pot dans la dépollution de l'air. La plante a alors été enlevée de son pot et celui-ci replacé dans la chambre puis soumis à l'exposition d'un COV (exemple le benzène). Dans les différentes expériences, le COV a continué à être éliminé à des taux comparables, bien qu'à une vitesse légèrement inférieure, à ceux obtenus avant le retrait de la plante [65] [86] [102] [103] [104]. Comme on peut le remarquer sur la figure 40, même avec une augmentation des doses de benzène sur plusieurs jours, l'activité dépolluante a été maintenue. Des résultats similaires ont été observés suite à une exposition au CO dans le cadre du programme PHYTAIR [59] (Figure 41). Ceci suppose que l'activité de dépollution est une réponse biologique et non un simple processus d'adsorption/absorption; et que le sol joue un rôle dans le processus de détoxification.

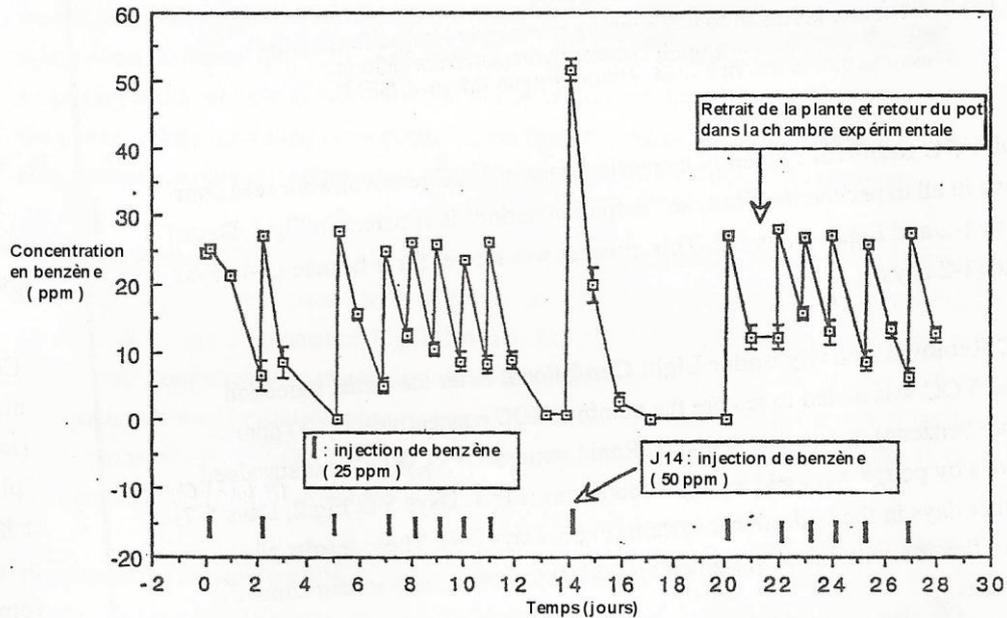


Figure 40 : Concentration en benzène dans la chambre expérimentale contenant *H. forsteriana* [103].

Chaque point représente la moyenne de 4 expériences (Moyenne $\pm \sigma$)

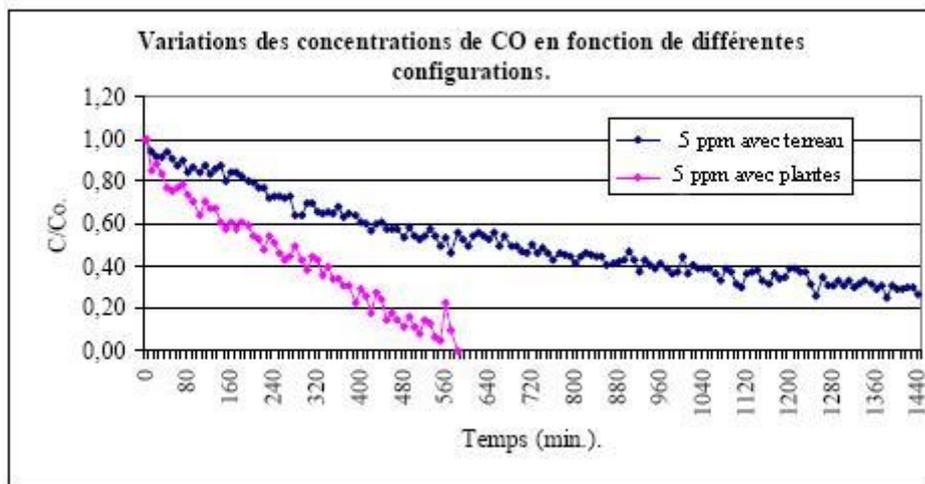


Figure 41 : Variations des concentrations en CO en fonction de différentes configurations (pots de terreau vs. 6 plants de *S. aureus*) [59].

La concentration initiale est de 5 ppm, injection en mode unique

Différents travaux ont montré que dans un sol stérilisé ou recouvert de sable stérilisé (tableau 15), les polluants gazeux (formaldéhyde) n'étaient quasiment pas éliminés [102]. Lorsque le pot était recouvert par un film plastique (figure 42), une décroissance relativement lente a été observée par rapport au pot sans film plastique [59]. Ces résultats ont bien révélé le rôle essentiel des micro-organismes du sol dans la dépollution.

Sols	Taux d'élimination ($\mu\text{g/h}$)	Temp($^{\circ}\text{C}$)	UFC
Sol stérilisé	< 0,05	25,8	0
Sol non stérilisé	188,0	25,0	235
Sol non stérilisé recouvert par du sable stérilisé *sable uniquement	< 0,05	25,8	0*

Tableau 15 : Taux d'élimination du formaldéhyde par les pots de terre [102]

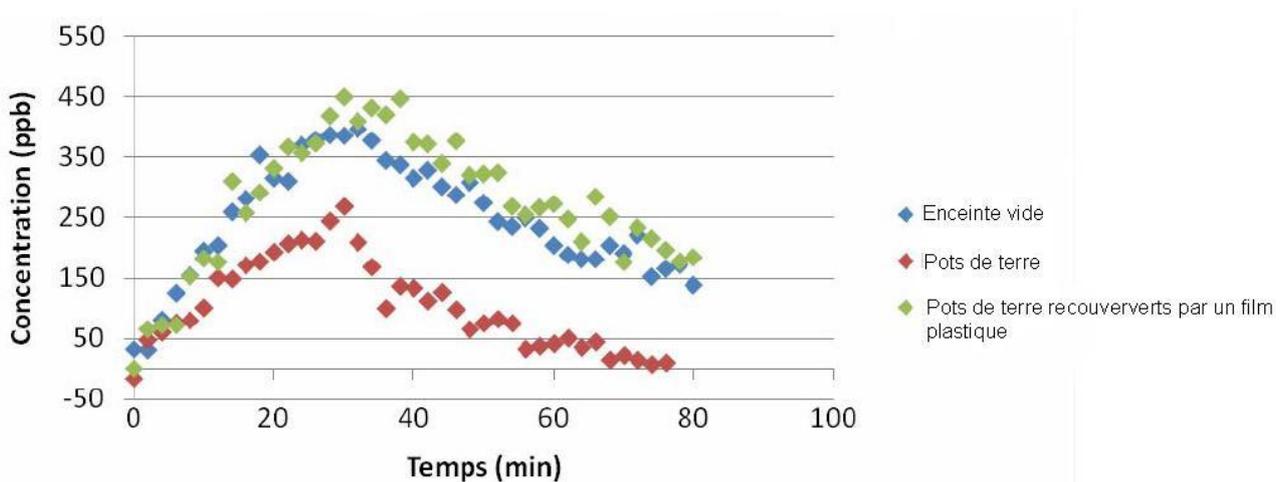


Figure 42 : Variations des concentrations en formaldéhyde en fonction de différentes configurations [59]

Wood et ses collaborateurs ont pu mettre en évidence la capacité de ces micro-organismes à utiliser le polluant présent. Ils ont mis une suspension bactérienne (dans de la vermiculite) à partir de la terre ayant servi de substrat à *Howea forsteriana* en présence de benzène [86]. Ils ont ensuite mesuré l'évolution de la teneur en benzène au cours du temps (dose initiale de benzène = 25 ppm). L'élimination du benzène s'est d'abord faite très lentement (- 20 % en 24 heures), puis la vitesse d'élimination a augmenté pour se stabiliser à un niveau élevé (- 90 % en 24 heures) démontrant alors une activité similaire au pot de terre (figure 43). La population microbienne totale du sol n'augmentait pas significativement en nombre après l'exposition au benzène mais on a constaté des changements dans la composition bactérienne. En effet, la présence de benzène a entraîné des modifications au niveau de la communauté bactérienne notamment une sélection de la population de microorganismes capable d'utiliser le polluant.

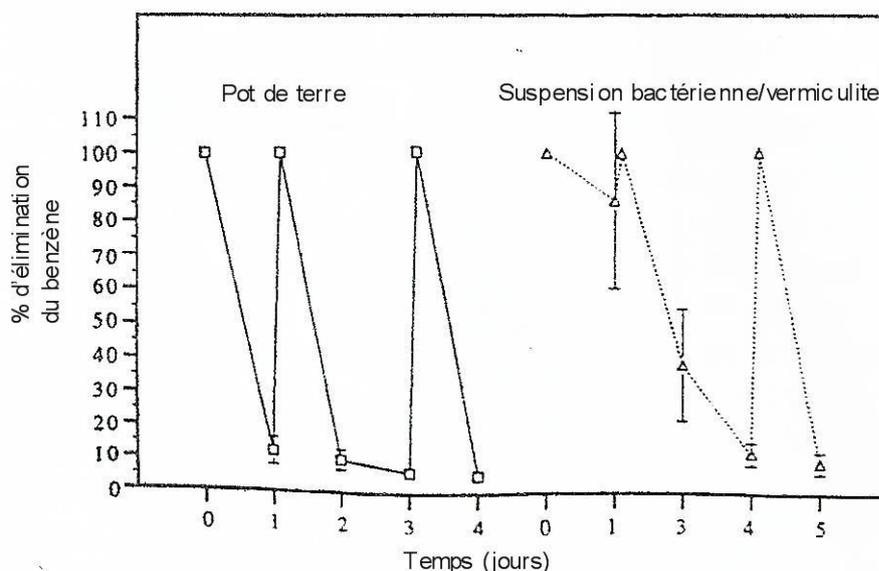


Figure 43 : Comparaison de l'évolution de l'élimination du benzène par le pot de terre et par la suspension bactérienne (dans de la vermiculite) issue de la terre du pot [86].

Chaque point représente la moyenne de 4 expériences (Moyenne $\pm \sigma$)

Certains auteurs ont même été jusqu'à dire que l'influence de la plante elle-même sur la suppression du polluant serait surtout due à l'activité des micro-organismes du sol tandis que le rôle du système aérien resterait à débattre [105]. Une étude a tenté de connaître les contributions respectives de la partie aérienne d'une plante et de sa partie racinaire dans l'élimination des COV [106]. En particulier, les auteurs se sont aperçus que chez *Fatsia japonica* et *Ficus benjamina* la dégradation du formaldéhyde le jour, était équivalente entre les parties aérienne et racinaire, tandis que la nuit, la partie racinaire éliminait 11 fois plus de formaldéhyde que la partie aérienne. De plus, la dégradation par les micro-organismes du sol était proche de 90% étant donné qu'après stérilisation des pots, seulement 10% du formaldéhyde était dégradé.

Si le système aérien de la plante semble peu participer à l'élimination des polluants notamment des COV, le système d'élimination reste néanmoins moins efficace sans la plante.

En effet, le CSTB a comparé les performances de différentes configurations sur des plants de *Chlorophytum comosum* exposé au toluène [107]. Ces configurations étaient : les plantes en pots, les plants sans feuilles dans les pots, les plants en culture hors sol (sans terre ni micro-organismes), les feuilles seules, le sol seul, stérilisé ou non. Les différentes expériences ont montré que c'est le système le

plus complet qui est le plus efficace, à savoir l'ensemble plante entière, terre et micro-organismes. L'ensemble terre et micro-organismes sans plante s'est avéré également efficace, mais pas la plante sans terre ni micro-organismes [50].

Ces résultats qui tendent à montrer qu'il faut le «mini écosystème» complet sont concordants avec ceux de Wood et *al.* [86] qui ont exposé au benzène un nouveau pot de terre qui n'a jamais été en contact avec la plante (tableau 16). Bien qu'une élimination significative du benzène ait été constatée, ils ont aussi démontré que le taux maximum d'élimination du benzène était quand même plus faible pour le nouveau pot de terre seul qu'en présence de plante (23 à 79 % de moins).

Stage in experimental sequence	Rate of benzene removal (mg m ³ d ⁻¹ kg ⁻¹ dry potting mix)			
	Virgin potting mix control experiment [§]	<i>Howea</i>	<i>Spathiphyllum</i>	<i>Dracaena</i>
Initial	4.6 ± 0.4	20.3 ± 1.7*	34.5 ± 4.0*	10.0 ± 2.3
Induction with single dose	24.5 ± 2.3	51.2 ± 7.3*	36.0 ± 10	69.0 ± 6.1*
'Steady state'	43.7 ± 4.1	55.5 ± 3.6	171 ± 18*	194 ± 49*
Days 8 and 9	20.4 ± 1.4	n.a.	n.a.	n.a.

Tableau 16 : Capacité d'élimination du benzène par un nouveau pot de terre vierge comparé à celle d'un pot contenant *H. forsteriana*, *S. wallisii* et *D. marginata* avec une dose initiale de benzène de 25 ppm [86]. Les données correspondent à la moyenne de 4 expériences (Moyenne ±σ).

Ces observations semblent cohérentes car, comme nous l'avons déjà développé, la plante est principalement impliquée dans le maintien des micro-organismes racinaires grâce aux nombreux échanges notamment par la sécrétion d'exsudats racinaires. Les COV entraînent des réponses métaboliques chez la plante qui peut signaler leur présence aux microorganismes du substrat via les racines grâce à une réponse microbienne spécifique à chaque espèce de plante.

Xu et *al.* ont pu montrer que l'absorption du formaldéhyde pouvait être stimulée par la plante araignée (*Chlorophytum comosum* L.) parce que ce polluant a été assimilé par les racines et que sa dégradation par les micro-organismes a été renforcée par les exsudats racinaires produits par cette plante [108].

Enfin, la comparaison des performances d'élimination des polluants parmi les plantes étudiées indique qu'il existe une diversité de communautés bactériennes,

associées au système racinaire, qui entretiennent des relations différentes avec les plantes au sein de la rhizosphère. [65]. Les bactéries les plus fréquemment rencontrées dans la rhizosphère des plantes sont : *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Azotobacter*, *Mycobacterium*, *Flavobacter*, *Cellulomonas*, *Micrococcus* [101]. Il est intéressant de noter que les plantes pour lesquelles la rhizosphère est riche en bactéries gram-négatives sont plus efficaces pour la dépollution que celles dont la rhizosphère est riche en gram-positives [70] [102]. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les bactéries gram-négatives répondent aux exsudats racinaires et sont généralement prédominantes (*Pseudomonas*, *Agrobacterium*) alors que les bactéries gram-positives (*Bacillus*, *Clostridium*) sont relativement rares dans la rhizosphère [65].

Cependant, on estime que seuls quelques pour cents des micro-organismes associés aux plantes ont été cultivés et identifiés. Cette fraction connue de la microflore végétale représente plusieurs milliers d'espèces bactériennes et il reste donc encore beaucoup à apprendre [98].

2) Les systèmes actifs utilisant des plantes

1. Le biofiltre végétal

Comme nous l'avons vu précédemment, les micro-organismes jouent un rôle primordial dans la dépollution de l'air. C'est pourquoi, la biofiltration, et plus techniquement les biofiltres, forment un vaste domaine de la remédiation basé sur l'utilisation de ces microorganismes pour la dégradation des polluants [109]. Le biofiltre est en réalité un procédé naturel composé d'un substrat (compost, lit de terre, tourbe) dans lequel vont se développer les micro-organismes qui vont dégrader les polluants sous forme d'eau et de CO₂.

Historiquement, ce procédé a été mis au point pour la décontamination des effluents liquides dans le début du 20^{ème} siècle. Le rôle indispensable des bactéries, notamment dénitrifiantes (*Comamonas*, *Hyphomicrobium*, *Pseudomonas halodenitrificans*), dans le cycle de l'azote est aujourd'hui mis à profit dans les stations d'épuration pour éliminer l'azote des eaux usées [110] [111].

L'essor de la biofiltration dans le domaine des gaz date des années 1950 [47]. L'utilisation au sens large d'organismes vivants pour l'épuration d'effluent gazeux contaminés fait partie intégrante des voies explorées pour la remédiation des

polluants atmosphériques. C'est à ce titre que la biofiltration est actuellement utilisée dans le milieu industriel. En effet, on cherche à éliminer spécifiquement certains composants aux teneurs importantes en exploitant le potentiel de populations microbiennes ultra spécialisées. Ainsi, des micro-organismes sont sélectionnés et inoculés dans les biofiltres (bioaugmentation) comme par exemple pour la dépollution des sites contaminés par les hydrocarbures [111]. Différents micro-organismes ont démontré un pouvoir dépolluant. La capacité des bactéries Gram-négatives, telles que *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Flavobacterium* ou *Achromobacter* pour dégrader les composés organiques, notamment les hydrocarbures, est relativement bien documentée [101] [103].

Cependant, il faut rappeler qu'il s'avère très difficile de développer et de maintenir des populations microbiennes spécialisées pour purifier l'air intérieur de nos maisons en raison de la présence de nombreux gaz, à des taux très faibles et variables [112]. Le biofiltre à usage domestique doit donc être capable de dégrader un large éventail de composés et de s'adapter aux variations de concentrations.

En ajoutant à ces systèmes de biofiltration un support végétal tel que des plantes d'intérieur, ceux-ci deviennent plus adaptés aux espaces intérieurs des locaux. En effet, comme nous l'avons déjà souligné, le sol dans lequel se trouvent les racines des végétaux constitue un excellent support de développement pour les micro-organismes. La sécrétion d'exsudats racinaires permet notamment le maintien de populations microbiennes variées qui vont pouvoir métaboliser de nombreux polluants. C'est donc cette relation entretenue entre la plante et la microflore du sol qui est utilisée dans ce type de système de biofiltration [47].

Le biofiltre végétal fait donc essentiellement appel aux capacités d'épuration du sol, via la fixation des polluants dans le substrat et à leur dégradation par les micro-organismes, mais aussi dans une moindre mesure des plantes [53] [47]

Le principe de fonctionnement du biofiltre végétal repose sur le passage de l'air forcé (système actif) au travers du substrat des plantes (microorganismes, sol enrichi ou non en substances adsorbantes telles que du charbon actif). (figure 44)

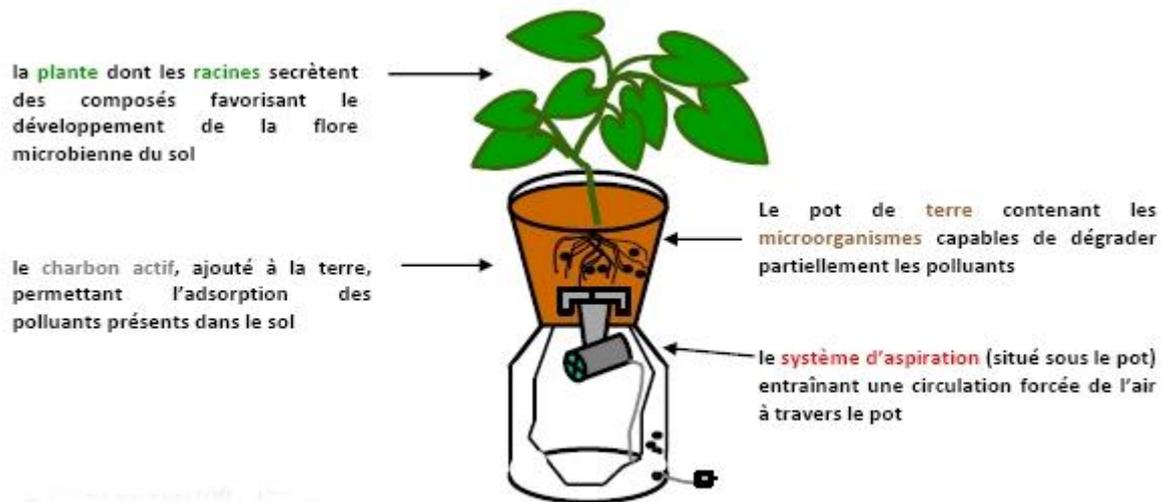


Figure 44 : Représentation schématique d'un dispositif de biofiltration [82]

Le passage de l'air forcé à travers le milieu filtrant va alors se distinguer de la simple plante en pot (système passif). En effet, le temps de contact entre les polluants de l'air et le système de biofiltration est augmenté par rapport à un système passif où ce temps n'est régi que par les phénomènes de diffusion. Il est donc à supposer que les systèmes actifs présenteraient de meilleures performances d'épuration de l'air intérieur, aussi bien à l'échelle du laboratoire qu'en atmosphère réelle [47].

2. Des études expérimentales aux applications

L'équipe de Wolverton [113] a été l'une des premières à tester et à développer ces dispositifs d'épuration de l'air à l'intérieur des locaux. Ils étaient de taille réduite, bâtis sur la base d'un pot de fleur dont le substrat était enrichi en substances absorbantes comme le charbon actif ou encore le charbon de bois (figure 45).

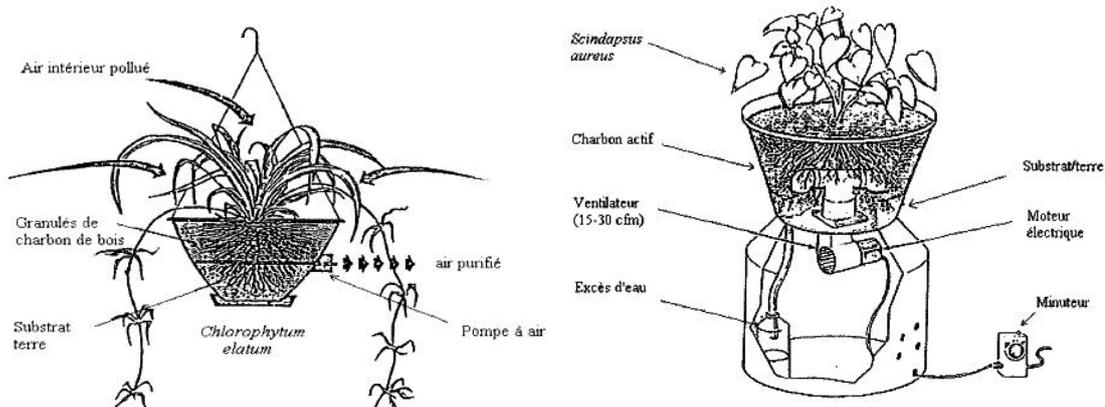


Figure 45 : Systèmes de purification de l'air intérieur proposés par Wolverton [113]. A gauche, biofiltre combinant *Chlorophytum elatum* et un sol enrichi en charbon de bois. A droite, biofiltre combinant *Scindapsus aureus* et un sol enrichi en charbon actif.

Les expériences réalisées en chambre hermétique ont montré que ce pot amélioré permettait d'éliminer totalement en deux heures le trichloréthylène et le benzène présents en faibles (figure 46) ou en fortes concentrations.

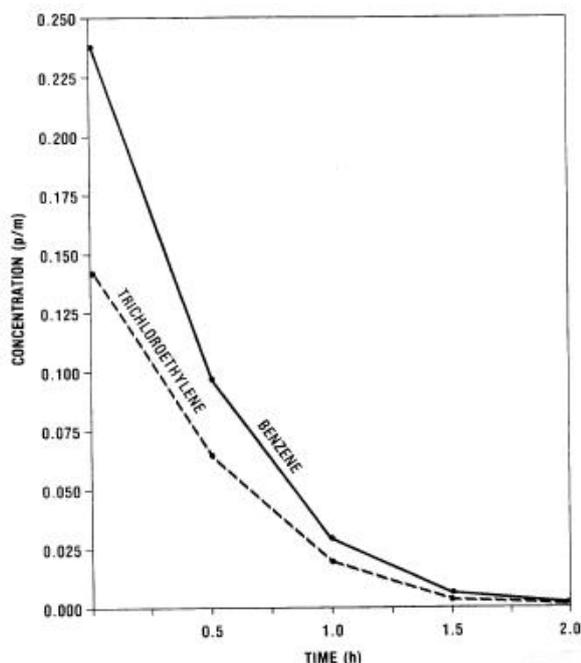


Figure 46 : Elimination du benzène et du trichloréthylène (présents en faibles concentration) de l'air de la chambre hermétique expérimentale contenant un biofiltre qui associe *S. aureus* et un sol enrichi en charbon actif [113]

Par la suite, ce système a connu de nombreuses évolutions et fut mis sur le marché par le biais d'une société japonaise (ACTREE). Vendu sous le nom d'Ecoplanter® (figure 47), ce biofiltre combine une circulation d'air forcé dans des

matériaux absorbants, un dispositif de photocatalyse (dégradation par les U.V.) et des plantes [47].

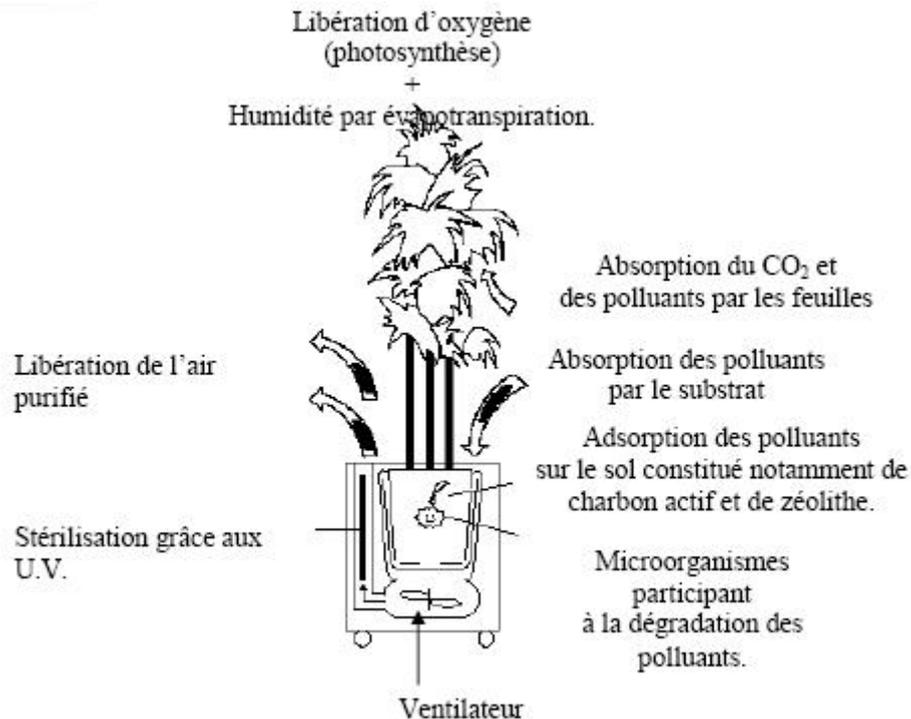


Figure 47 : Procédé ECOPLANTER® issu des systèmes mis au point par Wolverton [47]

Des systèmes plus complexes et de plus grandes tailles ont vu le jour depuis les premiers travaux de Wolverton. Nous pouvons citer le système de Darlington, chercheur à l'université de Guelph en Ontario au Canada, qui a mis au point un biofiltre vertical (filtre percolateur) qui représente un véritable « mur végétal ».

Globalement, ce biofiltre se compose de trois éléments : une zone quasi hydroponique (hors sol) où se trouvent les plantes, un aquarium pouvant contenir des plantes aquatiques et une surface de panneaux de fibre de verre recouverte de mousses et/ou de fougères au travers de laquelle l'air sera filtré (figure 48). Il s'avère que les mousses ont également les capacités de dégrader certains polluants notamment les COV de l'air contaminé et présentent un environnement favorable à la croissance ainsi qu'au développement des microorganismes.

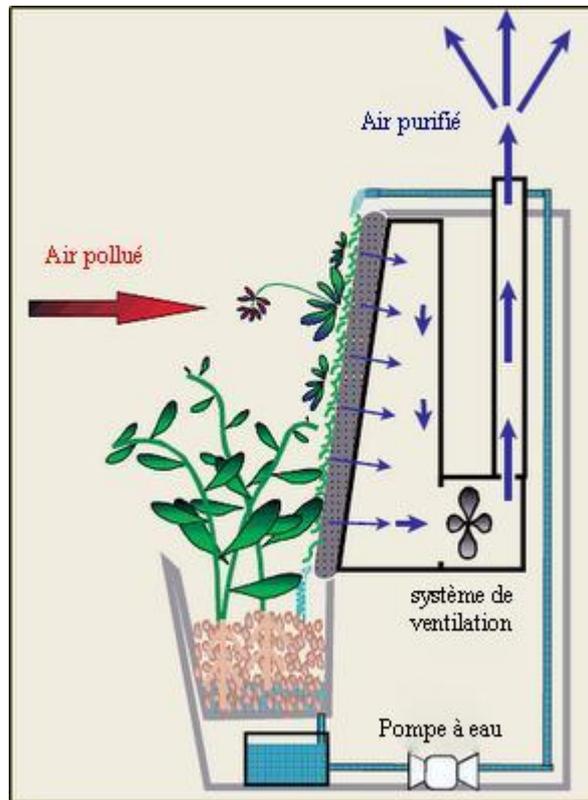


Figure 48 : Coupe de biofiltre mis au point par Darlington [47]

L'eau de l'aquarium ruisselle le long du mur végétal où se trouvent les mousses puis coule au niveau de la zone hydroponique où sont implantées les plantes avant de retourner dans l'aquarium. L'air à traiter est forcé à travers le substrat et la rhizosphère des plantes mais il est aussi attiré à travers la surface humide recouverte de mousses grâce à un système aspirant constitué d'un ventilateur. L'air, réparti entre phase gazeuse et aqueuse, est purifié par les plantes de la zone hydroponique et de l'aquarium, par les mousses et les fougères du mur végétal, et surtout par les populations de microorganismes qui se développent dans cet écosystème. Enfin, l'air purifié est envoyé dans le système de circulation générale et retourne dans la pièce [114].

Un prototype hybride entre l'usage domestique et industriel a été développé par Darlington afin de tester le procédé en conditions réelles. Un mur végétal de 10 m² a été installé au rez-de-chaussée de l'immeuble de la Canada Life Assurance à Toronto dans une salle de conférence de 160 m² qu'il a rebaptisée la Canada Life Environmental Room (CLER) (figures 49 et 50).

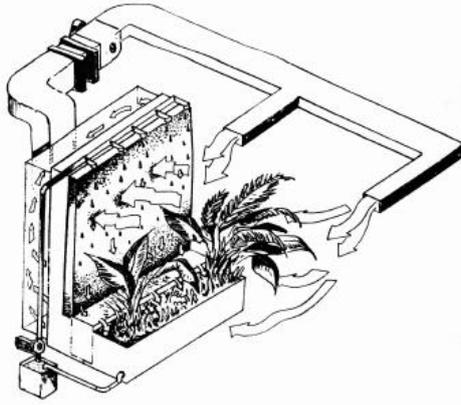


Figure 49 : (à gauche) Schéma d'un biofiltre de l'air intérieur [115]

Figure 50 : (à droite) Photographie du biofiltre du CLER [116]

Environ 80% de la surface était recouverte par des mousses (*Plagiomnium cuspidatum* et *Taxiphyllum deplanatum*) et près de 150 espèces de plantes ont été utilisées parmi lesquelles *Dracaena godseffina*, *Adiantum raddianum*, *Hedera helix*, *Spathiphyllum maunaloa*, *Rhododendron obtusum*, *Murraya sp.*, *Vriesea splendens* et *Dieffenbachia picta* etc... A la base, se trouvait un aquarium de 3500 litres contenant une variété de plantes aquatiques telles que *Elodea sp.*, *Cabomba sp.* et *Vallisneria sp.* et semi-aquatiques comme *Cyperus spp.*, *Myriophyllum proserinacoides* et *Lysimachia sp.* [115]

Des essais ont été réalisés sur différents polluants dont les COV après une période d'acclimatation d'environ une semaine. Ce système permettait effectivement une diminution des teneurs en polluants mais avec une efficacité variant de 80% pour le formaldéhyde, 50% pour le toluène et 10% pour le trichloréthylène [116]. L'élimination des contaminants semblait fortement dépendre de leur solubilité. Ainsi, le formaldéhyde se retrouvait très rapidement en phase aqueuse et il était donc rapidement métabolisé par les plantes et les micro-organismes, contrairement au benzène. De plus, la vitesse d'aspiration de l'air et la température auraient influencé aussi l'élimination du toluène, du benzène et du xylène [116].

Un autre prototype dénommé NORCAT (Northern Center for Advanced Technology) a été mis en place par Darlington à Sudbury en Ontario (figure 51). Ce dernier utilisait le même procédé que le CLER mais à une plus petite échelle et avec des plantes locales collectées dans la région comme le laurier, la myrtille, l'airelle, le sapin... [115].



Figure 51 : Photographie du biofiltre du NORCAT [116]

Ce système n'était pas aussi efficace que celui du CLER car les plantes n'étaient pas dans des conditions idéales avec des cycles saisonniers, mais montrait tout de même une amélioration de la qualité de l'air. [116]

Il faut noter que des travaux réalisés par Darlington et son équipe ont démontré que leurs biofiltres n'entraînaient pas de diminution de la qualité de l'air ambiant à travers la production de spores fongiques (figure 52) ou de bactéries pathogènes (figure 53). En particulier, la présence de la bactérie *Legionella pneumophila* s'est avérée indétectable (moins de 1CFU ml-1) [38].

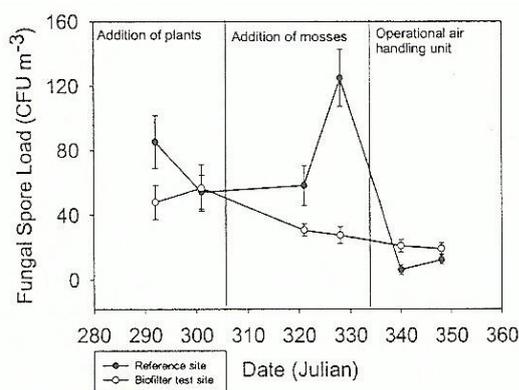


Figure 52 : Concentration moyenne des spores fongiques (CFUm⁻³) dans l'essai en présence du biofiltre et dans un site de référence sans biofiltre (38]

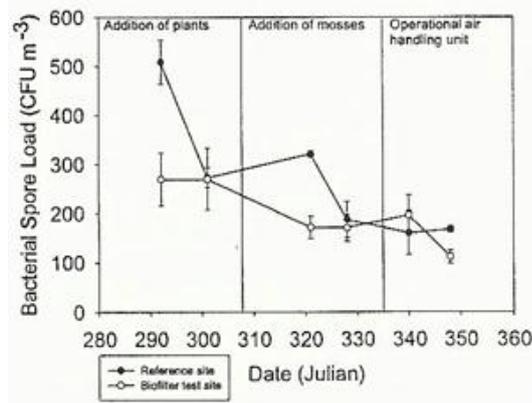


Figure 53 : Concentration moyenne des bactéries fongiques ($CFU m^{-3}$) dans l'essai en présence du biofiltre et dans un site de référence sans biofiltre [38]

Une autre équipe de chercheurs a mené une étude sur les biofiltres afin d'évaluer un nouveau modèle et d'en optimiser les performances à court et long terme [117]. Contrairement aux biofiltres précédents, le substrat était composé d'un mélange de charbon activé et de cailloux de schiste dans lesquels se trouvaient les racines de la plante (*Epipremnum aureum*); un ventilateur qui aspirait l'air à travers les racines était également présent ainsi qu'un système d'auto-irrigation (figure 54).

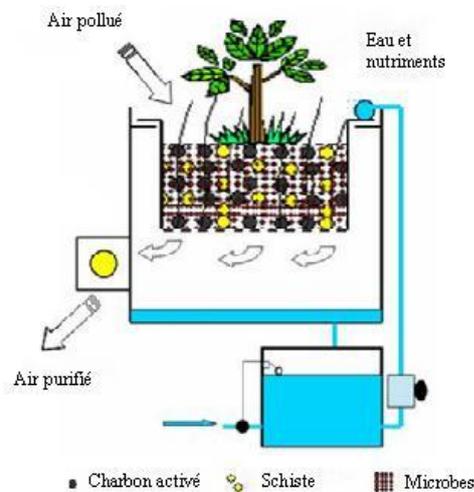


Figure 54 : Prototype de système de biofiltration [117]

Les premiers essais effectués en enceinte ont démontré une efficacité d'élimination de 70 à 99% pour le formaldéhyde et le toluène, ce qui a incité à passer les tests en conditions réelles. Dans une pièce d'un immeuble contenant 16 bureaux, les résultats ont alors révélé que le système est capable de purifier l'air efficacement (environ 40 % pour le toluène et 70% pour le formaldéhyde) sur une période de 60 jours.

Il existe, à l'heure actuelle, différents modèles de biofiltres végétalisés qui sont de tailles et de formes diverses, présentés et commercialisés pour l'épuration de l'atmosphère d'habitation comme de locaux publics (salle de spectacle, bureaux...).

Ainsi, après des années de recherche, Darlington a créé en 2001 la société Air Quality Solution [47] qui développe des systèmes d'épuration de l'air à partir de murs végétaux (figure 55).

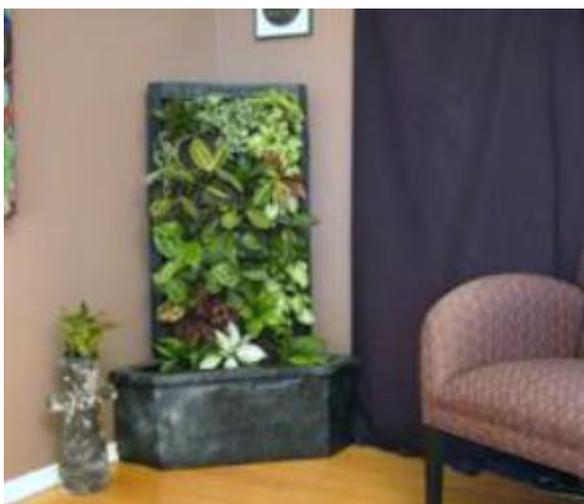


Figure 55 : Biofiltre domestique basé sur le système développé par Darlington [47]

En France, la société PHYTORESTORE a développé un concept de jardin filtrant®, basé sur des murs végétaux, utilisé pour l'épuration notamment de l'air intérieur. Les photos ci-dessous montrent un exemple d'installation de ce type de système (figure 56 & 57) [47] [118].



Figure 56 : (à gauche) Jardin Filtrant® Air intérieur dans le restaurant Naked à Paris [118]

Figure 57 : (à droite) Installation d'un mur végétal filtrant gare Magenta à Paris [47]

Enfin, les systèmes Vgbox® et Andrea® sont des biofiltres de taille plus réduite, donc plus adaptés à l'environnement intérieur de nos habitats, qui correspondent du point de vue technique à ceux proposés par Wolverton et déclinés dans le système Ecoplanter® [47]

Contrairement au vgbox (figure 58), le biofiltre Andrea (figure 59) n'utilise qu'une seule plante parmi lesquelles *Spathiphyllum*, *Dracaena marginata*, *Chlorophytum comosum* ou encore l'*Aloe vera*. [119]



Figure 58 : Photographie d'un biofiltre Vgbox [47]



Figure 59 : Photographie d'un biofiltre Andrea [119]

Ces différentes sociétés ont réalisé elles-mêmes des études sur leurs biofiltres par le biais de divers laboratoires afin de démontrer l'efficacité de leurs produits. Les résultats ont toujours démontré une diminution des concentrations des polluants mesurés donc une amélioration de la qualité de l'air. Toutefois, si ces derniers sont prometteurs, il convient de rappeler qu'ils n'ont pas fait l'objet d'une analyse par un organisme scientifique reconnu dans ce domaine.

Cependant, un dispositif de type Vgbox a fait l'objet de premiers tests dans le cadre du projet PHYTAIR III. Comme les expériences précédentes ont démontré que les plantes utilisées de manière passive entraînaient des rendements insuffisants, il a été engagé un travail sur l'utilisation d'un système actif utilisant les mêmes plantes.

L'étude s'est déroulée dans le CUBE qui représente une échelle intermédiaire entre les enceintes contrôlées et la maison MARIA [47]. Un prototype de biofiltre Vgbox seul ou contenant 4 plants de *Scindapsus aureus* dans du terreau humidifié a été exposé à une concentration initiale de 10 ppm de CO. Il a été remarqué que la concentration de CO dans l'enceinte diminuait lors de chaque expérience avec une loi proche d'une loi exponentielle mais que les mesures étaient loin d'être reproductibles. Même s'il était difficile de conclure de manière absolue à partir d'un jeu de données aussi restreint, il a résulté de cette expérience que la présence d'un Vgbox ne contribuait pas à accélérer de façon significative la diminution de la concentration de CO dans l'enceinte par rapport à un système passif.

Le rôle des plantes dans la problématique de la qualité de l'air intérieur

Depuis les premières expérimentations de la NASA au début des années 80 jusqu'à aujourd'hui, des recherches scientifiques se sont intéressées au potentiel des plantes à purifier l'air intérieur.

Les professionnels des filières du secteur privé, notamment certaines enseignes de la distribution et du jardinage, se sont appropriés les résultats de ces études comme argumentaire commercial. Par conséquent, de nombreuses plantes en pot ont été proposées à la vente comme plantes « dépolluantes » (figure 60) avec souvent des recommandations faites pour choisir une plante en fonction d'un polluant ou d'une pièce à dépolluer.



Figure 60 : Vente de plante sous l'étiquette « plante dépolluante » dans une jardinerie [120]

Cependant, il convient de rappeler qu'une information crédible se base sur des résultats scientifiques bien validés. C'est pourquoi, l'OQAI et ses partenaires ont été sollicités par les pouvoirs publics afin de faire une analyse critique des connaissances et d'organiser les données scientifiques disponibles en France et à l'étranger. A l'issue, un consensus sur l'efficacité et l'innocuité de ces dispositifs d'épuration de l'air a été établi, permettant une meilleure communication sur le sujet ainsi qu'une diminution des pratiques qui peuvent mener à des abus et à de la désinformation [29].

I - Le point sur le pouvoir purificateur des plantes d'intérieur

1) Des propriétés épuratrices prouvées en laboratoire [50] [54] [53] [121]

De façon consensuelle, tous les travaux menés en laboratoire en conditions contrôlées ont montré les capacités intrinsèques des plantes à réduire la teneur de certains polluants présents dans l'air intérieur [53] [83] [86] [87] [88]. Elles possèdent des capacités d'abattement avérées vis-à-vis de polluants gazeux tels que le monoxyde de carbone, les COV comme le formaldéhyde par exemple.

Les études ont montré une efficacité « dépolluante » du complexe sol/plante bien supérieure à celle présentée par le seul système foliaire. Le rôle des micro-organismes dont la présence est largement entretenue par les végétaux eux-mêmes, se révèle essentiel dans le processus d'épuration. Les recherches montrent que les performances d'épuration varient en fonction du type de plante et des polluants étudiés (annexe 2).

Cependant, en laboratoire, les polluants tout comme les conditions d'exposition ne sont pas réalistes donc il convient d'interpréter les résultats sur les capacités épuratoires des plantes avec prudence.

Les travaux effectués sont encore peu nombreux, les résultats souffrent d'un manque d'homogénéité et les techniques utilisées peuvent être assez disparates. Différents paramètres environnementaux comme l'humidité relative, la température, la concentration en CO₂, la luminosité ou les concentrations en polluant peuvent être contrôlés. Cependant, en fonction des travaux, certains de ces paramètres environnementaux ne sont pas toujours étudiés ou leurs variations ne sont pas montrées. Or, ceux-ci (comme l'humidité par exemple) sont particulièrement importants car ils agissent directement sur les concentrations des polluants.

Le manque de standardisation méthodologique dans les tests effectués rend souvent les comparaisons délicates et la synthèse de données difficile.

De plus, les études ont été conduites en enceintes expérimentales à des concentrations en polluants supérieures à celles habituellement observées dans les logements.

Ce procédé se justifie méthodologiquement car il permet de travailler en se basant sur des hypothèses majorantes (qui peut le plus, peut le moins!) et de raccourcir le temps d'exposition. Cela offre également l'avantage de travailler dans une gamme de concentrations largement au-dessus des seuils de détection des appareils et de fournir des données fiables sur les décroissances observées (liées à la sensibilité des appareils).

Par contre, ces stratégies se heurtent à certaines limites. Ainsi, comme nous l'avons déjà exposé, une part des mécanismes d'absorption repose sur un équilibre qui se crée entre la feuille et l'atmosphère. En utilisant de fortes concentrations, l'équilibre est en quelque sorte déplacé. De ce fait, la transposition des résultats aux faibles concentrations ne peut être, *a priori*, considéré comme linéaire; ceci est important car il s'agit là, rappelons-le, d'évaluer des performances épuratoires.

De la même manière, beaucoup de travaux portant sur les effets des polluants sur les plantes ont montré que les mécanismes cellulaires sont différents en fonction des concentrations en polluant. Certains d'entre eux sont stimulés, inhibés ou induits différemment en fonction de la quantité de polluants présente.

Enfin, nous pouvons observer que les travaux reposent sur des expositions courtes, souvent de l'ordre de quelques heures, au cours desquelles les polluants sont souvent injectés de façon unique. Or, dans les bâtiments, on s'expose généralement à un cocktail de substances de façon constante.

Si l'on dresse un bilan global des travaux, nous sommes essentiellement dans un contexte d'exposition (d'intoxication) aiguë. Or, d'après les connaissances actuelles, en cas de doses massives dans l'habitat, les plantes n'auraient qu'un rôle mineur et insuffisant.

Les conditions utilisées en laboratoire ne peuvent pas être représentatives des conditions rencontrées dans l'habitat qui sont par nature très variables. Ainsi, les résultats obtenus dans les laboratoires ne doivent pas être directement transposés aux dimensions réelles [53].

2) Dans les espaces réels: pas d'efficacité démontrée [54] [47] [121]

En l'état actuel des connaissances, encore limitées, l'utilisation de plantes en pot n'apparaît pas efficace pour éliminer les polluants de l'air dans les espaces clos. Trop peu d'expérimentations ont été menées en conditions réelles (faibles concentrations des polluants, mélange de substances, ventilation réaliste des locaux, volume d'air à purifier...). De plus, les caractéristiques d'ambiance des milieux intérieurs (mouvement d'air, température, hygrométrie, lumière....) ne sont pas favorables à l'accumulation des polluants par la plante. Bien souvent, le mode d'entretien des végétaux par leurs propriétaires (excès d'eau ou sécheresse) ne favorise pas leur fonctionnement optimal.

Si quelques rares travaux tendent à indiquer qu'à l'échelle de l'habitation la présence de végétaux peut effectivement entraîner une diminution des concentrations en COV, les résultats montrent le plus souvent des rendements d'épuration très faibles [90] [94] [96] [47]. Ces rendements ne permettent pas d'avoir une élimination significative des polluants au regard des niveaux de pollution rencontrés lorsque les plantes sont utilisées seules. Ainsi, l'utilisation directe d'une plante en pot pour épurer l'air ambiant dans les espaces intérieurs n'apparaît pas efficace à l'échelle des bâtiments.

Il apparaît ainsi clairement, au vue des études réalisées à ce jour dans le domaine, que les données publiées ne peuvent pas servir à faire une extrapolation des résultats pour toutes espèces de plantes ou pour tous les usages et typologie de pièces.

Seuls les dispositifs « actifs » basés sur le passage forcé de l'air pollué à travers le substrat des plantes semblent plus prometteurs. Toutefois, ces installations peuvent posséder parallèlement de nombreux inconvénients qui nécessitent d'être évalués: consommation énergétique, contraintes de maintenance et d'entretien, formation éventuelle de polluants secondaires. De plus, leur complexité les éloigne des aspirations et des attentes du grand public, à savoir la simplicité d'une plante en pot.

Enfin, certaines études mettent tout de même en avant des arguments favorables à la présence de plantes dans les espaces clos. En effet, elles contribuent à développer un environnement agréable à vivre, à diminuer le stress, à augmenter la productivité et la créativité par une meilleure concentration tout en diminuant l'absentéisme sur les lieux de travail. On peut rajouter que les plantes contribuent à la stabilisation du niveau relatif d'humidité d'une pièce. Or un taux d'humidité suffisant est nécessaire afin de permettre un certain confort notamment sur le plan respiratoire. Egalement, les plantes permettraient de réduire certains symptômes (rhinites allergiques, toux, sécheresse de la peau, etc..) observés dans les lieux de travail et d'habitation.

3) Des connaissances à approfondir [29]

A l'heure actuelle, de larges pans de connaissances restent encore inexplorés.

On peut rappeler la quasi inexistence d'études expérimentales menées sur les plantes mises en présence de mélange de polluants, situation rencontrée en conditions réelles. Cela permettrait de comprendre comment la présence d'un polluant peut modifier l'efficacité dépolluante d'une plante vis-à-vis d'une autre molécule, par rapport à l'efficacité mesurée quand cette molécule est seule. Les travaux pourraient montrer l'existence d'interactions entre les contaminants qui ont pour conséquences de faire varier l'efficacité dépolluante de la plante. Par ailleurs, le rôle précis du substrat et des microorganismes de la rhizosphère reste encore à déterminer et à expliquer pour optimiser les dispositifs à venir.

En ce qui concerne les systèmes de biofiltration, des tests reproduisant les conditions effectivement rencontrées dans les bâtiments sont également à effectuer afin de confirmer leur rendement.

Le manque criant de données sur les effets des polluants sur les végétaux après un certain temps d'exposition peut masquer d'éventuels phénomènes de saturation qui influent directement sur le potentiel épurateur du végétal. En effet, si les plantes présentent des perturbations, il convient de savoir si celles-ci sont transitoires ou au contraire réversibles, ce qui pourrait conduire à la mort de la plante ou tout au moins à une diminution importante de ses capacités épuratrices.

La question du bienfait des plantes d'intérieur sur la santé est également à prendre en compte. De nouvelles recherches accentueraient le travail en

collaboration avec des médecins et des psychologues pour juger correctement le bienfait des plantes (mesure de la tension artérielle, des émotions, de la productivité par tests de rapidité préétablis...) ou encore pour mieux définir les protocoles de mesure (nombre de plantes utilisées, type de plantes, emplacement au sol ou sur un meuble, temps d'exposition, etc.).

II - Perspectives de développement

1) Les plantes génétiquement modifiées

Comme nous l'avons montré, les systèmes sol/plantes ont les capacités de réduire les concentrations de certains polluants de l'air intérieur mais leur efficacité est limitée par de nombreux facteurs. L'essor des biotechnologies et de la biologie moléculaire offre des possibilités très intéressantes dans le domaine de la phytoremédiation en rendant les plantes plus efficaces.

Le développement de plantes transgéniques est déjà largement utilisé dans les domaines agricoles et industriels pour l'épuration des sols et des eaux. Par exemple, le TNT est phytotoxique et ne peut donc pas efficacement être éliminé normalement par phytoremédiation, mais l'utilisation de plantes génétiquement modifiées a permis d'améliorer considérablement la tolérance et l'absorption de ce contaminant. De la même manière, des plantes transgéniques sont utilisées avec succès pour améliorer la phytoremédiation des métaux. Les scientifiques se sont focalisés sur la sélection de meilleures plantes phytoextractives pour accumuler des métaux du sol, certaines concentrant des métaux lourds toxiques (plomb, cuivre, nickel) à des taux bien supérieurs aux concentrations du sol [122].

Ainsi, il peut être envisageable que des plantes «améliorées» se retrouvent dans nos lieux d'habitation et de travail, voire même intégrées à des biofiltres afin d'optimiser l'épuration de l'air.

1. Définition

Le génie génétique permet d'introduire dans une cellule un gène isolé qu'elle ne possède pas. Le fonctionnement de ce gène se traduit habituellement par son expression, c'est à dire par la synthèse de protéines qu'il code. Il est également possible de supprimer ou de modifier l'expression d'un gène déjà présent dans le génome de la cellule hôte.

Par définition, une plante transgénique est donc une plante dont le génome a été modifié d'une façon qui ne peut se produire naturellement, par l'introduction d'un gène pouvant provenir d'une autre plante, d'une bactérie ou de tout autre organisme.

2. Origines des travaux [123]

La transgénése végétale est une méthode qui a été utilisée dans un premier temps par des phytopathologistes qui étudiaient les bactéries du genre *Agrobacterium* notamment *Agrobacterium tumefaciens* responsable de la galle du collet chez de nombreuses espèces végétales. Les signaux chimiques relâchés par une blessure sur la plante et la capacité de la bactérie d'adhérer aux cellules végétales sont les facteurs déclenchant le processus d'infection. La contamination de la plante par la bactérie provoque des tumeurs ou proliférations cellulaires (figure 61). Les tumeurs synthétisent des substances particulières, les opines, qui sont des substances de croissance spécifique pour les souches bactériennes incitatrices.



Figure 61 : Galle du collet [124]

En 1974, il est établi que cette transformation des cellules végétales est l'œuvre de plasmides (mini boucle d'ADN) présents dans les souches virulentes d'*Agrobacterium*. Il a été ensuite démontré que cette transformation cellulaire résulte de l'intégration dans le génome de la cellule végétale d'un fragment d'ADN issu des plasmides. Dès ce moment, une voie s'ouvrait pour obtenir des plantes transgéniques à l'aide de bactéries. Le transfert de gène depuis la bactérie vers le noyau de la cellule végétale était alors possible en supprimant l'effet oncogène de l'ADN transmis et en éliminant son caractère pathogène

Parallèlement, l'existence d'espèces végétales insensibles à cette bactérie (beaucoup de monocotylédones, légumineuses, arbres) a incité à mener d'autres recherches avec la mise au point de techniques faisant intervenir des méthodes physiques, chimiques et des impulsions électriques qui permettent la pénétration de l'ADN directement dans les cellules végétales.

3. Les différentes étapes d'obtention d'une plante transgénique [123] [125]

Plusieurs étapes sont nécessaires afin d'obtenir une plante génétiquement modifiée (figure 64).

Tout d'abord, il faut repérer un caractère intéressant dans un autre organisme (plante, champignon, bactérie...) vivant et identifier la protéine responsable de ce caractère, par exemple une enzyme impliquée dans une voie de métabolisation.

Il est ensuite nécessaire d'identifier et d'isoler le gène codant pour la protéine d'intérêt.

Une « construction génique » qui contient le gène d'intérêt et des séquences d'ADN (promoteur, terminateur) indispensables à son fonctionnement dans le génome de la cellule végétale, est alors réalisée. Ces séquences sont impliquées dans la régulation de l'expression du gène et permettent entre autres de cibler le lieu d'expression du gène dans la plante. Cette construction génique est ensuite insérée dans un plasmide bactérien pour être multipliée.

L'introduction de la construction génique dans le génome de la cellule végétale peut se faire par deux méthodes principales (transfert biologique ou mécanique).

Le transfert biologique, c'est-à-dire indirectement par l'intermédiaire de la bactérie *Agrobacterium tumefaciens*, à partir de fragments de tissus de la plante cocultivés in vitro avec la bactérie ou par infiltration de la bactérie au niveau d'une blessure préalablement réalisée. Cette bactérie possède le plasmide Ti (Tumor inducing) (figure 62) le plus perfectionné et a donc la propriété remarquable de transférer naturellement à la plante une séquence de son ADN (dit ADN-T) pour lui faire produire des substances dont elle a besoin pour son développement.

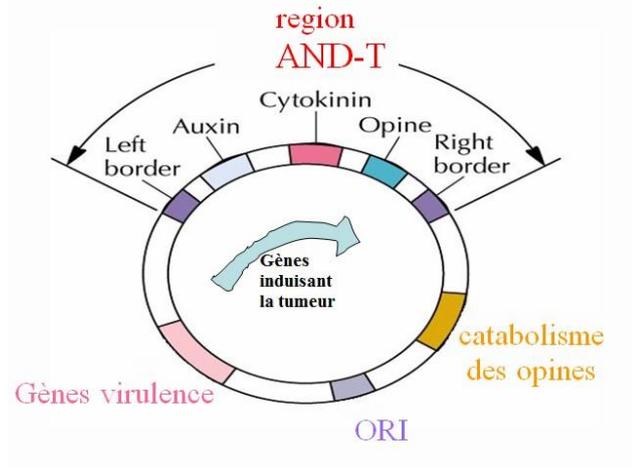


Figure 62 : Plasmide Ti d'Agrobacterium tumefaciens [125]

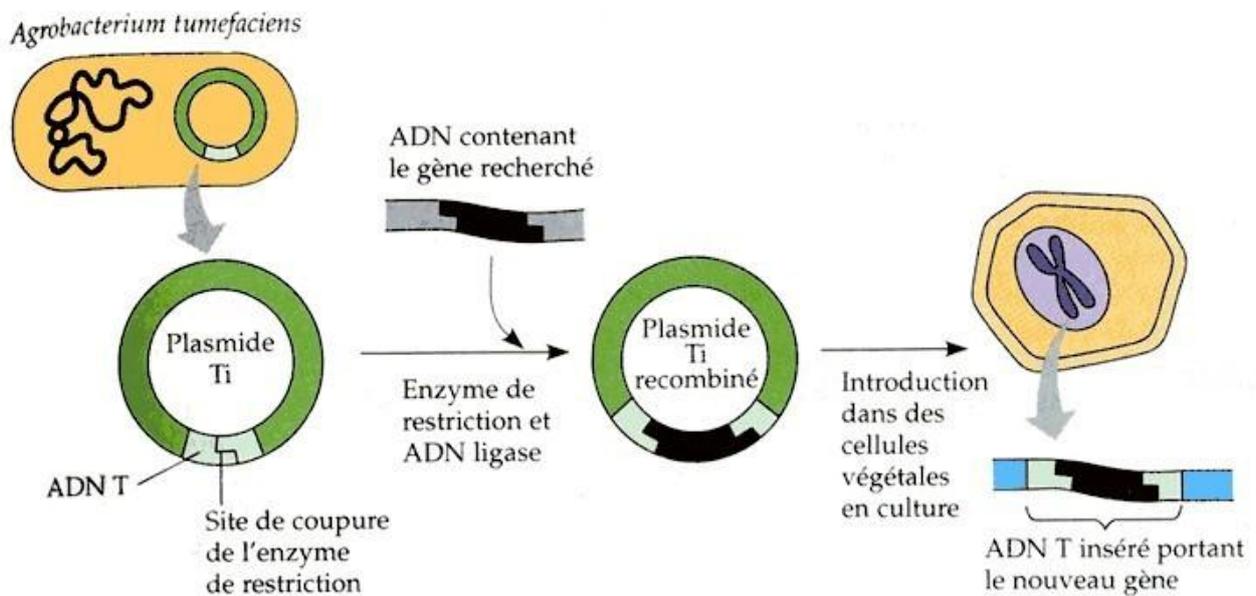


Figure 63 : Réalisation d'une construction génique contenant le gène recherché (plasmide Ti recombiné) et transfert de l'ADN dans le génome de la plante [126]

Le principe est alors de remplacer cet ADN-T par le gène à transférer : la bactérie insère alors ce gène dans le génome de la plante (figure 63).

Le transfert peut aussi se faire directement de façon mécanique par bombardement de particules (ou biolistique), par microinjection (introduction de petites quantités d'un matériel généralement liquide dans un tissu biologique dans une cellule au moyen d'une aiguille fine et microscopique), par fusion de vésicules ou par électroporation (impulsions électriques courtes et contrôlées qui modifient la

membrane des cellules de façon réversible et la rendent perméable à des molécules).

Enfin, les amas de cellules végétales transformées exprimant la gène ajouté sont sélectionnés puis cultivés dans des conditions permettant la régénération d'une plante complète : la plante transgénique a été obtenue.

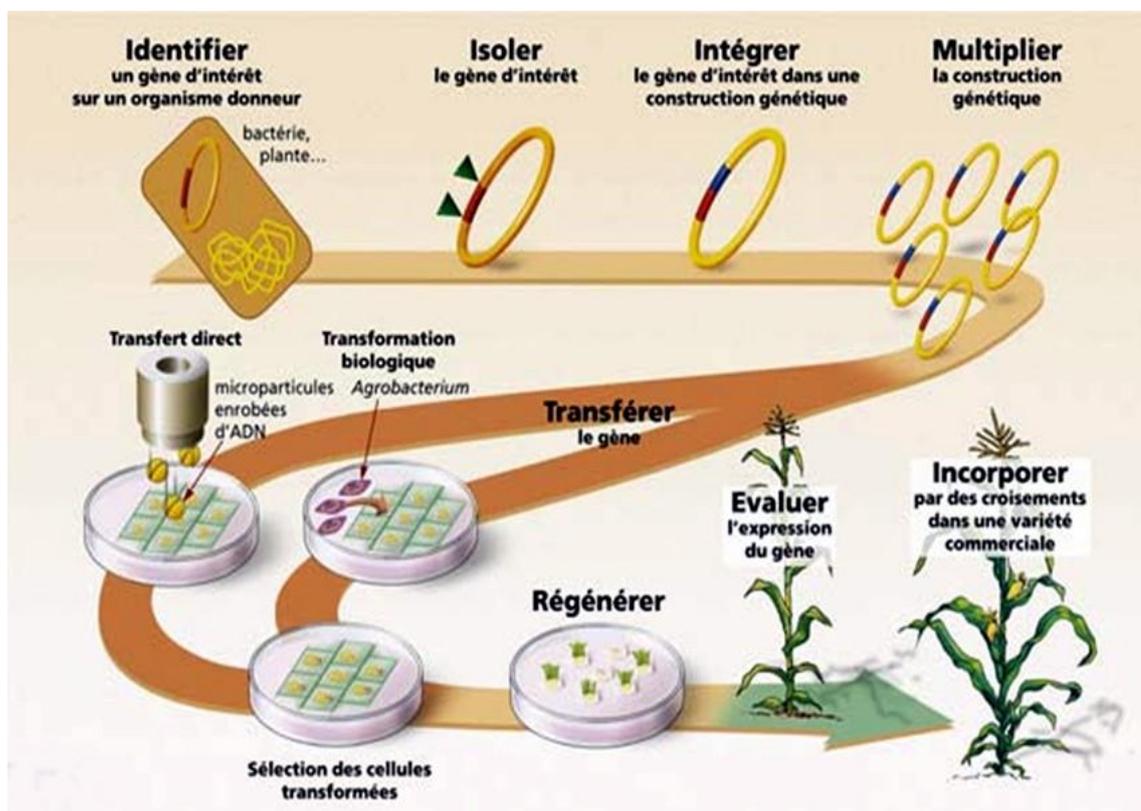


Figure 64 : Les différentes étapes d'obtention d'une plante transgénique [124]

4. Les améliorations possibles

Grâce à ces techniques de génie génétique, il est possible d'améliorer les capacités des végétaux à absorber, tolérer et métaboliser un ou des polluants donnés afin d'optimiser leur capacité d'épuration de l'air.

A. Le développement du système racinaire

Il est d'abord envisageable de modifier certaines caractéristiques physiologiques des plantes. Il serait notamment possible d'obtenir des racines plus développées et plus nombreuses. Cela permettrait d'augmenter la profondeur à laquelle les polluants sont captés et d'améliorer l'efficacité d'extraction [126].

Certaines études ont cherché à exploiter le potentiel d'une bactérie, *Agrobacterium rhizogenes*, qui s'attaque aux racines et provoque des tumeurs qui leur donnent une allure chevelue (le chevelu racinaire ou « hairy root » en anglais) (figure 65) [124]. Cette bactérie est utilisable de la même manière qu'*Agrobacterium tumefaciens*. L'ADN transféré était celui d'*Agrobacterium rhizogenes* porté par le plasmide Ri contenant des gènes qui modifient la physiologie des cellules végétales.



Figure 65 : Chevelu racinaire [124]

B. L'augmentation de la quantité d'enzyme de dégradation dans la plante et la rhizosphère

Il peut être aussi envisageable d'augmenter la quantité et l'activité d'enzymes impliquées dans différentes voies de métabolisation des xénobiotiques (peroxydases, laccases, oxygénases, déhalogénases, nitroréductases, nitrilases...) y compris celles excrétées par les racines dans le sol environnant. De nombreuses enzymes de détoxification des xénobiotiques ainsi que les gènes correspondant ont été et continuent d'être isolés [127].

Dans une étude publiée en 2003, une équipe de chercheurs a créé une plante, *Arabidopsis thaliana*, génétiquement modifiée dans laquelle le gène codant pour la formaldéhyde deshydrogénase glutathion dépendante (enzyme impliquée dans le métabolisme du formaldéhyde) est surexprimé [128]. Les plants transgéniques obtenus ont poussé dans un milieu liquide soumis à un traitement au formaldéhyde à des concentrations initiales de 2 mM ou 5 mM. Les résultats de leurs travaux ont effectivement montré que la capacité à métaboliser le formaldéhyde était nettement augmentée avec *Arabidopsis* transgénique en comparaison de la lignée sauvage intacte exprimant le gène de la FALDH de manière très faible. Le taux de

détoxification était augmenté de 25% comparativement à la lignée sauvage au bout de 24h et 48h d'expérience (figure 66). La plante transgénique soumise à une concentration en formaldéhyde de 2 mM en solution pouvait totalement l'éliminer en moins de 48 heures (figure 67).

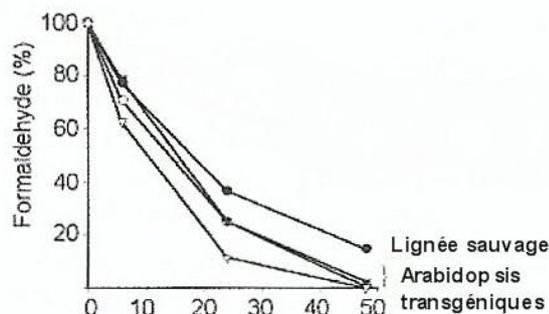


Figure 66 : Cinétique d'élimination du FA par Arabidopsis sauvage et les lignées transgéniques soumises à une concentration de 5 mM [128]

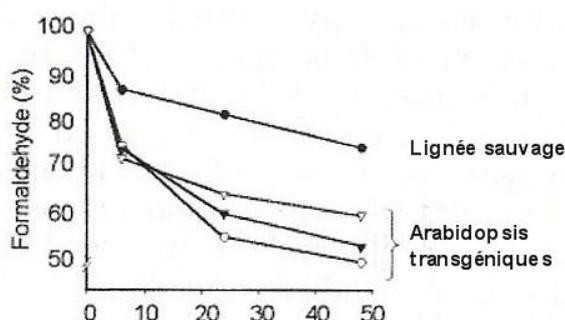


Figure 67 : Cinétique d'élimination du FA par Arabidopsis sauvage et les lignées transgéniques soumises à une concentration de 2 mM [128]

D'autres études portant sur la détoxification du NO_2 par les végétaux ont abouti à la mise au point de plantes génétiquement modifiées dans lesquelles les gènes codant pour certaines enzymes du métabolisme azoté, notamment la nitrite réductase, sont surexprimés [129]. Les résultats ont montré une corrélation positive entre l'expression du gène de la nitrite réductase et l'assimilation du NO_2 par la plante. Ces travaux se sont révélés prometteurs pour la future production de plantes transgéniques « NO_2 -philes ».

Egalement, l'introduction dans la plante de gènes étrangers isolés codant pour des enzymes de biodegradation n'existant pas à l'état sauvage permettrait d'améliorer le potentiel dépolluant de la plante.

Grâce à cette technique, on a pu introduire dans des plantes de tabac des gènes d'origine bactérienne (*Mycobacterium gastri* MB19) codant pour des enzymes indispensables à la dégradation du formaldéhyde [130]. Cette étude a permis de mesurer la capacité d'élimination de 4 plantes sauvages et 4 plantes transgéniques exposées à des concentrations de 8, 15 et 20 ppm de formaldéhyde. Les résultats ont démontré que la capacité d'élimination du formaldéhyde de la plante transgénique était supérieure de 20% par rapport à la plante sauvage (figure 68). Cependant, elle n'a révélé aucune différence significative d'élimination entre la lignée sauvage et les plantes de tabac transgéniques dans l'élimination du toluène, du xylène et du styrène.

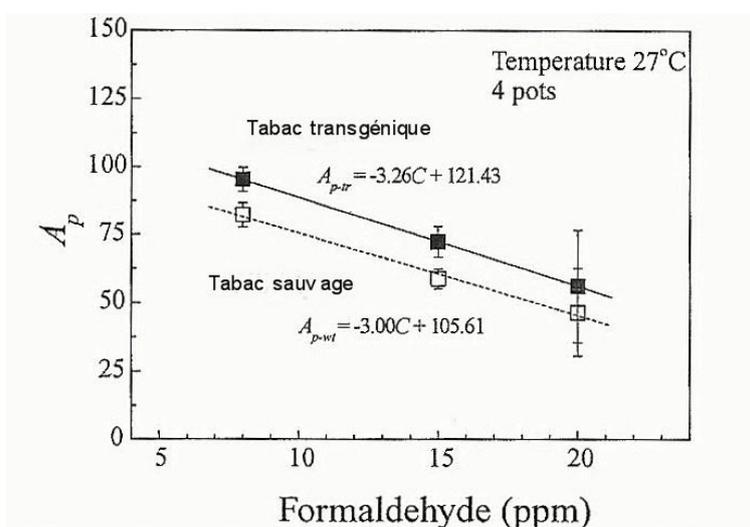


Figure 68 : Capacité d'élimination de la lignée sauvage et transgénique des plantes de tabac en fonction de la concentration en formaldéhyde [130] (A_p = dérivé de la capacité d'élimination du formaldéhyde)

Il a aussi été démontré qu'une plante de tabac exprimant le CYP 450 2E1 humain était capable de transformer une quantité de trichloréthylène 640 fois plus importante que la plante contrôle [73]. De la même manière, des arbres transgéniques (*Populus tremula* et *Populus alba*) exposés à des polluants tels que le trichloréthylène, le chloroforme ou le benzène ont démontré un taux d'élimination de ces gaz supérieur par rapport aux peupliers sauvages [122]. On a pu créer des *Arabidopsis thaliana* capables de transformer des formes organiques de mercure très toxiques en mercure élémentaire moins dangereux [131].

De plus, certaines recherches concernant les métaux, s'orientent vers la possibilité de fournir à la plante un gène codant pour des protéines ou des peptides

de liaison ainsi que de transport de xénobiotiques afin d'optimiser les capacités d'accumulation [132].

C. L'optimisation de la microflore du sol

Les micro-organismes du sol sont encore peu connus et il est vraisemblable qu'il existe un fort potentiel de développement d'optimisation de cette microflore afin d'obtenir les meilleurs rendements [47]. Les bactéries agissant en synergie avec les plantes pourraient accroître le potentiel d'élimination des polluants des systèmes d'épuration.

L'introduction de gènes étrangers dans la plante afin d'augmenter et de modifier les exsudats racinaires rejetés par celle-ci [126] offrirait une solution. Rappelons que ces exsudats peuvent favoriser le développement des populations microbiennes de la rhizosphère et activer leurs capacités spécifiques de biodégradation.

Des études sont en cours sur le développement de bactéries génétiquement modifiées. En effet, la meilleure connaissance de leurs mécanismes moléculaires de résistance pourrait permettre la production, à terme, de bactéries transgéniques optimisées. Ces bactéries toxico-résistantes joueraient alors un rôle efficace dans la dépollution des sols et des eaux.

A l'heure actuelle, il faut admettre que très peu d'études portent sur la manipulation génétique de plantes d'appartement en vue d'améliorer leur capacité à dépolluer l'air.

Cependant, les découvertes scientifiques récentes et le développement des nouvelles technologies devraient permettre aux chercheurs d'acquérir de nouvelles connaissances. Ainsi, les plantes génétiquement modifiées présenteraient un fort potentiel pour des applications pratiques. Toutefois, le manque de recul sur l'utilisation des OGM, qui soulève des questions et des débats quant aux risques pour la santé humaine et pour l'environnement, impose des verrous législatifs à utiliser ces végétaux directement dans l'environnement.

2) La biosurveillance végétale de l'air intérieur

Une autre voie de développement, complémentaire des approches épuratrices, serait d'utiliser les végétaux non pas comme accumulateurs de polluants mais comme indicateurs de la pollution dans le cadre de la biosurveillance de la qualité de l'air dans les locaux.

Il faut remarquer que les biotechnologies précédemment décrites, visant à améliorer les capacités des végétaux, pourraient être envisagées en vue d'optimiser les biomarqueurs de la plante.

1. Définition

La biosurveillance de la qualité de l'air s'est développée en France à partir des années 1970. Elle se définit comme l'utilisation des réponses, à tous les niveaux d'organisation biologique (moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique, tissulaire, morphologique, écologique), d'un organisme ou d'un ensemble d'organismes pour prévoir et/ou révéler une altération de l'environnement et pour en suivre l'évolution [133].

En fonction des niveaux de réaction des organismes, trois concepts de biosurveillance ont été distingués : la biointégration (modifications de la présence et de l'abondance des espèces), la bioindication (altérations macroscopiques individuelles morphologiques ou tissulaires), et la recherche de biomarqueurs (réactions précoces infra individuelles invisibles comme les altérations cellulaires ou moléculaires) (figure 69). En parallèle, vient s'ajouter la bioaccumulation, c'est-à-dire la capacité de certains organismes à accumuler les polluants présents dans l'air.

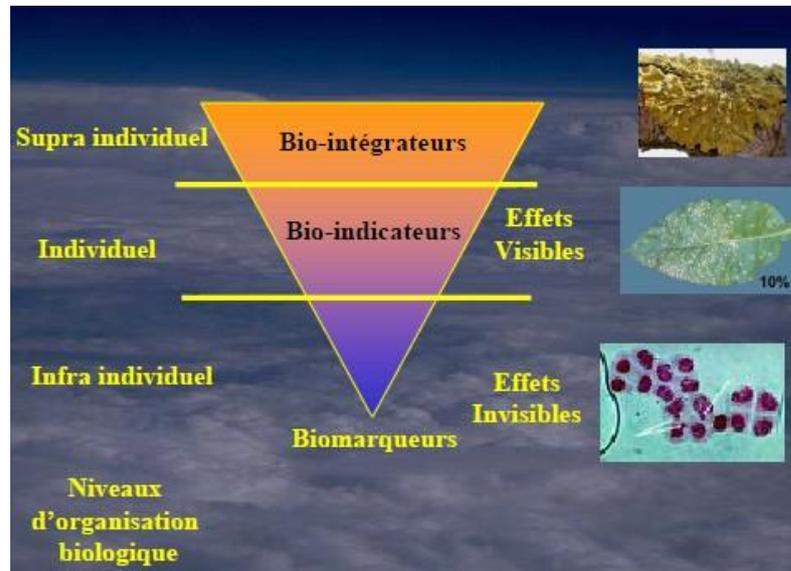


Figure 69 : Les concepts de biosurveillance en fonction des niveaux de réaction des organismes [134]

Comme nous l'avons souligné dans la première partie, plusieurs polluants intérieurs sont considérés ou suspectés comme cancérigènes. En dehors de marqueurs objectivement évalués chez les occupants des locaux concernés, nous manquons actuellement de moyen d'évaluation du caractère toxique des polluants.

Or, nous savons à présent que les polluants exercent différents effets sur les végétaux (figure 34). Ils peuvent, par exemple, engendrer des atteintes macroscopiques et/ou infra cliniques qui témoignent de perturbations physiologiques ou cellulaires. Différents travaux ont permis une étude approfondie de ces perturbations par le biais de biomarqueurs cellulaires. Ceux-ci ont l'avantage de mettre en évidence des effets alors qu'aucun symptôme n'est encore observable macroscopiquement. Il s'agit notamment des indicateurs de la génération d'un stress oxydant ou de génotoxicité [131].

2. Les biomarqueurs

La biosurveillance n'a jusqu'à présent connu que quelques applications essentiellement dans le domaine de la génotoxicité [131] pour lequel deux principales techniques ont été développées.

La première est le test des micronoyaux, couramment utilisé pour évaluer la génotoxicité des polluants dans l'environnement. Ce test est particulièrement adapté

à la détection des effets clastogènes (cassures de l'ADN) et aneugènes (perturbation du fonctionnement de la division cellulaire) induits par la pollution de l'air. Mis au point par Ma en 1978, cette technique s'appuie sur une exposition de 24 à 36 heures des inflorescences de *Tradescancia* clone 4430 de *hirsutiflora x subacaulis* (figure 70) et consiste à mesurer la fréquence des micronoyaux formés dans les cellules mères de pollen. En effet, certaines substances peuvent induire la formation de petites masses de chromatines dans le cytoplasme qui ressemblent à de petits noyaux (figure 71), que l'on appelle des micronoyaux [133].



Figure 70 : Inflorescence de *Tradescancia* clone #4430 [134]

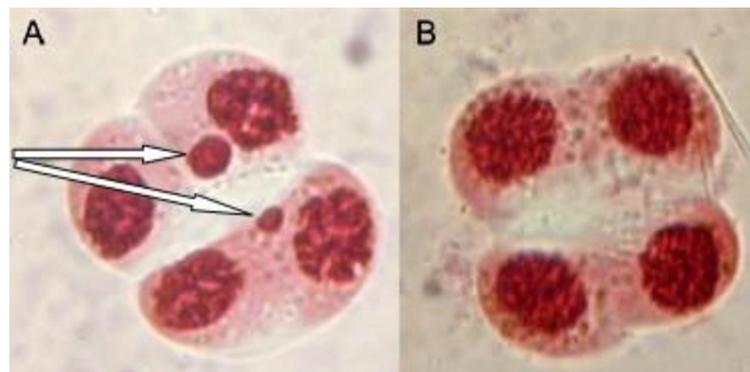


Figure 71 : Observation au microscope du début de la division cellulaire d'une cellule de pollen avec (A) et sans micronoyaux (B) [134]

Schématiquement, la formation de ces micronoyaux peut se faire de deux façons (figure 72). Dans les deux cas, après division cellulaire, un fragment de chromatine reste dans le cytoplasme de l'une des cellules filles.

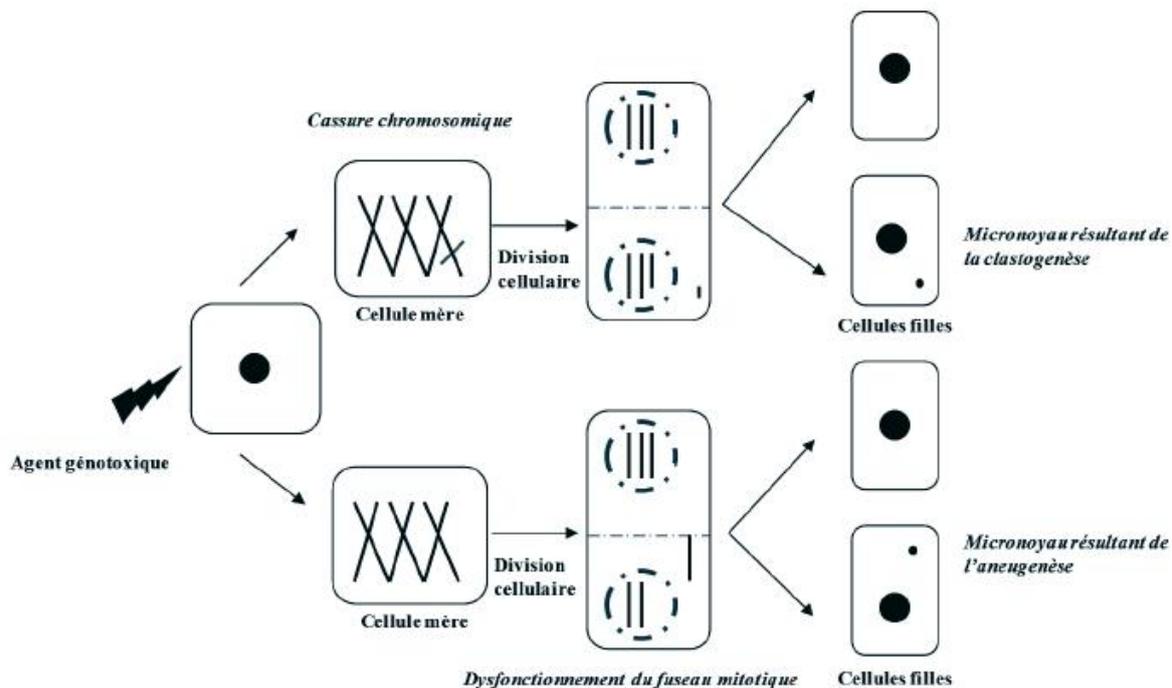


Figure 72 : Schématisation de la formation des micronoyaux [133]

Ce test a été utilisé dans de nombreuses études afin de détecter les effets génotoxiques des polluants atmosphériques sur le matériel chromosomique. En laboratoires, la clastogénicité de différents composés chimiques tels que les carburants mixtes diesels/soja, l'éthylbenzène, le formaldéhyde, le toluène ou encore l'ozone et le dioxyde de soufre a été testée. Il a également été réalisé *in situ*, dans le cadre de l'évaluation de différents types de sources industrielles, telles que des incinérateurs et décharges, des usines de caoutchouc et chimiques, mais aussi des sources liées au trafic automobile en milieu urbain [133]. Klump et *al.* ont utilisé ce test dans une dizaine de villes européennes et ont mis en évidence une génotoxicité potentielle de l'atmosphère notamment sur les sites caractérisés par un trafic routier dense [131]. Sur le littoral Dunkerquois, il a permis de mettre en évidence les propriétés génotoxiques du cocktail de polluants de l'air issu des sources industrielles et urbaines auxquelles la population est exposée [133].

La seconde méthode est le test des comètes qui mesure le niveau de fragmentation de l'ADN de cellules individualisées [131]. Cette technique se base sur

la migration différentielle des fragments d'ADN en fonction de leur taille sous l'effet d'un champ électrophorétique. C'est ainsi que l'on observe, *in fine*, des figures en forme de comètes, dont la queue est constituée d'une traînée de fragments d'ADN cassés, plus courts, qui ont migré le plus loin, et la tête par les fragments d'ADN les plus intacts (c'est le reste du noyau), qui migrent peu [47] (figure 73).

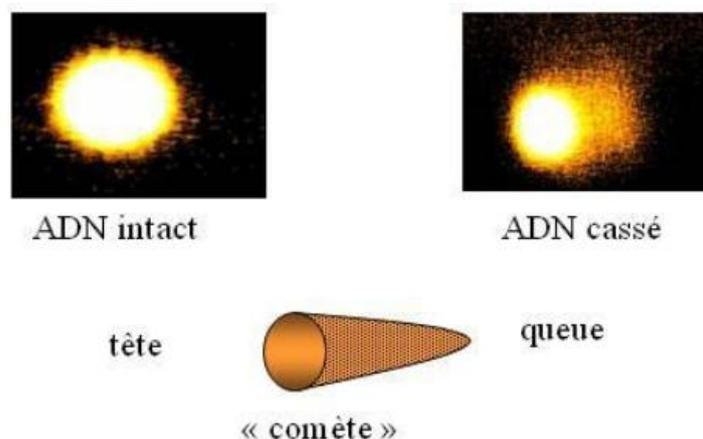


Figure 73 : Observation au microscope à fluorescence de figures d'ADN en forme de comètes [47]

3. Les applications

Dans le domaine de la qualité de l'air à l'intérieur des locaux, très peu de travaux ont concerné les effets des polluants.

Il existe cependant des utilisations du test des micronoyaux dans des locaux, par exemple dans un pressing, un laboratoire rénové (étude des effets des émissions de nouvelles peintures) et des bureaux fréquentés ou occupés par des fumeurs. Dans les trois derniers cas, les résultats se sont révélés positifs [131].

Le programme PHYTAIR a également évalué l'exposition de végétaux dans des environnements réels à l'aide du test des comètes. Une application concrète a été réalisée en exposant des plants de *Scindapsus aureus* dans 10 écoles du Nord-Pas de Calais et dans des bureaux. Les résultats ont démontré que les effets génotoxiques sur les plantes exposées dans ces locaux sont variables d'un site à l'autre, mais que les différences entre les témoins et les plantes exposées sont toujours significatives [47] (figures 74 et 75). Ces travaux ont donc permis de mettre

en évidence les propriétés génotoxiques sur les plantes du cocktail de polluants, en particulier le benzène, présents dans l'air à l'intérieur des bâtiments.

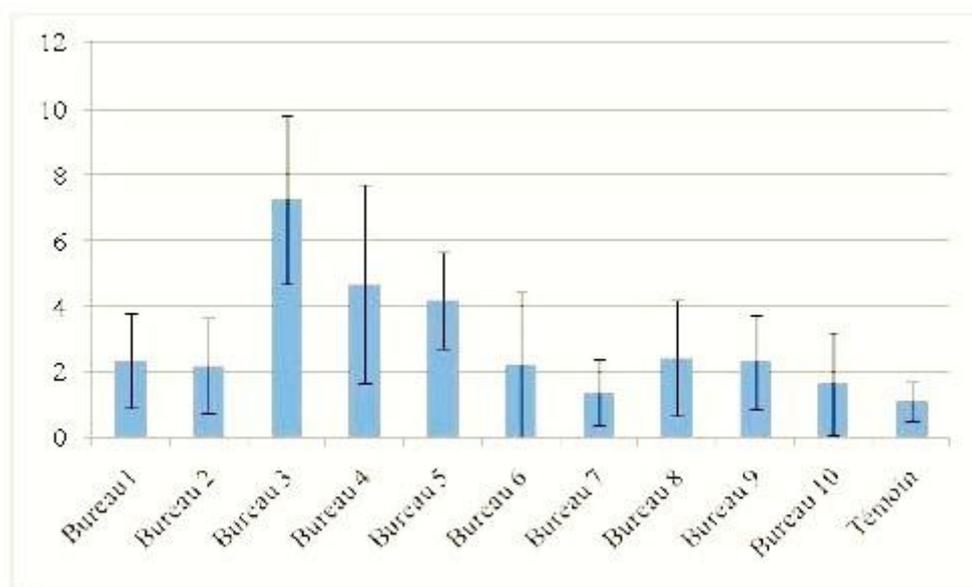


Figure 74 : Variations des OTM (dégâts de l'ADN) chez les plantes exposées dans les 10 bureaux [46]. Plus l'OTM est élevé, plus l'ADN est endommagé

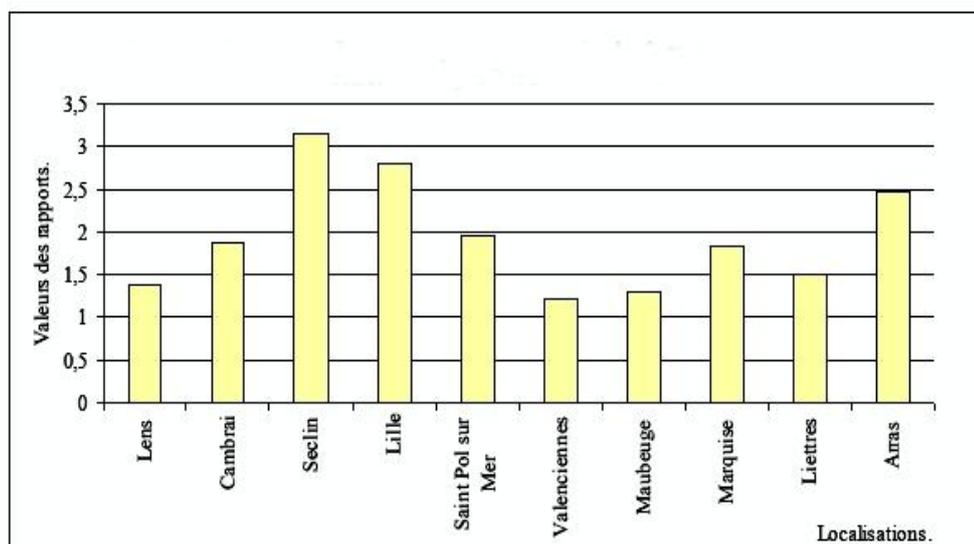


Figure 75 : Variations des OTM (exposés/témoins) observés chez les plants de *S.aureus* exposés dans 10 écoles du Nord - Pas de Calais [47]. Plus l'OTM est élevé, plus l'ADN est endommagé.

Ces recherches confirment alors la faisabilité de ce type de travaux et donc que la biosurveillance végétale peut tout aussi bien être utilisée à l'intérieur des locaux qu'à l'extérieur.

Etant donné l'invisibilité de certaines pollutions, l'utilisation de plantes comme bio-indicateur se révèle intéressante pour estimer un impact de pollution ou sensibiliser la population. Ainsi, l'application directe de la biosurveillance végétale permettra d'indiquer qu'il est nécessaire de maîtriser les sources de polluants et d'optimiser l'utilisation, l'aménagement de locaux aussi divers que des logements, des salles de classe ou encore des bureaux afin améliorer la qualité de l'air. [47]

A ce titre, le projet de loi portant engagement national pour l'environnement dit Grenelle 2 prévoit, d'ici 2013, la surveillance périodique de la qualité de l'air dans certains établissements recevant du public [54].

Conclusion

L'utilisation des plantes pour épurer l'air intérieur connaît actuellement un intérêt croissant. A la faveur d'une perception accrue des risques potentiels présents dans l'habitat et d'une sensibilisation écologique plus forte, le rôle des plantes en pot pour lutter contre la pollution de l'air intérieur s'ouvre vers de nouvelles perspectives.

Les travaux menés en laboratoire, en enceinte expérimentale, ont effectivement démontré les capacités intrinsèques de certaines plantes en pot à absorber via leurs feuilles et racines des polluants puis à les éliminer par des processus métaboliques au sein de leurs cellules. Ces études ont notamment mis en évidence le rôle essentiel des microorganismes du sol, dont la présence est largement entretenue par les plantes elles-mêmes, dans la dépollution de l'air intérieur.

Néanmoins les rendements d'épuration observés lors de l'utilisation de ces plantes dans des espaces réels sont faibles et ne permettent pas une épuration efficace des volumes d'air des bâtiments.

Par conséquent, l'ADEME considère que l'argument «plante dépolluante» n'est pas validé scientifiquement au regard des niveaux de pollution généralement rencontrés dans les habitations et des connaissances actuelles dans le domaine. Dès lors, les messages concernant des plantes qui promettent d'améliorer la qualité de l'air intérieur du logement ne sont pas fondés. La délivrance d'un label «capacité d'épuration de l'air» pour une plante demeure encore largement prématurée.

Ainsi, les recherches se poursuivent afin d'approfondir les connaissances, entre autres, sur la quantification du rôle du sol et les interactions plantes/microorganismes, les effets des polluants sur les végétaux ou encore l'émission de polluants par les plantes.

Enfin, les avancées technologiques permettront peut-être à terme d'améliorer les capacités d'épuration des plantes à travers le biofiltre végétal ou encore les plantes génétiquement modifiées.

La biosurveillance végétale, c'est à dire l'utilisation des effets des polluants observés sur les plantes pour évaluer la toxicité de l'air, est un outil prometteur à développer. Elle pourrait constituer un indicateur de qualité de l'air intérieur en complément de l'utilisation des éventuelles propriétés épuratrices.

En résumé, à ce jour, pour combattre la pollution de l'air intérieur, la priorité reste la prévention et la limitation des sources de pollution (entretenir les chauffe eaux et chaudières, réduire l'utilisation de produits chimiques ménagers,...) accompagnées d'une aération et d'une ventilation des locaux. Il n'en reste pas moins vrai que les plantes apportent une amélioration du cadre de vie au sens large, qu'il convient de ne pas négliger, car c'est une dimension intégrée au sein de la définition de la santé selon l'OMS.

Annexes

Annexe 1

	BENZENE	FORMALDEHYDE	TOLUENE	TRICHLORO ETHYLENE	XYLENE
Masse molaire (g/mol)	78,11	30,03	92,14	131,39	106,16
Point d'ébullition (°C à pression normale)	80,1	-19,3	110,6	86,7	o=144,4 m=139,1 p=138,3
Pression de vapeur (Pa)	10 032 à 20°C 12875 à 25°C	4,4.10 ⁵ à 20°C 5,2.10 ⁵ à 25°C	2922 à 20°C 3769 à 25°C	8600 à 20°C 9080 à 25°C	o=663 à 20°C o= 880 à 25°C m=790 à 20°C m=1100 à 25° p= 863 à 20°C p=1172 à 25°C
Densité de vapeur	2,7	1,036	3,2	4,5	3,66
Solubilité dans l'eau (mg/L) à 20°C	1830	5,5.10 ⁵ (très soluble)	515	1070	o= 175 à 20°C o= 178 à 25°C m= 151 à 25°C p= 177 à 25°C
Log Kow	2,13	0,35	2,69	2,38	o= 3,1 m= 3,21 p=758

Annexe 2

Capacités des plantes à absorber les polluants de l'air intérieur

Sources : Wolverton / NASA et Phytair

	Benzène*	Trichloréthylène*	Xylène*	Formaldéhyde*	Ammoniac*	Toluène*	Monoxyde de carbone*	Pouvoir dépolluant**
<i>Aglaonema commutatum</i> 'Silver Queen' Aglaonema	*			**				**
<i>Anthurium andreanum</i> Anthurium			**	*	***			***
<i>Araucaria heterophylla</i> Pin de Norfolk				*				*
<i>Begonia x hemialis</i> Bégonia				*				*
<i>Chamaedorea elegans</i> Palmier nain			**	***	**			***
<i>Chamaedorea seifrizii</i> Palmier bambou	**	**	*	***				***
<i>Chlorophytum comosum</i> 'Vittatum' Plante araignée	***		**	**		***	***	***
<i>Chrysalidocarpus lutescens</i> Aréca			***	**				***
<i>Chrysanthemum x morifolium</i> Chrysanthème	***			***	**			***
<i>Cissus rhombifolia</i> Vigne d'appartement				*				*
<i>Codiaeum variegatum</i> Croton				*				*
<i>Cyclamen persicum</i> Cyclamen de Perse			*	*				*
<i>Dracaena deremensis</i> 'Janet Craig' Dracaena 'Janet Craig'	*	**	*	***				***
<i>Dracaena deremensis</i> 'Wameckii' Dracaena 'Wameckii'	**	*	**	**				**
<i>Dracaena fragrans</i> 'Massangeana' Dracaena fragrant		*	**	**				**
<i>Dracaena marginata</i> Dracaena marginé	**	***	***	**		***	***	***

* : Le nombre d'étoiles indique la capacité plus ou moins élevée de la plante à absorber tel ou tel polluant.

** : Le nombre d'étoiles indique le pouvoir dépolluant global de la plante.

	Benzène*	Trichloré- thylène*	Xylène*	Formal- déhyde*	Ammoniac*	Toluène*	Monoxyde de carbone*	Pouvoir dépolluant**
<i>Euphorbia pulcherrima</i> Poinsettia				*				*
<i>Ficus alii</i> Figuier à feuilles de sabre	*	*	*	**		*		**
<i>Ficus benjamina</i> Figuier pleureur			**	**	*			**
<i>Ficus elastica 'Decora'</i> Ficus elastica				**				**
<i>Gerbera jamesonii</i> Gerbera	****	****		****		*		****
<i>Hedera helix</i> Lierre	*	*	*	****		*		****
<i>Howea forsteriana</i> Kentia	*							*
<i>Maranta leuconeura</i> Maranta				*				*
<i>Nephrolepis exaltata</i> 'Bostoniensis' Fougère de Boston			****	****				****
<i>Phalaenopsis</i> Phalaenopsis				*				*
<i>Philodendron erubescens</i> 'Red Emerald' Philodendron rouge		*		****				****
<i>Philodendron scandens</i> Philodendron grimpant				*				*
<i>Philodendron selloum</i> Philodendron arborescent				*				*
<i>Phoenix roebelinii</i> Phoenix roebelinii			****	****				****
<i>Rhapis excelsa</i> Rhapis			*	**	****			****
<i>Rhododendron indicum</i> Azalée de l'Inde			**	**	**			**
<i>Sanseveria trifasciata</i> Sansevière	*	*	*	*		*		*
<i>Schefflera actinophylla</i> Arbre pluie	*		**					**
<i>Scindapsus aureus</i> Pothos	****			*		****	****	****
<i>Spathiphyllum</i> Spathiphyllum	**	****	**	**	**			****
<i>Syngonium podophyllum</i> Syngonium			**	*				**

Bibliographie

1. **Legifrance**, Loi n°96-1236 du 30/06/1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie article L220-2 extraite du code de l'environnement. [En ligne] [Consulté 06/2011]. Disponible sur : <http://www.legifrance.gouv.fr>
2. **CSTB**, 2000, Quels polluants respirons-nous sur nos lieux de vie?, 10p.
3. **Atmo Nord pas de Calais**, 2006, L'air vu de l'intérieur du professionnel au particulier, tous concernés ». [En ligne] [Consulté le 07/2011] Disponible sur : http://www.atmo-npdc.fr/admin/mediatheque/RESUME_Internet.pdf
4. **ADEME**, 2009, « Informez-vous et agissez pour respirer un air de qualité », guide pratique, 32p.
5. **OMS**, 2005, La pollution de l'air à l'intérieur des habitations et la santé. [En ligne] [Consulté 11/2010] Disponible sur : <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/fr/index.html>
6. **INVS**, 2005, Intoxication au monoxyde de carbone. Dossier thématique [En ligne] [Consulté 11/2010] Disponible sur : http://www.invs.sante.fr/surveillance/co/am_co.htm
7. **INRS**, 2004, L'amiante et les métiers du second œuvre du bâtiment : prendre conscience du risque pour mieux se protéger, dossier de presse, 15p.
8. **Pierre P., Roland M.**, 2009, Air intérieur, air extérieur et santé, rapport d'études, 59p.
9. **Dujardin G., Benard A.**, 2007, Présentation du réseau asthme et allergie de Roubaix, *Air Pur*, 71, 41-46.
10. **Tsicopoulos A., Chang Y., Wallaert B.**, 2007, Effets de la pollution environnementale sur le développement des maladies allergiques : mécanismes immunologiques impliqués, *Air Pur*, 71, 5-9.
11. **Agence régionale de l'environnement de Haute-Normandie**, 2005, Connaître pour agir – Pollution intérieure : les gestes « santé », Guide pratique, 4p.
12. **OQAI**, 2004, Campagne pilote dans 90 logements et 9 écoles, rapport d'études, 43p.
13. **OQAI**, 2007, Campagne nationale logement : état de la qualité de l'air dans les logements français, rapport d'études, 183p.
14. **S. Kirchner, et al.**, 2007, Etat de la qualité de l'air dans les logements français, *Environnement, Risque & Santé*, 4(6), 259-269.

15. **OQAI**, 2011, Pollution intérieure - Sources, polluants et conséquences, bons gestes, normes et valeurs guides. [En ligne] [Consulté 07/2011] Disponible sur :
]
16. **Desmettres P.**, 2007, Le programme Habit'air Nord-Pas de Calais : un outil régional pour une meilleure prise en compte de l'exposition individuelle aux polluants intérieurs, *Air Pur*, 69, 29-32.
17. **Programme Habit'air Nord-Pas de Calais**, 2006, Connaissance de la qualité de l'air intérieur en région Nord-Pas de Calais, rapport d'études, CDHR 62, 118p.
18. **Desmettres P.**, 2007, Connaissance de l'exposition chronique au monoxyde de carbone dans le cadre du programme Habit'air Nord - Pas de Calais, *Air Pur*, 70, 27-30.
19. **Brosselin P.**, Environnement et milieu: Environnement domestique, fiche santé environnement, AFSSET, 6p.
20. **Bonte D., Devienne M., Lejeune F.**, 2007, Tabagisme passif et maladies respiratoires, *Air pur*, 71, 25-28.
21. **APPA**, 2001, Pollution intérieure et santé, Actes de la conférence – débat du 22 juin 2000, 21p.
22. **Fédération Française de Cardiologie**, 2012, Parcours du cœur : prévention 0 Cigarette. [En ligne] [Consulté 05/2012] Disponible sur :
<http://www.fedecardio.com/parcoursducoeur-scolaire/prevention/0-cigarette>
23. **ANAH**, 2010, Les composés organiques volatils. [En ligne] [Consulté 03/2012] Disponible sur : www.anah.fr
24. **Cuny D.**, 2012, Les impacts sanitaires de la pollution à l'intérieur des locaux, Université Lille Nord de France, Faculté de Pharmacie, 63p.
25. **OQAI**, La pollution intérieure : la connaître, la reconnaître, l'éviter, dossier thématique, 16p.
26. **Deblock E., Denis R., Gaufreteau P., Lasne D.**, 2010, Etat des lieux sur la qualité de l'air intérieur et la dépollution par les plantes. Rapport, projet Horval 2009-2010, AGROCAMBUS OUEST- Centre d'Angers – INPH, 127p.
27. **AESC**, 2011, Effets sur la santé de la pollution de l'air intérieur, plaquette informative réalisée dans le cadre du projet Européen Healthy - Programme santé publique 2003- 2008 de l'AESC, 4p.
28. **OFSP**, 2008, Poussières fines dans l'air intérieur, rapport d'études, 4p.
29. **OQAI**, 2010, Résumé des actes de la journée du 6 mai 2010 du Programme « Epuración de l'air intérieur par les plantes ». [En ligne] [Consulté 12/2011] Disponible sur : <http://www2.ademe.fr>

30. **Yang D.S., Son K.C., Kays S.J.**, 2009, Volatil organic compounds emanating from indoor ornamental plants, *HortScience*, 44, 396-400.
31. **ORS d'île-de-France**, 2010, Effets sanitaires des moisissures dans l'habitat : Enquête Esmha, pilote d'une étude épidémiologique en Île-de-France, rapport d'études, 4p.
32. **SCHER**, 2007, Preliminary report on risk assessment on indoor air quality, Rapport de la Commission Européenne, 28p.
33. **El Yamani M., Seret C.**, La toxicologie, fiche, AFFSET, 5p.
34. **Bonte D., Chambon C., Furon D., Schadkowski C.**, 2007, Monoxyde de carbone : Quels effets sur la santé ?, *Air Pur*, 70, p.5-8.
35. **ALK Laboratoire**, 2012, Fiche : les allergies croisées. [En ligne] [Consulté 03/2012] Disponible sur: http://alk-abello.com/FR/patients/allergenes_prevention/lists/fiches_conseil/Les%allergies%20crois%C3%A9es.pdf
36. **Wauters O., Dezfoulian B., Failla V., De la Brassinne M. et Nikkels A.F.**, 2009, Les allergies aux plantes d'intérieur, *Revue Médicale de Liège*, 64 (11), 566-569.
37. **Plante-interieur.com**, 2005, [En ligne] [Consulté 03/2012] : <http://www.plante-interieur.com>
38. **Mallany L., Darlington A. et Dixon M.**, 2001, The biofiltration of indoor air II: microbial loading of the indoor space, 6p.
39. **Summerbell R.C., Krajden S. et Kane J.**, 1989, Potted plants in hospitals as reservoirs of pathogenic fungi , *Mycopathologia*, 106 (1), 13-22.
40. **Martin L. Pall**, Syndrome d'hypersensibilité chimique multiple (MCS) : Mécanismes toxicologiques et d'hypersensibilité, rapport, 42p.
41. **INPES**, Le tabagisme passif, brochure d'information. [En ligne] [Consulté 09/2011]. Disponible sur : <http://www.inpes.sante.fr/cfesbases/catalogue/pdf/434.pdf>
42. **CIRC**, Base de données des Monographies sur les Risques de Cancérogénicité pour l'Homme. [En ligne] [Consulté 09/2011] Disponible sur: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/PDFs/index.php>
43. **Courtois B.**, 2008, Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France: Aide-mémoire technique, INRS, 21p.
44. **Cancers et environnement**, Expositions environnementales : Le radon. [En ligne] [Consulté 09/2011] Disponible sur: <http://www.cancer-environnement.fr/89-Radon.ce.aspx>

45. **Legifrance**, Décret n° 2011-321 du 23 mars 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils. [En ligne] [Consulté 09/2011] Disponible sur: <http://www.legifrance.gouv.fr>
46. **Colle S.**, 2011, Étiquetage des produits de construction ou de revêtements de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants - La nouvelle réglementation, Centre d'Etudes Techniques de l'équipement de l'Ouest, 12p.
47. **Cuny D., Hanoune B., Bulteau G., Guilhot J., Nicolas M.**; 2011, Programme PHYTAIR - phase III: Biosurveillance des polluants de l'air intérieur, Rapport d'études, 181p.
48. **Blondeau P., Ginestet A., Squinazi F., Ribot B., De Blay F.**, 2007, Les épurateurs d'air : la solution ou le pire, *Pollution atmosphérique.*, 194, 160-164.
49. **Kaluzny P.**; 2010, Projet NORMA-CAT, *AFNOR*, 43p.
50. **Cuny D., Rzepka M.A., Bulteau G., Lakel A., Devred I., Van Haluwyn C.**, 2008, Quels rôles les plantes peuvent-elles jouer vis-à-vis de la pollution à l'intérieur des locaux ?, *Air Pur*, 69, 33-36.
51. **ADEME**, 2006, Traitement biologique des sols pollués : recherche et innovation, rapport d'études, 92p.
52. **Cuny D.**, 2010, La dépollution de l'air intérieur par les plantes, Université Lille Nord de France, E.A 4483, Faculté de Pharmacie.
53. **Cuny D., Rzepka-Cuny M.A.**, 2009, Evaluation des capacités d'épuration de l'air intérieur par les plantes et de la phytotoxicité des polluants. Aspects généraux et apports de la phase I du programme phytair, *Air pur*, 77, 31-42.
54. **ADEME**, 2010, Avis et recommandations: Plantes "dépolluantes », point d'information de l'ADEME – Programme Phytair, 11p.
55. **Franzaring J.**, 1997, Temperature and concentration effects in biomonitoring of organic air pollutants, *Environmental monitoring and Assessment*, 46, 209-220.
56. **Al-Sayeda H.**, 2007, Transfert d'un insecticide systémique, l'imidaclopride, chez la tomate : implication du transport phloémien. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique, spécialité qualité et sécurité des aliments, soutenue le 15/11/07, Toulouse, 174p.
57. **Lemière B., Seguin J.J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger Ph., Darmentrail D. et Conil P.**, 2001, Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Applications dans un contexte d'Evaluation Détaillée des Risques pour les ressources en eau, GM/RP- 50662- FR, 177p.
58. **Briggs G.G., Bromilow R.H., Evans A.A.**, 1981, Relationship between lipophilicity and the distribution of non-ionised chemicals in barley shoots following uptake by the roots, *Pesticides Sciences*, 13, 495-504.

59. **Cuny D., Hanoune B., Rzepka M.A.**, 2009, Programme PHYTAIR – phase II : Biosurveillance des polluants de l'air intérieur, rapport d'études, 93p.
60. **Genest R., Bérard A.**, 2000, Cours de botanique : anatomie de la feuille. [En ligne] [Consulté 09/2011] Disponible sur : <http://lesbeauxjardins.com/cours/botanique/8-Anatomie/feuille.htm>
61. **Rubinstein J.P., Prat R.**, 2005, Les mouvement des végétaux : ouverture et fermeture des stomates, Université Pierre et Marie Curie - UFR de Biologie. [En ligne] [Consulté 29/09/2011] Disponible sur : <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/mouvements/nasties-stomate.htm>
62. **Lecomte J.**, 2009, Innovation – Technologies, Les cires végétales : sources et applications, OCL, 16(4), 262-266.
63. **Schmitz H., Hilgers U., Weidner M.**, 2000, Assimilation and metabolism of formaldehyde by leaves appear unlikely to be of value for indoor air purification, *New Phytology*, 147, 307-315.
64. **Tani A., Hewitt C.N.**, 2009, Uptake of Aldehydes and Ketones at typical indoor concentrations by houseplants, *Environmental, Science & Technology*, 6p.
65. **Wood R. A., Burchett M. D., Orwell R.A., Tarran J., Torpy F.**, 2002, Plant/Soil Capacities to Remove Harmful Substances From Polluted Indoor Air, Plants and Environmental Quality Group Centre for Ecotoxicology, University of Technology Sydney, Australia, 11p.
66. **Hellström A.**, 2004, Uptake of organic pollutants in plants, Swedish University of Agricultural Sciences, rapport, 30p.
67. **Staunton S.**, 2003, Transfert sol-plante, *clefs CEA*, 48, p.9-10.
68. **RECORD**, 2007, Etat des connaissances sur le devenir de polluants organiques dans les sols lors de la biodégradation naturelle et après biotraitement : Identification des composés « métabolites » et des cinétiques, rapport d'études n°05-0513/1A, 148 p.
69. **Barriuso E., Calvet R., Schiavon M., Soulas G.**, 1996, Les pesticides et les polluants organiques des sols : Transformation et dissipation, Etudes et gestion des sols issus du forum « Le sol, un patrimoine menacé ? », 279-296.
70. **Longuetaud L.**, 2005, Des plantes d'appartement qui épurent l'air intérieur : Mythe ou réalité ? Thèse pour l'obtention du diplôme d'Etat de Doctorat en Pharmacie, soutenue le 20/10/05, Université de Nancy, 116p.
71. **Vasseur A., Peltier G., Bourguignon J.**, 2003, Biodépollution, bioremédiation : Des plantes pour nettoyer les sols et les eaux, *clefs CEA*, 48, 85-88.
72. **Jemal F., Ghorbal M.H.**, 2002, Phytoremédiation, *Revue H.T.E*, 122, 49-60.
73. **Schnoor J.L., Dietz A.C.**, 2001, Advances in phytoremediation, *Environmental Health Perspectives*, 109 (1), 163-168.

74. **Proulx C.**, 2011, Circulation chez les végétaux. [En ligne] [Consulté 10/2011] Disponible sur: <http://www.cours-pharmacie.com/biologie-vegetale/architecture-vegetale.html>
75. **Burken J.G., Schnoor J.L.**, 1998, Predictive relationships for uptake of organic contaminants by hybrid poplar trees, *Environmental, Science & Technology*, 32, 3379-3385.
76. **Collins C., Laturus F. and Nepovim A.**, 2002, Remediation of BTEX and Trichloroethylene: current knowledge with special emphasis on phytoremediation, *Environ. Sci. & Pollut. Res*, 9 (1), 86-94.
77. **Schäffner A., Messner B., Langebartels C., Sandermann H.**, 2002, Genes and enzymes for *In-planta* phytoremediation of air, water and soil, *Acta Biotechnol.*, 22 (1-2), 141-152.
78. **Achkor A., Diaz M., Fernandez M.R., Biosca J.B., Parés X., Martínez M.C.**, 2003, Enhanced formaldehyde detoxification by overexpression of glutathion-dependent formaldehyde deshydrogenase from *Arabidopsis*, *Plant physiology*, 132, 2248-2255.
79. **Giese M., Bauer-Doranth U., Langebartels C., sandermann H.**, 1994, Detoxification of formaldehyde by the spider plant (*Chlorophytum comosum* L.) and by soybean (*Glycin max* L.) cell-suspension cultures, *Plant physiology*, 104, 1301-1309.
80. **Dixon D.P., Cummins I., Cole D.J., Edwards R.**, 1998, Glutathione-mediated detoxification systems in plants, *Current Opinion in Plant Biology*, 1, 258-266.
81. **Plant'airpur®**, 2012, [En ligne] [Consulté 12/2011] Disponible sur : <http://www.plantairpur.fr>
82. **APPA Nord-Pas de Calais**, 2010, Plantes & qualité de l'air intérieur : Les apports du programme PHYTAIR, dossier thématique [en ligne] [Consulté 09/2010] Disponible sur: www.appanpc.fr
83. **Wolverton B.C., Johnson A., Bounds K.**, 1989, Interior landscape plants for indoor air pollutant abatement, Final Report, National aeronautics and Space Administration, 25p.
84. **Wolverton B. C., McDonald R. C.**, 1982, Foliage plants for removing formaldehyde from contaminated air inside energy-efficient homes and future space stations, *Nasa technical memorandum*, 13 p.
85. **Wolverton B. C.**, 1986, Houseplants, indoor air pollutants, and allergic reactions, 21p.
86. **Wood R. A., Orwell R. L., Tarran J., Torpy F. and Burchett M.**, 2001, Potted-plant/growth media interactions and capacities for removal of volatiles from indoor air, *Journal of horticultural Science and Biotechnology*, 77(1), 120-129.

87. **Yang D.S., Pennisi S. V., Son K.-C., Kays S. J.**, 2008, Screening indoor plants for volatile organic pollutant removal efficiency, *Journal of American Society for Horticultural Sciences*, 8-22.
88. **Cornejo J.J., Munoz F.G., Ma C.Y., Stewart A.J.**, 1999, Studies on the decontamination of air by plants, *Ecotoxicology*, 8, 311-320.
89. **Mung Hwa Yoo ; Youn June Kwon ; Son Ki-Cheol et Kays Stanley J.**, 2006, Efficacy of indoor plants for the removal of single and mixed volatile organic pollutants and physiological effects of the volatils on the plants, 1315 (4), 452-458.
90. **Wood R.A., Burchett M.D., Alquezar R., Orwell R.L.,Tarran J., et Torpy F.**, 2006,The potted-plant microcosm substantially reduces indoor air VOC pollution: I. office field-study, *Water, Air and Soil Pollution*, 175, 163-180.
91. **NIGZ**, 2004, Le bien-être au travail grâce aux plantes, brochure dans le cadre d'une campagne financée avec le soutien de la Communauté Européenne. [En ligne] [Consulté 11/2011] Disponible sur : www.healthygreenatwork.org
92. **Bergs**, 2002, The effect of healthy workplaces on the well-being and productivity of office workers, *Proceedings of Plants for People International Symposium Floriade*, Netherlands.
93. **Fjeld**, 2002, The effect of plants and artificial daylight on the well-being and healthof office workers, school children and health care personnel, *Proceedings of Plants for People International Symposium Floriade*, Netherlands.
94. **Dingle P., Tapsell P. and Hu S.**, 2000, Reducing Formaldehyde Exposure in Office Environments Using Plants, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 64, 302-308.
95. **Levin H.**, 1992, Can house plants solve IAQ problems, *Indoor Air Bulletin*, 2, 1-5.
96. **HBI**, 1992, Can plants help clean up the indoor air?, *Healthy Building International Magazine*, 2(1), 10-11.
97. **Lines-Kelly R.**, 2005, Soil biology basics: The rhizosphere, NSW department of primary industries, 2p.
98. **Dessaux Y.**, 2011, Interactions plantes et micro-organismes de la rhizosphère, CNRS, Institut des Sciences du végétal. [En ligne] [Consulté 11/2011] Disponible sur : <http://www.isv.cnrs-gif.fr/recherche/yd/yd.html>
99. **Amora-Lazcano E., Guerrero-Zúñiga L.A., Rodriguez-Tovar A., A. Rodriguez-Dorantes A. and Vasquez-Murrieta M.S.**, 2010, Rhizospheric plant-microbe interactions that enhance the remediation of contaminated soils, *Current research, Technlogy and Education topics in applied microbiology and microbial biotechnology*, A. Méndez-Vilas (Ed.), 251-256.
100. **Malloch D.**, 2009, Les microorganismes du sol, 8p.

101. **AgrilInfo.in**, 2011, Soil microbiology: Microorganisms in the Rhizosphere and Rhizosphere Effect [En ligne] [Consulté 11/2011]
Disponible sur : <http://agriinfo.in/?page=topic&superid=5&topicid=154>
102. **Wolverton B.C., Wolverton John D.**, 1993, Plants et soil microorganisms: removal of formaldehyde, xylene, and ammonia from the indoor environment, *Journal of the Mississippi academy of sciences*, 38 (2), 11-15.
103. **Wood R.A., Orwell R.L. et Burchett M.D.**, 1997, Rates of Absorption of VOCs by Commonly Used Indoor Plants, Proc. of ISIAQ 5th International Conference on Healthy Buildings, 2, 59-64.
104. **Wood R.L., Tarran, J., Torpy F. et Burchett M.D.**, 2004, Removal of benzene by the indoor plant/substrate microcosm and implications for air quality, *Water, Air, and Soil Pollution*, 157, 193-207.
105. **Guieysse B., Hort C., Platel V., Munoz R., Ondarts M., Revah S.**, 2008, Biological treatment of indoor air for VOC removal: potential and challenges, *Biotechnology Advances*, 26, 398-410.
106. **Kin K.J., Kil M.J., Song J.S., Yoo E.H.**, 2008, Efficacy of volatile formaldehyde removal by indoor plants: contribution of aerial parts versus the root zone, *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 133(4), 521-526.
107. **Bulteau G.**, 2004, Définition d'une méthodologie d'évaluation des procédés d'élimination des composés organiques volatils de l'air intérieur, Thèse de Doctorat en Sciences pour l'Ingénieur, spécialité génie des procédés, soutenue le 10/12/2004, Université de Nantes, 228p.
108. **XU Z., Sin N., Wang J., Tong H.**, 2010, Formaldéhyde biofiltration as affected by spider plant, *Bioresource technology*, 101, 6930-6934.
109. **Ondart M.**, 2008, Evaluation des performances d'un bio-procédé de dépollution de l'air intérieur, Thèse pour l'obtention du grade de Docteur, Génie des Procédés, Pau, soutenue le 31/10/2008, 222p.
110. **Blanchard G., Catroux G., Kard F., Lebeault J.M., Letaconnoux N. et Mossman A.L.**, Les biotechnologies au secours de l'environnement / Symposium européen Biodépol'99, Centre de biotechnologies en Bretagne, 343p.
111. **Monchamp M.E.**, 2009, La bioremédiation des hydrocarbures aromatiques polycycliques par les bactéries, 12p.
112. **Darlington A.B. et Dixon M.A.**, 1999, Acetone removal kinetics by an indoor biofilter, *Society of Automotive Engineers, Inc.*, 1999-01-2069.
113. **Wolverton B.C. et Mc Donald R.C.**, 1985, Foliage plants for removing indoor air pollutants from energy efficient homes, *Economy Botany*, 38(2), 224-229.
114. **Darlington A., Chan M., Pilger C. et Dixon M.A.**, 2000, The biofiltration of indoor air: implications for air quality, *Indoor Air*, 10, 39-46.

115. **Llewellyn D., Darlington A., Dixon M. et Mallany J.**, The biofiltration of indoor air I: a novel reactor for a novel waste gas stream, 2000, Air Quality Solutions Ltd., Nature Systems, 7p.
116. **Knowles L., MacLean P., Rosato M., Stanley C., Volpe S. et Yousif D.**, 2004, Living Wall: a feasibility study for the SCL, Final Report, University of Waterloo, 66p.
117. **Zhang J., Wang Z et Ren D.**, 2010, Botanical air filtration, *ASHRAE Journal*, 138-140.
118. **PHYTORESTORE**, 2004, Le traitement de l'air, [En ligne] [Consulté 12/2011] Disponible sur : <http://www.phytorestore.com/pdf/air.pdf>
119. **ANDREA**, 2009, Air naturellement purifié, [En ligne] [Consulté 12/2011] Disponible sur : <http://www.andreaair.com/fr/index.html>
120. **Sciences et avenir**, 2010, Les plantes vertes peuvent-elles purifier l'air de la Maison ? [En ligne] [Consulté 03/12] Disponible sur : <http://www.sciencesetavenir.fr/decryptage/20111209.OBS6408/les-plantes-verte-peuvent-elles-purifier-l-air-de-la-maison.html>
121. **OQAI**, 2010, Pollution de l'air intérieur : quel potentiel d'épuration par les plantes?, *bulletin de l'OQAI n°2*, 4p.
122. **Doty S.L., James C.A., Moore A.L., Vajzovic A., Singleton G.L., Ma C., Khan Z., Xin G., Kang J.W., Park J.Y., Meilan R., Strauxx S.H., Wilkerson J., Farin F. et Strand Stuart E.**, 2007, Enhanced phytoremediation of volatile environmental pollutants with transgenic trees, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 43 (104), 16816-16821.
123. **INRA**, 1997, Les plantes transgéniques. [En ligne] [Consulté 01/2012] Disponible sur: <http://www.inra.fr/internet/Directions/DIC/ACTUALITES/DOSSIERS/ogm.html>
124. **Crété P.**, 2010, La transgénèse végétale, *LGBP*. [En ligne] [Consulté 01/2012] Disponible sur : http://biologie.univ-mrs.fr/upload/p210/2_TRANSGENESE_L3_Patrice_2010.pdf
125. **AFBV**, 2009, Les biotechnologies végétales : définitions. [En ligne] [Consulté 01/2012] Disponible sur : <http://biotechnologies-vegetales.com/biotech/definitions>
126. **Cunningham S.D. et Ow D.W.**, 1996, Promises and Prospects of Phytoremediation, *Plant Physiology*, 110, 715-719.
127. **Sandermann H.J.**, 1994, Higher plant metabolism of xenobiotics: the "green liver" concept, *Pharmacogenetics*, 4, 225-241.
128. **Achknor H., Díaz M., Fernandez M.R., Biosca J.A., Pares X. et Martinez M.C.**, 2003, Enhanced Formaldehyde Detoxification by Overexpression of Glutathione-Dependent Formaldehyde Dehydrogenase from *Arabidopsis*, *Plant Physiology*, 132, p.2248-2255.

129. **Morikawa H. et Erkin O.C.**, 2003, Basic processes in phytoremediation and some applications to air pollution control, *Chemosphere*, 52, 1553-1558.
130. **Sawada A., Oyabu T., Chen L.M., Hirai N., Izui K.**, 2007, Purification capability of tobacco transformed with enzymes from a methylotrophic bacterium for formaldehyde, *International Journal of Phytoremediation*, 9, 487-496.
131. **Cuny D. et Rzepka M.A.**, 2009, La purification de l'air intérieur par les plantes, *Jardins, Environnement et Santé*, 11ème colloque scientifique de la SNHF, 17-20.
132. **CEA**, 2003, Biodépollution, bioremediation: Des plantes pour nettoyer les sols et les eaux, *clefs CEA*, 48, 85-88.
133. **Cuny-Rzepka M.A., Van Haluwyn C., Cuny D.**, 2009, Première évaluation des propriétés génotoxiques de l'air sur le littoral Dunkerquois à l'aide du test *Tradescancia* [TRAD-MCN], *Air pur*, 77, 51-58.
134. **Mišík M., Ma T.H., Nersesyan A., Monarca S., Kim J.K. and Knasmueller S.**, 2011, Micronucleus assays with *Tradescancia* pollen tetrads: an update, *Mutagenesis*, 26 (1), 215-221.



DECISION D'AUTORISATION DE SOUTENANCE

Nom et Prénom de l'étudiant : MAERTEN Nadège

Date, heure et lieu de soutenance :

Le

03	07	2012
jour	mois	année

 à 18 h 00 Amphithéâtre ou salle : Curie

Avis du conseiller de thèse:

Nom : CUNY Prénom: Damien

- favorable
 défavorable

Motif de l'avis défavorable :
.....
.....

Date : le 10 mai 2012
Signature:

Avis du Président de Jury

Nom : CUNY Prénom: Damien

- favorable
 défavorable

Motif de l'avis défavorable :
.....
.....

Date : le 10 mai 2012
Signature:

Décision de Monsieur le Doyen:

- favorable
 défavorable

Le Doyen

L. DUBREUIL



NB : La faculté n'entend donner aucune approbation ou improbation aux opinions émises dans les thèses, qui doivent être regardées comme propres à leurs auteurs.

Nom : MAERTEN
Prénom : Nadège

La phytoremédiation : un moyen de lutter contre la pollution de l'air à l'intérieur des locaux ?

Mots-clés : Air intérieur, pollution, système d'épuration de l'air, plantes d'intérieur, phytoremédiation, biofiltres

Résumé

Nous passons jusqu'à 90% de notre temps dans des espaces clos où l'air peut être plus ou moins contaminé par divers polluants émis par les matériaux de construction et d'aménagement, les activités des occupants ainsi que l'échange avec l'air extérieur. Ce cocktail de polluants peut avoir des effets sur la santé humaine. Le problème de la qualité de l'air intérieur se révèle alors comme un enjeu majeur de santé publique.

Les solutions de remédiation passent par la prévention et la limitation des sources de pollution accompagnées d'une aération des locaux. Egalement, à la faveur d'une sensibilisation écologique plus forte, l'utilisation des plantes en pot (ou phytoremédiation) connaît un intérêt croissant. Les plantes d'intérieur, via leurs feuilles et racines, montrent une réelle capacité à réduire les concentrations de certains polluants en association avec les microorganismes de la rhizosphère qui semblent être les principaux acteurs de la dépollution. Cependant, les rendements d'épuration observés lors de l'utilisation de ces plantes sont trop faibles pour permettre une épuration efficace des locaux.

De nouvelles recherches sont encore nécessaires afin d'approfondir les connaissances et les nouvelles technologies permettront peut-être à terme d'améliorer les capacités d'épuration de ces plantes.

Membres du jury :

Président : Monsieur **CUNY Damien**, Professeur des Universités, Laboratoire des Sciences végétales et fongiques, Université Lille II

Assesseur : Madame **GRAVE Béatrice**, Maître de conférences des Universités, Laboratoire de Toxicologie, Université Lille II

Membre extérieur : Madame **CUNY Marie Amélie**, Docteur en Sciences, Chargée d'étude à l'Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique