



POLYTECH[®]
TOURS

Département Aménagement

CITERES
UMR 6173
Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés

Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Paysage,
Environnement

Projet de Fin d'Etudes

Les services écosystémiques rendus par les espaces verts de nos villes

L'épuration de l'air



2011-2012

Directeur de recherche :
ISSELIN-NONDEDEU Francis

BUNEL Pierre-Antoine

« La nature agit sur l'âme, elle peut y éveiller des émotions, des idées qui nous reposent ou nous agitent et provoquent la tristesse, la gaieté »

D'après Goethe

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

Les citations suivies du signe ** sont traduites des textes originaux par l'auteur de la recherche.

FORMATION PAR LA RECHERCHE ET

PROJET DE FIN D'ETUDES

La formation au génie de l'aménagement, assurée par le département aménagement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs:

- Développer tout une partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement tous ceux qui se sont associés à la réalisation de ce travail de recherche fort enrichissant.

Particulièrement, Monsieur ISSELIN-NONDEDEU Francis, Maître de Conférences au Département Aménagement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, pour son suivi, son aide et ses conseils avisés.

Monsieur Pascal OILLIC, Doctorant en Géographie à l'Université de Tours pour ses conseils et son temps.

Monsieur Joaquín Francisco LABADO CONTADOR, Docteur en Ecologie et Professeur à l'Université d'Estrémadure pour son aide et ses conseils, et pour m'avoir orienté dans mes recherches en Espagne.

J'adresse également mes remerciements à toutes les personnes qui ont bien voulu me consacrer un peu de leur temps et leurs avis sans lesquels je n'aurais pu réaliser ce travail.

Sommaire :

Introduction.....	9
I. Mise en contexte.....	13
A. Une pollution atmosphérique grandissante.....	13
B. Une solution originale pour dépolluer l'air	15
C. Un nouveau support urbain pour la purification de l'air	16
D. Questionnement	17
II. Méthode de travail.....	19
A. Analyse bibliographique.....	19
B. Critères de sélection des polluants	20
C. Critères de sélection des articles	22
D. Détermination de la grille de lecture	24
III. Résultats.....	25
A. A l'échelle de la plante	25
1. Absorption des polluants par la plante.....	25
2. Effet du port végétal	26
3. Effet des conditions environnantes.....	27
B. A l'échelle de l'espace végétalisé	28
1. Aménagement des espaces végétalisés	28
2. Performance des espèces pour l'épuration.....	30
C. A l'échelle urbaine	32
IV. Discussion	35
Conclusion	36
Bibliographie.....	38
Table des figures	42

Introduction

La pollution de l'air en milieu urbain

La pollution de notre environnement est de plus en plus mise en avant, aussi bien dans l'actualité qu'au sein de la communauté scientifique. Ce problème est surtout critique en milieu urbain : les villes se veulent de plus en plus denses et dynamiques, et cela ne va pas sans son lot de problèmes. En effet, elles s'exposent de ce fait à une pollution atmosphérique de plus en plus présente. Notons en France le cas de Marseille, où il a été révélé par l'institut de veille sanitaire (Invs) en 2011 un taux de particules en suspension dans l'air de $18,5\mu\text{g}/\text{m}^3$, contre une recommandation de l'organisation mondiale de la santé (OMS) de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) recense plusieurs types de polluants : les particules en suspension (appelées TSP, et divisés en 3 catégories selon leur taille : PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ et $\text{PM}_{1.0}$), SO_2 , NO_x , NH_3 , CO_2 , CH_4 , N_2O , les composés organiques volatiles (COV), CO_2 , CH_4 , N_2O , ainsi que les métaux lourds (arsenic, chrome, mercure,...) et les produits organiques persistants (trichloréthylène, hydrocarbures aromatiques polycycliques,...) (CITEPA, Emissions dans l'air, 2011). Ces polluants sont issus de plusieurs sources : les transports en premier lieu (Mayer, 1999), puis la climatisation des bâtiments et le secteur industriel. Notre société tend à adopter un mode de vie de plus en plus urbain, comme le montre l'évolution des populations : plus de 60% de la population mondiale devrait être urbaine d'ici 2030 (Nations-Unies, Urban and Rural Areas 1996, 1997). Cette pollution atmosphérique croissante influe directement et de manière négative sur notre santé (Mayer, 1999). Il en découle des déficiences respiratoires, de l'asthme, ainsi que des maladies cardio-vasculaires (Pope, 1995), mais aussi des irritations graves des surfaces membraneuses : œil, nez, gorge, poumons (Heimann, 1963).

Les espaces verts

Malgré un mode de vie dans un environnement réalisé très majoritairement par la main de l'Homme, celui-ci a besoin de retrouver un espace naturel près de chez lui, afin d'assouvir certains besoins de récréation. Le Centre de Documentation de l'Urbanisme définit le concept d'espaces verts comme englobant les parcs et jardins, les espaces

boisés ou cultivés, publics ou privés des zones urbaines et périurbaines. Ceux-ci bénéficient de nombreuses mesures de protection, tant au niveau du schéma directeur, que du Règlement national d'urbanisme ou du Plan d'occupation des sols (protection des espaces boisés, établissement de zones non constructibles, obligation de créer des espaces verts lors de la construction d'immeubles d'habitation...) (CDU). D'après une étude menée au sein de l'équipe IPAPE du laboratoire CITERES (Cités Territoires Environnement et Sociétés) qui a analysé l'espace vert comme un écosystème anthropisé, il faut considérer les espaces verts comme des espaces non bâtis, végétalisés ou plantés, gérés par le service des espaces verts d'une commune et ouverts au public (Mehdi, 2010).

C'est après la Révolution Industrielle qu'apparurent les premiers parcs urbains. Il nous faut définir ce qu'est un parc urbain : *« C'est un espace vert public, clos ou non, allant de 5 à 3.000 hectares, aménagé à des fins récréatives, composé de pelouses d'agrément, d'arbres d'ornement et de massifs floraux, généralement doté d'un plan d'eau, et dont l'emprise est souvent mitoyenne d'une propriété privée ou attenante à une propriété publique »*. (Boutefeu, 2005). Cependant, cette caractéristique qui veut que ces parcs soient accolés à une propriété s'est largement estompée au cours du temps.

Même si les espaces verts en villes peuvent encore être perçus comme des éléments de décor par les urbanistes et les architectes (Lunginbühl, 2001), de nombreuses études menées ont montré que ces espaces urbains répondaient aux besoins initiaux des citoyens, en offrant par exemple des aménités et des équipements sportifs.

Les services écosystémiques

L'Homme utilise et a toujours utilisé des ressources naturelles. Il se sert dans son environnement, qui lui apporte de la nourriture, de l'eau potable, et les moyens de se construire un espace propice à son développement. De par son fonctionnement naturel, l'environnement produit des prestations bénéfiques pour la société humaine. Ce sont les services écosystémiques. *« Cette notion est apparue à la fin des années 1970, par Westman (1977) puis Ehrlich et Mooney (1983). Cette idée qui n'était à la base qu'une simple métaphore destinée à frapper l'opinion publique, a donné lieu à la naissance d'un concept. »* (Barnaud, 2011). Ces auteurs souhaitaient attirer l'attention du public sur la dégradation des écosystèmes, due aux activités humaines.

Malgré les études de plus en plus nombreuses (Groot, 2002), cette notion de service écosystémique, également appelé « service écologique » ou « service

environnemental », est encore en proie à de nombreuses incertitudes, qui donnent lieu à des débats et des controverses sur sa définition, son origine, sa valeur, ses relations ou bien encore sa gestion.

La définition la plus largement répandue est celle-ci : « *benefits supplied to human societies by natural ecosystems* » (Daily, 1997). « Bénéfices fournis aux sociétés humaines par les écosystèmes naturels ». C'est la définition que nous utiliserons au cours de cette étude.

Le Millenium Ecosystem Assessment (MEA) classe ces services en quatre grands types (Raudsepp-Hearne, 2010):

- Services d'approvisionnement : produits agricoles, eau potable, bois, ...
- Services de régulation : climat, inondations, purifications de l'eau et de l'air, ...
- Services culturels : aménités, aspects religieux, récréatifs,...
- Services de soutien (servant de base aux trois premiers services) : cycle du carbone, formation des sols,...

Avec les considérations actuelles sur l'environnement et sa dégradation, les services écosystémiques reviennent au goût du jour, comme dans les années 1970 avec Westman et Mooney. En veillant à ne pas altérer les supports de ces services, ils pourraient augmenter notre bien-être. Ce bien-être est défini de deux façons selon le dictionnaire Larousse : « État agréable résultant de la satisfaction des besoins du corps et du calme de l'esprit » et « Aisance matérielle qui permet une existence agréable ». Ces définitions sont quelque peu complémentaires, et peuvent se résumer à : un état où les besoins matériels sont pourvus, permettant une existence agréable.

Afin de pouvoir contribuer à la réalisation de ces services écologiques, il faut premièrement comprendre leur mécanisme. Malgré les incertitudes sur ces services environnementaux, nous pouvons retirer le point suivant : l'augmentation de la biodiversité d'un site permet d'accroître la stabilité de l'écosystème, et la quantité de services écologiques qui en découlent en est plus grande (Luck, 2009). Les dernières études ne mènent cependant pas à un modèle unique qui permet de quantifier les services rendus, ni une prévision valable de l'évolution de ces services (Munns, 2009).

Ces incertitudes et ces méconnaissances des services écosystémiques conduisent jusqu'à un paradoxe environnemental. Ces derniers rendent services aux Hommes, améliorants leur bien-être : ressources, santé, sécurité,... Or il a été montré que ces services diminuaient, mais notre bien-être continuait à prospérer.

L'objectif de cette étude va être d'analyser pour les espaces végétalisés urbains un service écosystémique (de régulation) en particulier : l'épuration de l'air dans les espaces végétalisés urbains, au travers d'une analyse bibliographique. Afin d'y répondre, nous posons l'hypothèse suivante :

→ **Les espaces végétalisés sont capables de purifier l'air de nos villes.**

Nous cherchons à savoir si à eux seuls, ces espaces végétalisés sont capables de réduire significativement la pollution urbaine, afin de garantir une qualité atmosphérique nécessaire au bien-être humain, sans que cela ne perturbe ses activités économiques et sociales, indispensables au développement humain.

Cette branche particulière de l'effet purifiant des plantes est relatée dans bon nombres d'articles scientifiques, qui seront le support principal de cette étude.

Dans la première partie, nous expliciteront plus en détail le contexte dans lequel se déroule cette étude, définissant plus en détails les différentes notions utilisées lors de ce travail de recherche. La deuxième partie expliquera et justifiera la méthode employée pour réfuter ou valider notre hypothèse. Dans une troisième partie nous exploiterons les éléments bibliographiques selon une grille de lecture préalablement déterminée. La quatrième et dernière partie analysera les résultats précédemment obtenus, avant de pouvoir conclure cette étude.

I. Mise en contexte

A. Une pollution atmosphérique grandissante

Nous avons choisi d'étudier la pollution de l'air urbain, car celui-ci devient de plus en plus pollué au fur-et-à-mesure que les villes grandissent (Nowak, 2006). Cette pollution est dangereuse pour notre santé, et pourtant le nombre de citoyens augmente toujours (Nations-Unies, Urban and Rural Areas 1996, 1997), porté par une croissance démographique forte, des flux migratoires importants et un essor économique attractif (Nations-Unies, Les causes de la croissance urbaine, 1997).

Pour illustrer ces propos, prenons le cas de l'Île-de-France. La population augmente constamment. Elle a évolué de 0,59 % entre 2010 et 2011 (INSEE, 2011). Dans le même temps, la qualité de l'air en 2011 était moins bonne qu'en 2010, et ce malgré des conditions météorologiques plus favorables à un niveau de pollution peu élevé (AirParif, Bilan de la qualité de l'air en 2011 en Île-de-France, 2012).

Polluants problématiques en Île-de-France	Normes à respecter Valeur limite		Normes non contraignantes			
			Objectif de qualité		Valeur Cible	
	Loin du trafic	Le long du trafic	Loin du trafic	Le long du trafic	Loin du trafic	Le long du trafic
Dioxyde d'azote	Dépassée	Dépassée	Dépassé	Dépassé		
Particules PM10	Respectée	Dépassée	Respecté	Dépassé		
Particules fines PM2,5	Respectée	Dépassée	Dépassé	Dépassé	Respectée	Dépassée
Ozone			Dépassé		Respectée	
Benzène	Respectée	Respectée	Respecté	Dépassé		

Figure 1: Bilan 2011 de la qualité de l'air en Île-de-France (AirParif,2012)

Ce tableau démontre bien le problème environnemental que connaît la région parisienne, avec plus de la moitié des seuils de vigilance dépassés cette année encore. Ce cas est représentatif d'autres grandes agglomérations, et l'Union Européenne a lancé une procédure de contentieux afin de rétablir une qualité atmosphérique minimale imposée en région Île-de-France (AirParif, Bilan de la qualité de l'air en 2011 en Île-de-France, 2012).

Afin de régler ce problème, des actions réglementaires sont mises en places. La loi sur l'air de 1996 a permis la mise en place de 3 programmes :

→ PRQA : Plan régional de la qualité de l'air, qui établit un diagnostic et donne des recommandations.

→ PPA : Plan de protection de l'atmosphère, qui définit des mesures réglementaires contraignantes.

→ PDU : Plan de déplacements urbains, qui organise les transports afin de favoriser les transports en commun et les modes de déplacement doux.

Les lois du Grenelle de l'environnement (Aout 2009 pour le premier volet, Juillet 2010 pour le second) ont permis la création de 4 nouveaux programmes :

→ PRSE : Plan régional santé environnement, qui définit des actions afin de réduire les atteintes à notre santé liées à la dégradation de l'environnement.

→ PCET : Plan climat énergie territorial, qui définit des actions pour réduire les émissions des gaz à effets de serre sur un territoire.

→ SRCAE : Schéma régional climat air énergie, qui regroupe les problématiques de qualité de l'air et de changement territorial, en vue d'élaborer le PPA et le PCET.

→ ZAPA : Zone d'action prioritaire sur l'air, qui permet aux collectivités territoriales volontaires de tester des actions pour diminuer les émissions de polluants sur une zone expérimentée, avec une approche globale qui intègre l'air, le bruit et l'aspect socio-économique.

Des mesures d'urgences sont mises en œuvres lorsque les seuils de vigilance de pollution sont dépassés. Elles consistent généralement à conseiller les automobilistes de réduire leur vitesse afin de diminuer le taux d'émissions de polluants de leur véhicule.

Des conseils pratiques sont également prodigués aux citoyens, applicables dans leur vie quotidienne.

(AirParif, 3 catégories d'actions pour améliorer la qualité de l'air quotidienne, 2011)

→ Au vu des dernières tendances explicitées précédemment, ces mesures ne semblent pourtant pas suffire pour endiguer la pollution atmosphérique croissante. La région parisienne est pourtant l'une des régions les plus étudiées et recevant beaucoup d'attention de la part des associations de surveillance de l'air.

Près de 40 agences françaises surveillent l'air sur le territoire national, et sont regroupées au sein de l'ATMO. Une agence européenne est chargée de surveiller la pollution des villes européennes, basée sur une coopération interrégionale d'échange d'informations

(CITEAIR, 2007). Cependant, elle ne gère que la surveillance et non pas le traitement de cette pollution.

B. Une solution originale pour dépolluer l'air

La communauté scientifique s'est intéressée aux propriétés des végétaux, et a étudié les mécanismes d'épuration de l'air. En effet, les plantes peuvent absorber, assimiler et stocker certains composés volatiles polluants.

Des études menées sur la qualité de purification de l'air intérieur ont déjà été menées. En effet, nous passons 90 à 95% de notre temps dans l'enceinte de bâtiments, qui pour dans 30% des cas présentent une atmosphère néfaste pour notre santé (Wargocki, 2011), faisant souffrir des millions de personnes de cette mauvaise qualité atmosphérique (Fisk, 1997). Ces études ont montré par exemple l'action du métabolisme végétal dans la réduction de la concentration en COV d'un milieu, par oxydation photo-catalytique (Mo, 2009).

L'utilisation de plantes pour la purification des espaces intérieurs est désormais promue par des associations, qui soutiennent la recherche dans ce domaine et sensibilisent le public (Plant'airpur, 2012).

Leur utilisation est désormais démocratisée, et le monde horticole vante les mérites de ce genre de plantes. Un système mécanique a même vu le jour afin d'augmenter le rendement de purification de ce genre de plantes (Geoffroy, 2010). Ce système reste néanmoins très marginal et peu utilisé au sein des foyers, le modèle présenté ci-après étant le seul sur le marché.



Figure 2: Purificateur d'air mécanique (Geoffroy, 2010)

Si la purification de l'air intérieur est popularisée et se développe peu à peu, ce n'est pas encore le cas pour les atmosphères extérieures. Les chercheurs continuent d'étudier ce phénomène d'épuration végétale à l'extérieur, et notamment en milieu urbain. Il a par exemple été démontré que les arbres en villes jouaient un rôle dans l'élimination de l'ozone, des particules fines, des dioxydes d'azote et de soufre, ainsi que du monoxyde de carbone (Nowak, 2006).

Au contraire de la purification intérieure, celle de l'air extérieur est beaucoup moins développée. Il en veut pour preuve la rareté des politiques publiques utilisant les végétaux dans leurs actions de dépollution d'atmosphère urbaine. Les seuls documents relatant de plantes dépolluantes traitent des toitures et des murs végétalisés, et d'une incitation financière (subventions et réduction d'impôt) auprès des particuliers afin de développer ces deux pratiques (Cabinet Ernst & Young, 2009).

C. Un nouveau support urbain pour la purification de l'air

Cette purification de l'air urbain n'est pas développée dans les villes, qui regorgent pourtant d'espaces végétalisés au sein de l'espace public, pouvant être acteurs de cette purification.

Il faut avant tout définir ce que nous considérons par « espace vert au sein de l'espace public ».

L'espace public peut être défini comme la partie du domaine public (l'ensemble des biens non susceptibles d'appropriation privée) non bâti, et affectée à des usages publics. Il est ainsi composé d'espaces minéraux (rues, places), d'espaces verts (parcs, jardins publics, cimetières) et d'espaces plantés (mails, cours) (Merlin, 2010).

Nous considérons comme appartenant à l'espace végétalisé tout espace public supportant du matériel végétal. Il regroupe de ce fait les espaces verts et plantés.

Ces espaces représentent actuellement plutôt des lieux où nous nous reposons, nous détendons, où nous faisons du sport, où nous rencontrons des gens, où nous nous échappons de la ville, où nous promenons nos chiens, voire même où nous pratiquons la méditation et nous cherchons l'inspiration (Chiesura, 2004).

D. Questionnement

Il semblerait donc que sans s'en préoccuper, l'espace urbain possède les moyens de lutter contre la pollution atmosphérique qui l'étouffe de plus en plus.

Les espaces végétalisés répondent déjà aux besoins des citoyens, car ils ont été étudiés et élaborés avec cet unique objectif.

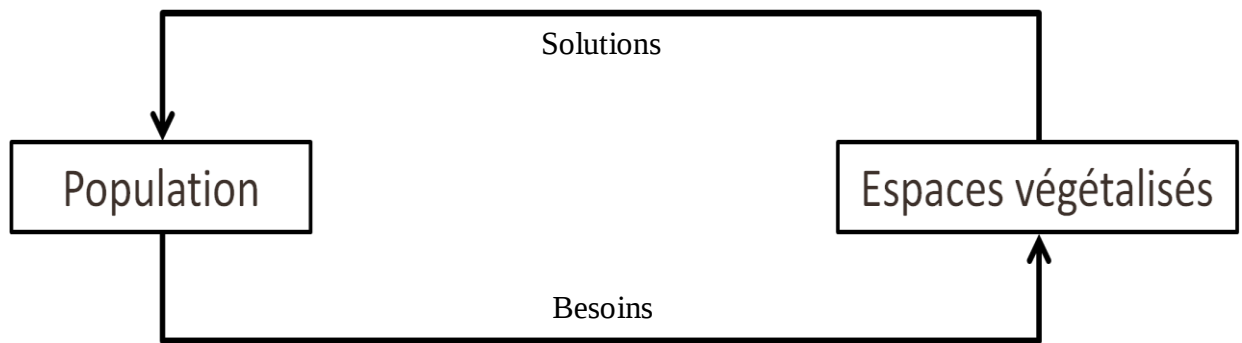


Figure 3: Schéma de relations actuelles entre la population et les espaces végétalisés (Bunel, 2012)

La population citadine exprime des besoins de nature, afin de se relaxer, de faire du sport ou bien même de promener son chien (Chiesura, 2004), et les espaces végétalisés ont été construits afin de satisfaire ses besoins, en vue d'améliorer son bien-être.

Toujours en quête de faire progresser cette existence agréable, l'Homme a besoin de faire baisser la pollution atmosphérique à laquelle il est de plus en plus confronté, pour améliorer son état de santé.

Il s'agit dans cette étude de voir si les espaces végétalisés peuvent répondre à ce nouveau genre de besoin :

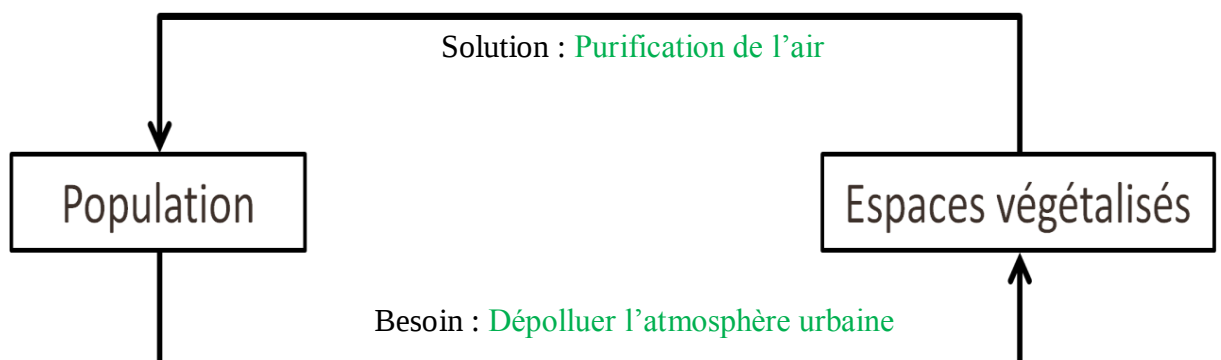


Figure 4: Schéma d'une nouvelle relation entre la population et les espaces végétalisés (Bunel, 2012)

→ Selon ce dernier schéma, cette étude va chercher à comprendre si les espaces végétalisés sont capables de purifier l'air urbain ? Et dans quelle mesure ? Si la végétation agit sur tous les types de polluants ? Quelles sont les caractéristiques optimales de purification ?

II. Méthode de travail

A. Analyse bibliographique

Ce travail se base sur l'analyse d'articles scientifiques. Ce choix se justifie de deux manières.

Choisir un cas d'étude signifiait se baser sur un cas unique et précis, qui ne s'appliquait donc qu'à une seule situation. Un cas d'étude aurait dû être à l'échelle d'une ville, possédant ses caractéristiques propres en matière de surface végétalisée, d'émission de polluants. Ce choix aurait pu se faire, mais l'objectif de l'étude aurait été tout autre. Cette idée a été émise en amont de la rédaction de cette étude, à savoir : Travailler sur la ville de Caceres en Espagne. Cette idée n'a pas été retenue car elle ne correspondait pas exactement à nos objectifs initiaux, et par le manque de données sur site.

En effet, ce travail sur la purification de l'air demande de nombreux chiffres issus d'expérimentations élaborées et souvent coûteuses, que nous n'aurions pu obtenir de la part du site Espagnol. En se tournant vers les articles scientifiques, nous accédons à un panel plus complet de cas d'étude, examinés de façon minutieuse par une communauté scientifique compétente. Nous avons ainsi accès à des chiffres précis sur la pollution et la purification de l'air, selon différents paramètres issus de différents cas d'étude. Cette solution nous offre donc une plus grande diversité de résultats, qui nous est nécessaire pour répondre à une problématique assez généraliste.

B. Critères de sélection des polluants

L'air contient différents éléments chimiques, en différentes proportions. Il a été mesuré que l'air atmosphérique contenait les proportions suivantes (Heimann, 1963) :

<i>Constituant</i>	<i>Proportion</i>
Diazote N ₂	78,08%
Dioxygène O ₂	20,95%
Dioxyde de carbone CO ₂	0,03%
Autres gaz (gaz rares)	0,94%
Dont Argon	0,93%

De par ses activités, que ce soient l'industrie ou les transports pour ne citer qu'eux, l'Homme émet des éléments chimiques dans l'air, nocifs pour sa santé et son environnement. Ils sont qualifiés de polluants.

Etant dépendants des publications scientifiques parus à l'époque de la rédaction de cette étude, il a fallu concilier les polluants que nous voulions étudier, et ceux pour lesquels des études scientifiques avaient préalablement été faites.

Il en ressort la liste suivante :

❖ Le dioxyde d'azote – NO₂ :

C'est un élément nocif pour la santé humaine, ce gaz peut irriter les poumons et diminuer la défense des voies respiratoires vis-à-vis des infections, surtout pour les personnes asthmatiques. D'un point de vue environnemental, il contribue à l'acidification des lacs, en se transformant en acide nitrique (HNO₃) ainsi qu'à la formation de pluies acides. Il agresse également les matériaux : corrosion de métaux, décoloration de tissus, dégradation du caoutchouc (Ministère de l'environnement de l'Ontario, 2010). Ce gaz est principalement issu de combustions, par l'oxydation de l'azote contenu dans le carburant. Il est donc généré par les activités consommatrices d'énergies (ATMO Poitou-Charentes, 2011).

❖ L'ozone – O_3 :

L'ozone a pour principaux effets sur la santé humaine une irritation et une inflammation des voies respiratoires, des maux de tête et des nausées, une réduction de la capacité respiratoire et une cyanose, selon la concentration d'ozone à laquelle l'individu est exposé (Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 1998). Il est fabriqué à partir de précurseurs que sont les dioxydes d'azotes (NO_x) et les composés organiques volatils (COV), sous l'action de la lumière chimique (photo-oxydation). Il a pour action sur l'environnement une dégradation des matériaux (comme le NO_2), un effet néfaste sur le rendement des cultures, et il contribue également à l'effet de serre (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 2012).

❖ Le dioxyde de soufre – SO_2 :

Egalement appelé « gaz sulfureux », le SO_2 provient principalement de l'utilisation de combustibles fossiles contenant du soufre : charbon, essence, gazole... L'inhalation de ce gaz, même en petite quantité, provoque des spasmes passagers des muscles lisses des bronchioles, ainsi qu'une augmentation de la sécrétion de mucus par la gorge et le nez. Ce composé chimique intervient également dans les pluies acides et la dégradation des matériaux (Heimann, 1963).

❖ Les particules en suspension – TSP et PM :

Ce sont des substances solides ou liquides, d'origine minérale ou organique, qui présentent une vitesse de chute négligeable, d'où leur appellation de particules en suspension dans l'air. Leur nom général est TSP, de l'anglais « Total Suspended Particles », comprend toutes les particules sans distinction. Leur taille varie cependant de quelques nanomètres à une centaine de micromètres. Ces poussières sont définies par leur diamètre : PM_{10} pour les particules inférieures à 10 μm , et $PM_{2,5}$ pour les inférieures à 2,5 μm . D'un point de vue anthropique, ces particules sont de deux natures : des cendres minérales et des imbrulés carbonés. Ces particules ont pour effet de pénétrer dans les tissus pulmonaires. Leur taux de pénétration est inversement proportionnel au diamètre de ces poussières. Certains hydrocarbures aromatiques polycycliques portés par les particules rejetées par les véhicules sont classés comme probablement cancérigènes chez l'Homme. Ces TSP interviennent dans le cycle de l'eau, en particulier lors de la formation des nuages et des précipitations. Ils influencent

alors le climat en absorbant ou diffusant le rayonnement solaire. L'ensemble des PM participent également à la dégradation des matériaux (Air Pays de la Loire, 2012).

❖ Le dioxyde de carbone - CO₂ :

Bien que présent dans notre atmosphère, sa quantité augmente continuellement depuis au moins 1960 (Earth System Research Laboratory, 2012). Il provient pour sa majorité de l'utilisation d'hydrocarbures utilisés par nos divers moyens de transport (CITEPA, Publications - Inventaires, 2012). Selon certains auteurs, cette augmentation de CO₂ atmosphérique contribuerait au réchauffement climatique de notre planète (Cox, 2000). En effet, ce gaz contribue à l'effet de serre en se concentrant au niveau atmosphérique, mais aussi à l'acidification du milieu marin (absorbant 1/3 de ces émissions), qui affecte les écosystèmes marins (Doney, 2009).

→ Etant limité par la quantité des publications et leurs sujets d'études, nous n'avons pu étudier deux autres polluants qui sont néanmoins surveillés par les associations de surveillance de la qualité de l'air : le monoxyde de carbone et les métaux lourds. Ces polluants sont très toxiques pour la santé humaine (AirParif, Les différents polluants et leur évolution, 2010).

C. Critères de sélection des articles

Nous nous sommes appuyés principalement sur deux collections de publications :

→ La plateforme d'accès électronique *Science Direct*, dirigé par la compagnie Elsevier. Il donne accès à plus de 2500 revues et 11000 livres scientifiques, avec 4 grands domaines d'études : Sciences Physiques et Ingénierie, Science de la Vie, Médecine, Sciences Humaines et Sociales. La maison de publication Elsevier est d'origine Hollandaise, et fut fondé en 1880. (Elsevier, 2012).

→ La plateforme d'accès électronique *Bio One*, donnant accès à 126 revues scientifiques dont les principaux thèmes sont la Biologie, l'Ecologie et les Sciences Environnementales. La maison de publications est originaire de Washington (USA), depuis 2000. (BioOne, 2012).

L'utilisation de ces deux journaux a été privilégiée, car ils se complètent assez bien. Le premier donne accès au plus grand nombre, couvrant assez largement toute les

publications scientifiques, tandis que le second se concentre plus sur les problématiques environnementales, dans lesquelles s'inscrit notre sujet sur la purification de l'air par les plantes.

Afin d'étudier l'épuration de l'air pollué par les végétaux en milieu urbain, les principaux mots clés de recherche efficaces des différents articles ont été les suivants :

- Avec chacun des différents polluants que nous voulons étudier : *nitrogen dioxide, carbon dioxide, carbon monoxide, ozone, total suspended particle, sulfur dioxide* et *heavy metals pollution*.
- *Air pollution*.
- *Air purification*.
- *Green space*.
- *Removal urban green space*.
- *Purification vegetal outdoor*.
- *Smog*.
- *Pollution city*

Ces recherches ont été faites en anglais, langue officielle de la communauté scientifique, dans laquelle toutes les publications sont traduites avant d'être diffusées.

D'autres recherches ont été réalisées en aparté de cette étude principale, afin de mieux comprendre la problématique et d'ainsi pouvoir détailler cette étude.

Différents objets d'études ont été sélectionnés, appartenant à l'univers urbain : les parcs, les arbres le long des routes, les forêts urbaines, et les toits végétalisés. Ces derniers représentent un cas à part, car ils n'entrent pas vraiment dans la définition d'espace public végétalisé. Ils ont néanmoins été retenus car ce sont des espaces végétalisés, supportant les espèces herbacées, qui sont comparables aux pelouses présentes dans les parcs urbains. Leurs résultats ne traitent que de leur propension à purifier un air environnant, et que l'altitude n'est pas un paramètre qui rentre en compte dans les expériences menées.

D. Détermination de la grille de lecture

Afin de traiter l'ensemble des résultats de manière cohérente, il a été décidé de considérer une grille de lecture par échelle.

- A l'échelle de la plante : Cette partie traite des caractères en matière de port végétal des individus, du fonctionnement de la purification de l'air par les plantes, de l'utilisation des différents polluants, et des variations des conditions extérieures auxquelles la plante est soumise.
- A l'échelle de l'espace végétalisé : Cette partie se concentre sur les proportions et les types d'espèces au sein de ces espaces, ainsi que sur les résultats par polluant obtenus dans l'enceinte de ces espaces.
- A l'échelle de la ville : Cette partie s'évertue à déterminer les résultats de purification de l'air à l'échelle de la ville. Elle s'appuiera sur des résultats obtenus dans les deux premières parties.

III. Résultats

A. A l'échelle de la plante

1. Absorption des polluants par la plante

Les plantes captent la majorité des polluants atmosphériques par leur système aérien, en particulier les feuilles. Ces feuilles comportent des stomates, qui sont les espaces d'échanges gazeux entre l'intérieur et l'extérieur de la plante (Jussieu, Localisation de la photosynthèse, 2008).

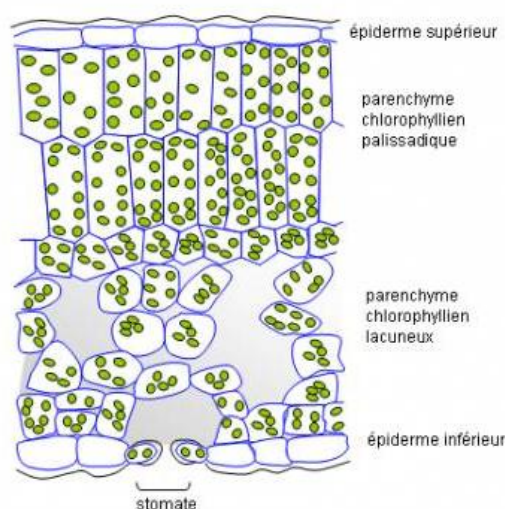


Figure 5: Coupe transversale d'une feuille (<http://svt.ac-dijon.fr>)

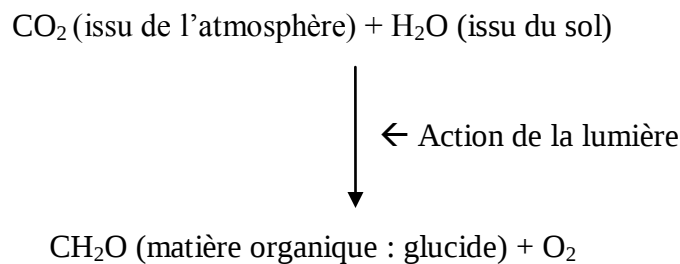
Il a toutefois été mis en évidence que certains polluants atmosphériques pouvaient être lavés par l'eau de ruissellement, s'infiltrer dans le sol, et être absorbé par le système racinaire de la plante (Getter, 2006). Ce mécanisme d'absorption ne représente cependant qu'une petite fraction des éléments chimiques prélevés par la plante au milieu extérieur.

Les éléments chimiques, polluants ou non, sont ainsi assimilés par la plante, et dégradés afin de constituer des molécules organiques indispensables à son développement.

Ainsi, l'azote du NO_2 est utilisé pour fabriquer des acides aminés et donc des protéines (Yoneyama, 1980). L'azote, qui est pourtant un fertilisant agricole intégré au sol sous sa forme minérale, a un effet néfaste pour la plante à trop forte dose, conduisant à une réduction de la photosynthèse et de la croissance, une fois le point de compensation dépassé : une concentration en NO_2 variant entre 0,2 et 2 nL.L^{-1} selon les plantes étudiées. Les concentrations atmosphériques de dioxyde d'azote sont quant à elles plus

grandes, comprises entre $0,01\mu\text{L.L}^{-1}$ et $0,4\mu\text{L.L}^{-1}$ dans différents milieux urbains étudiés (Japon, Grande-Bretagne et Etats-Unis). Les plantes pourront ainsi toujours être fournies en NO_2 par l'atmosphère environnante (Takahashi, Differential assimilation of nitrogen dioxide by 70 taxa of roadside trees at an urban pollution level, 2005).

Pour le cas du CO_2 , son utilisation intervient dans la photosynthèse. Ce processus effectué dans la chlorophylle des feuilles principalement réalise la transformation résumée suivante (Jussieu, L'équation globale de la photosynthèse, 2008):



La photosynthèse ne se réalisant qu'en présence de lumière, c'est-à-dire le jour, le CO_2 n'est absorbé que pendant la période diurne. Durant la nuit et donc l'absence de lumière, la photosynthèse s'arrête, et il ne reste que la réaction de respiration, qui elle dégage du CO_2 . La quantité de CO_2 absorbé durant le jour est cependant supérieure à la quantité rejetée la nuit (Li, 2010).

Nous pouvons également parler de bioaccumulation et biotransformation pour des éléments chimiques absorbés par la plante, qui seront soit utilisés, soit stockés dans ses tissus (Fischer, 1995).

2. Effet du port végétal

Le port végétal, qui est par définition sa silhouette, sa morphologie, joue un rôle important dans la captation d'éléments atmosphériques.

La captation de polluants est proportionnelle à la largeur de ses feuilles (Givoni, 1991). En effet, plus la surface de captation est grande, plus il est aisé à l'individu d'absorber des éléments chimiques atmosphériques car les stomates sont distribués de manière uniforme sur la plupart des feuilles.

Il a été déduit que les conifères avaient une surface de feuilles (d'aiguilles) supérieure à celle des arbres caduques, leur conférant une plus grande capacité de filtration (Bolund, 1999). Ce résultat est cependant à nuancer car une étude complémentaire à démontrer que les végétaux à feuilles caduques ont une meilleure disposition à filtrer l'air pollué que les conifères (Bolund, 1999).

Un port dense, avec les feuilles et les tiges serrées entre elles, créera des turbulences dans l'air sans réellement laisser passer l'air le long de ses feuilles pour le filtrer (Bolund, 1999). Il a ainsi été déterminé que les plantes filtrant le mieux l'air possédaient une porosité comprise entre 0,25 et 0,33. Cette porosité s'exprime par :

$$\frac{\text{Surface de lumière qui passe à travers un individu}}{\text{Surface totale de cet individu}}$$

Nous admettons alors que là où passe la lumière, l'air passe également (Shan, 2007).

Une étude a également apporté la notion suivante : les arbres ayant un gros diamètre de tronc auront une meilleure capacité de purification de l'air (Millward, 2011). Pour une même espèce, un plus gros diamètre signifie un âge de l'individu plus avancé, une maturation plus aboutie. Ainsi, un individu adulte et donc bien développé aura des performances en matière de purification plus efficaces qu'un individu jeune, encore en croissance et en développement.

3. Effet des conditions environnantes

Les plantes sont dépendantes pour leur développement de leur génotype (intrinsèque à l'espèce) ainsi que de l'environnement. Cet environnement joue également un rôle dans la capacité des végétaux à purifier l'air.

L'effet du vent a donc été pris en compte dans une publication scientifique sur les pelouses, et celle-ci débouche sur l'observation suivante : l'effet du vent est négligeable sur les espaces enherbés à la différence des espèces plus volumineuses, les arbres (Li, 2010).

La purification de l'air croît également avec la pollution environnante (Scott, 1998). Cette idée est confirmée par une expérience menée à partir de la fumigation d'espèces par deux solutions de dioxyde d'azote de concentrations différentes : les espèces absorbent plus de NO₂ lorsque la concentration est la plus élevée (Takahashi, Differential assimilation of nitrogen dioxide by 70 taxa of roadside trees at an urban pollution level, 2005).

Le climat joue également un rôle dans la dépollution atmosphérique. Un climat propice au développement végétal s'accompagnera d'un rendement de purification accru. Dans le même temps, une pluie trop abondante gênera cette purification (Takahashi, Differential assimilation of nitrogen dioxide by 70 taxa of roadside trees at an urban pollution level, 2005).

B. A l'échelle de l'espace végétalisé

Il a été démontré que les espaces urbains supportant de la végétation étaient les espaces les plus purificateurs, notamment comparés aux espaces aquatiques (Bernatzky, 1983). Leur rendement de purification est moindre, tout comme leur surface de contact avec l'air.

1. Aménagement des espaces végétalisés

La disposition des végétaux entre eux a une importance dans leur capacité à filtrer l'air. Ainsi, plus la canopée totale des végétaux d'un espace est grande, plus la capacité de cet espace à purifier l'air est importante. Une estimation a été faite à Sacramento (environ 456.000 habitants pour 257km²), où la forêt urbaine absorbe 76,5 kg de polluant par année et par hectare. Il a également été montré que la distribution de l'absorption par secteur d'étude était liée à la couverture relative de cet espace par la canopée végétale (Scott, 1998).

La densité de cette canopée tient également est un paramètre d'épuration important. Le rapport entre la surface de la canopée et la surface de l'espace étudié doit être compris entre 0,7 et 0,85 afin d'assurer une purification maximale (Shan, 2007). Il faut toutefois veiller à ce que cette densité ne conduise pas à la mort de certains individus, qui plantés trop près seraient éliminés par une compétition intra-spécifique, afin d'accéder aux ressources présentes dans le sol notamment.

La disposition des végétaux vis-à-vis de la source de pollution joue dans sa capacité à dépolluer. Il est donc préconisé de placer ces espaces végétalisés au plus près de la source, et d'avoir une largeur de plantation adéquate d'au moins 5 à 10 mètres afin de capter un maximum de pollution. Passé cette taille, le taux de réduction de la pollution tend à se stabiliser, il s'agit presque là d'un seuil. Ainsi, au sein même de ces 5-10 mètres, la pollution décroît fortement au fur et à mesure que nous nous écartons de la source de pollution (Shan, 2007).

La plantation de 100 individus d'acacias (*Robinia pseudoacacia*) le long d'une route de 1 kilomètre permet de prélever jusqu'à 9,4 kg de NO₂ par an (Takahashi, Differential assimilation of nitrogen dioxide by 70 taxa of roadside trees at an urban pollution level, 2005). Rapporté à la production moyenne de ce même polluant par une voiture, 10kg, cela reste quelque peu dérisoire (Takahashi, Assimilation of nitrogen dioxide in selected plant taxa, 2003). Ce résultat est une piste de réflexion pour élaborer ces sortes de « murs verts ». Cette idée vient confirmer le maintien voire le développement dans certains pays d'arbres le long des routes, pour des raisons de sécurité routière surtout (Court, 2010).

L'entretien de ces espaces végétalisés comporte également un intérêt dans l'efficacité de la dépollution d'un espace. Il a été démontré qu'en ne coupant pas une surface enherbée de 2000m², une ponction de 4 tonnes de particules en suspension dans l'air été faite par an (Johnson, 1988). Poussons cet exercice un peu plus loin, en calculant l'économie de polluants émis par le système mécanique nécessaire à l'entretien de cette pelouse, utilisant des combustibles fossiles et rejetant donc des dioxydes de carbone et de soufre.

La formation végétale est à prendre en compte dans l'utilisation des plantes comme purificatrices atmosphériques. Il est clair qu'il faut tenir compte de l'espace disponible, et de l'utilisation de cet espace avant de convenir du type de formation végétale à planter. Ces différentes formations n'auront pas les mêmes efficacités de filtration. Là où un parc urbain peut filtrer jusqu'à 85% de son air environnant, une série d'arbres le long d'une route ne pourra en filtrer que 70% (Bolund, 1999). Mais là où nous plantons une simple rangée d'arbres le long d'un axe de circulation, il est parfois impossible d'installer un autre type de formation, et il faut faire un compromis afin de

concilier la purification de l'air et l'activité proche empêchant l'implantation d'une formation végétale plus efficace.

2. Performance des espèces pour l'épuration

Nous avons vu que les espèces de conifères ont une plus grande propension à capter la pollution que celles à feuilles caduques, mais que malgré cela ces dernières possèdent des feuilles plus efficaces dans la purification. Il en a été déduit qu'une composition spécifique comportant ces deux types de plantes avait un meilleur taux de purification (Bolund, 1999). Cette étude est néanmoins contredite par deux études suédoises antérieures menées par J. Tolly (1988) et T. Bramryd (1993): elles estiment la capacité de filtration d'1 hectare de forêt composée de ces différentes espèces à 15 tonnes de particules par an, alors qu'un hectare d'une forêt composée uniquement d'épicéas (*Picea abies*) pourrait capter deux à trois fois plus de particules.

D'après un travail mené sur la forêt urbaine de Toronto, Canada (Millward, 2011), comprenant 309 arbres jugés matures, une sélection a été faite des 10 meilleures espèces, en fonction de leur qualité à stocker le dioxyde de carbone, et à épurer l'air en ozone, dioxyde d'azote, particules fines en suspension et dioxyde de soufre. Les chiffres obtenus sont très liés à l'environnement de ce parc, à son climat, la disposition des arbres entre eux. Ces différents facteurs non explicités au sein de la publication représentent une source de variation assez grande et ces chiffres ne peuvent donc pas être étendue à d'autres cas, cela représenterait une source d'erreur trop importante.

Nous pouvons néanmoins nous apercevoir que dans cette sélection, 90% des espèces sont des arbres à feuilles caduques. Des résultats précédemment exposés nous indiquaient pourtant que les conifères, possédant une plus grande surface foliaire et gardant leur feuillage tout au long de l'année, possédaient une plus grande capacité de filtrage de l'air. Il n'y qu'un seul conifère présent dans cette liste, et ce n'est pas l'espèce la mieux représentée ni même la plus efficace.

Preuve de la variabilité entre les espèces, nous observons un taux d'assimilation du NO₂ pouvant être multiplié par 657 entre les extrémités d'une série de 217 espèces (Morikawa, 1998). Lorsque nous parlons d'assimilation, il faut comprendre la captation de ce polluant, et la transformation de cet élément en un produit qui n'est plus polluant.

Il ressort de cette étude sur l'élimination du dioxyde d'azote quelques critères de sélection, qui sont les suivants :

→ Les espèces ligneuses sont plus efficaces que les espèces herbacées. Il faut tout de même mettre en relief dans ces dernières la famille des *Compositae* (ou *Asteraceae*) ainsi que celles des *Gramineae* (ou *Poaceae*) qui sont assez efficaces et bien plus petites que les espèces ligneuses (Morikawa, 1998). En effet, les espèces ligneuses sont pour la grande majorité plus grande que les espèces herbacées. Après avoir comparé la composition de la lignine (20% du bois, les autres 80% sont des composés cellulosiques) à celle de la cellulose (100% des tissus des espèces herbacées), il n'y a pas de différence significative : tout au plus 10% de carbone en plus dans les molécules de lignine (Hazard, 2006).

→ Les espèces d'angiospermes sont considérés comme plus efficaces que les espèces de gymnospermes. Là encore, il est démontré la supériorité des plantes qui sont principalement à feuilles caduques face à des espèces qui ont pour beaucoup des aiguilles et les gardent toute l'année (Morikawa, 1998).

Parmi 110 espèces herbacées et 107 ligneuses, une sélection de 5 espèces à été faite, basée sur leur capacité d'épuration de l'air:

- Magnolia de Kobé : *Magnolia kobus* (Esp. ligneuse)
- Gommier blanc : *Eucalyptus viminalis* (Esp. ligneuse)
- Peuplier noir : *Populus nigra* (Esp. ligneuse)
- Tabac : *Nicotiana tabacum* (Esp. herbacée)
- Bourrache : *Borago officinalis* (Esp. herbacée)

Une étude complémentaire a été réalisée seulement sur des espèces ligneuses ajoutant le critère de résistance au NO₂ à celui de l'assimilation (Takahashi, Differential assimilation of nitrogen dioxide by 70 taxa of roadside trees at an urban pollution level, 2005).

Une sélection de 4 espèces d'angiospermes à feuilles caduques en résulte :

- Acacia : *Robinia pseudo-acacia*
- Sophora du Japon : *Styphnolobium japonicum*
- Peuplier noir : *Populus nigra*
- Cerisier d'Ōshima : *Prunus speciosa*

Nous remarquons en comparant à la liste précédente que seul le *Populus nigra* est encore présent parmi les 3 espèces ligneuses sélectionnées.

C. A l'échelle urbaine

Il s'agit désormais d'évaluer l'implication des espaces végétalisés à l'échelle de la ville. Les espaces verts (parcs, jardins publics,...) représentent entre 11% et 45% du territoire des villes Européennes, respectivement à Birmingham et Sheffield, en Grande-Bretagne. Notons également que ce pourcentage est de 39% dans la capitale suédoise, à Stockholm (Fuller, 2009). Les espaces verts représentent la majorité des espaces végétalisés, les espaces plantés (mails, cours,...) étant des espaces beaucoup plus petits au sein de nos villes.

Une étude sur la forêt de Sacramento rapporte que cette dernière absorbe 76,5 kilogrammes de polluants par an et par hectare (Scott, 1998). Les polluants étudiés sont l'ozone, le dioxyde de soufre, le dioxyde d'azote et les particules en suspension. Nous n'avons cependant pas accès à la surface totale de cet espace boisé.

La forêt urbaine contient une large majorité d'espèces ligneuses : des arbres. Comme vu précédemment, ces espèces ligneuses, sont plus efficaces dans l'épuration de l'air que les espèces herbacées. La forêt urbaine est donc logiquement l'espace végétalisé épurant l'air de la manière la plus efficace.

→ Nous obtenons donc les conditions optimales d'épuration de l'air, grâce à un type d'espace végétalisé très performant.

Prenons à présent les rejets atmosphériques de la région Ile-de-France en 2007 (AirParif, Le bilan des émissions, 2007) :

- Dioxyde d'azote : 103 000 tonnes.
- Particules en suspension : 30 000 tonnes.
- Dioxyde de soufre : 25 000 tonnes.

Ces différents polluants ne représentent cependant qu'une petite partie des polluants émis dans la région. Ils représentent tout de même 158 000 tonnes pour l'année 2007.

La région parisienne fait 12 000 km², et comprend 55% de zones agricoles et 22% de zones boisées. Cela correspond à 77% d'espace non-urbanisé, soit 92 400 km² (Agence des Espaces Verts d'Île-de-France, 2011).

Admettons à présent la zone urbaine correspondant au 33% restant de cet espace, nous obtenons un espace urbain de 3 960 km². Ce pourcentage est très important et sûrement largement surévalué : à titre de comparaison, la région Centre était composée à hauteur de 17% par des espaces urbains en 2010 (Chantrel, 2011).

→ Nous obtenons ainsi des conditions de pollution faibles (ne prenant pas en compte toute la pollution), ayant un espace urbain exagérément grand. Nous obtenons ainsi volontairement une concentration de pollution atmosphérique faible.

Comparons à présent la capacité d'épuration de notre forêt urbaine ayant des conditions de dépollution favorables, avec l'émission calculée à la baisse de polluants aériens :

L'espace végétalisé est capable d'absorber 76,5 kg de polluants par hectare et par an.

Le milieu urbain de 396 000 hectares émet 158 000 000 kg de polluants par an, soit un taux de pollution de 399 kg par hectare et par an.

→ Dans le cas que nous venons de formuler, pour une surface urbaine de 1 Ha, il faut plus de 5 fois de surfaces végétalisées afin de pouvoir absorber toute la pollution émise. L'espace végétalisé n'est donc en mesure de n'absorber que 20% de la pollution émise dans l'atmosphère.

Ainsi, dans le cas d'un espace végétalisé très purificateur et d'un espace urbain relativement peu polluant de même taille, nous aboutissons à une incapacité de l'espace végétalisé à filtrer la totalité de la pollution émise.

Ce raisonnement admet cependant quelques limites, qui ne permettent d'aboutir qu'à une estimation du ratio entre « espace épurateur » et « espace pollueur ».

En effet, une approximation est faite de par les dates des données utilisés. Les mesures menées à Sacramento datent de 1998, alors que les résultats de pollution ont été obtenus au cours de l'année 2007. Comme nous l'avons vu précédemment, les émissions n'ont cessé de croître depuis quelques années (Nowak, 2006), alors que nous savons que la quantité d'air épuré par les végétaux varie en fonction de la quantité de pollution atmosphérique directement en contact de ces végétaux. Nous pouvons donc estimer qu'en 2007, le taux d'absorption de la forêt urbaine devrait être sensiblement plus élevé.

La différence d'assimilation entre les différents polluants n'a également pas été prise en compte. Dans le cas de la forêt urbaine, les résultats portent sur l'assimilation de O_3 , SO_2 et NO_2 . Dans le cas des émissions de polluants atmosphériques par la région Île de France, les éléments étudiés sont le SO_2 , le NO_2 et les particules en suspensions. Il y'a donc un polluant de plus pris en compte dans le résultat de la captation, par rapport à celui de l'émission de polluants. Cette différence surévalue l'efficacité de la captation dans notre modèle, et pourtant ceci ne suffit pas à rétablir un équilibre entre les émissions et les captations.

Lors du calcul des émissions en région parisienne, nous avons admis que la pollution était exclusivement émise par un espace urbain largement surévalué. Cette pollution urbaine doit cependant être corrigée à la baisse, car il faut prendre en compte que les espaces plus ruraux émettent des polluants dans l'atmosphère. Une part du chiffre des quantités de pollution attribué à l'espace urbain provient en vérité des espaces ruraux.

IV. Discussion

Nous avons développé les différents paramètres permettant une épuration de l'air par les végétaux, et ce à différentes échelles. Ceci nous a permis de comprendre les mécanismes qui aboutissent à la dépollution, les paramètres favorables à celles-ci, et évaluer l'efficacité des systèmes mis en place.

Notamment grâce à notre dernière étude comparant les capacités d'un espace végétalisé à épurer l'air et celles d'un espace urbain à émettre de la pollution dans l'air, on s'aperçoit que dans l'état actuel des choses, il apparaît un gros déséquilibre en faveur des espaces urbains.

Il faut cependant prendre en compte tous les paramètres favorables à l'épuration de l'air. Nous affirmons que l'espace végétalisé retenu lors de la dernière étude possède des conditions optimales de purification. Si les publications l'avaient permis, nous aurions pu compléter les paramètres offrant une efficacité maximale. Cela comprend :

- Des données sur l'aménagement de l'espace végétalisé : si nous connaissons le type de formation végétale (forêt urbaine), nous ne connaissons pas sa forme véritable, son développement par rapport aux différentes sources de pollution, ce qui a pourtant un intérêt pour une dépollution atmosphérique accrue (Shan, 2007).
- Des renseignements sur l'entretien et la gestion de l'espace végétalisé manquent également :
 - La maturité des individus (Millward, 2011).
 - La manière des services techniques d'entretenir cet espace : tailler les individus afin d'obtenir un silhouette végétale performante (Shan, 2007), laisser se développer les espèces herbacées (Johnson, 1988).
- Des informations sur les espèces présentes : Celles-ci doivent répondre à plusieurs critères, et notamment avoir une tendance naturelle à développer un port végétal opérant en faveur de l'épuration de l'air (porosité, surface foliaire) (Bolund, 1999) (Givoni, 1991). Les espèces doivent être sélectionnées méticuleusement, selon leur affinité avec les différents polluants présents sur le site et leur capacité à l'assimiler (Morikawa, 1998).

Conclusion

Cette recherche a pour but d'évaluer la capacité des espaces végétalisés urbains à épurer l'air de nos villes de manière significative. Nous voulions savoir si toute cette végétation qui commence peu à peu à investir nos villes, pour divers raisons et besoins exprimés par les citoyens, pouvaient également rendre un service écosystémique régulant aux usagers des espaces urbains : Ces espaces peuvent-ils épurer l'air ?

L'analyse construite par échelle permet d'affirmer que ces espaces parviennent à éliminer moins de 20% seulement de la pollution émise dans l'atmosphère. Cette quantité éliminée est relativement faible, sachant que ce pourcentage est obtenu grâce à des conditions largement favorables. Cette étude pourrait être complétée en analysant plusieurs cas d'études, où l'ensemble des paramètres décrits dans cette étude seraient pris en compte, afin d'affiner nos connaissances sur l'action des espaces végétalisés sur la pollution atmosphérique urbaine.

Dans les conditions actuelles que nous avons décrites tout au long de cette étude, les espaces végétalisés ne sont pas capables d'épurer efficacement l'air de nos villes.

Afin de les rendre plus performants, il faut développer l'écologie urbaine et orienter les recherches scientifiques sur les problématiques environnementales concernant le milieu urbain. Bon nombres des études analysées faisaient l'objet de recommandations afin de développer cette « technologie verte ».

L'autre solution qui doit être mise en place de concert avec la précédente s'occupe de la source du problème : les émissions d'éléments polluants dans l'atmosphère. Dans le but d'observer une rapide hausse de la qualité de l'air de nos villes, il s'agit de diminuer ces émissions. Cette solution est déjà préconisée et mise en place grâce à plusieurs accords internationaux qui visent à imposer cette réduction de pollution aux différents pays signataires. Si nous devons n'en citer qu'un : le protocole de Kyoto. Celui-ci est entré en vigueur en 2005 en France, et a pour objectif de faire baisser les émissions de gaz à effet de serre d'ici la fin de l'année 2012 : -8% par rapport aux émissions de 1990 (Nations-Unies, Le Protocole de Kyoto, 2012).

Certains articles parlaient également des « Cool Communities », traduit littéralement par « communauté fraîche » fait référence à une manière d'aménager nos villes plus verte. Elle prévoit l'installation plus systématique de trottoirs et toits végétalisés, ainsi qu'une prolifération d'arbres dans les milieux urbains. En plus d'avoir une action positive sur la qualité de l'air des citoyens, cette stratégie tend à réduire la consommation d'énergie (et donc l'émission de pollution) des systèmes de climatisation des bâtiments grâce l'effet isolant de ceux-ci (Rosenfeld, 1998).

Bibliographie

- Ministère de l'environnement de l'Ontario. (2010). *Dioxyde d'azote (NO2)*. Consulté le Avril 2012, sur Ontario - Ministère de l'Environnement: <http://www.qualitedelairontario.com/science/pollutants/nitrogen.php>
- Air Pays de la Loire. (2012). *Les particules en suspension*. Consulté le Mai 2012, sur La qualité de l'air dans les Pays de la Loire: http://www.airpl.org/cles/origine_des_polluants/les_particules_en_suspension
- AirParif. (2011). *3 catégories d'actions pour améliorer la qualité de l'air quotidienne*. Consulté le Avril 2012, sur AirParif: <http://www.airparif.asso.fr/pollution/actions-amelioration>
- AirParif. (2012). *Bilan de la qualité de l'air en 2011 en Île-de-France*. Consulté le Avril 2012, sur AirParif: <http://www.airparif.asso.fr/etat-air/bilan-annuel>
- AirParif. (2010). *Les différents polluants et leur évolution*. Consulté le Mai 2012, sur Air Parif: <http://www.airparif.asso.fr/pollution/differents-polluants>
- ATMO Poitou-Charentes. (2011). *Les émissions atmosphériques du dioxyde d'azote*. Consulté le Avril 2012, sur ATMO Poitou-Charentes - Surveillance de la qualité de l'air: <http://www.atmo-poitou-charentes.org/Les-emissions-atmospheriques-du.html>
- Barnaud, C. (2011). Vers une mise en débat des incertitudes associées à la notion de service écosystémique. *Vertigo* .
- Bernatzky, A. (1983). The effects of trees on the urban climate: Trees in the 21st Century. *Academic Publishing* , 59–76.
- BioOne. (2012). *Bio One*. Consulté le Mai 2012, sur Bio One: <http://www.bioone.org/>
- Bolund, P. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics* , 293-301.
- Boutefeu, E. (2005). La demande sociale de nature en ville. *Enquête auprès des habitants de l'agglomération lyonnaise* . Lyon: PUCA - CERTU.
- Cabinet Ernst & Young. (2009). *Etude pour la définition d'une démarche de développement des toitures végétalisées*. Nice, Côte d'Azur: Direction de l'Environnement et de l'Energie.
- CDU. (s.d.). *Espace vert*. Consulté le Avril 2012, sur Multilingual and Multimedia Tool on Environment, Town and Country Planning, Building and Architecture (MULETA): http://www.muleta.org/muleta2/rechercheTerme.do?critere=&pays=fra&typeRecherche=1&pager.offset=80&fi_id=74
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. (1998, Janvier). *Effet de l'ozone sur la santé*. Consulté le Avril 2012, sur Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail: http://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/ozone/health_ozo.html

- Chiesura, A. (2004). The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning* , 129-138.
- CITEAIR. (2007). *Comparing Cities*. Consulté le Avril 2012, sur Air Quality Now: http://www.airqualitynow.eu/comparing_home.php
- CITEPA. (2011, Mai). *Emissions dans l'air*. Consulté le 2012, sur CITEPA: <http://www.citepa.org/emissions/index.htm>
- CITEPA. (2012, Mars). *Publications - Inventaires*. Consulté le Mai 2012, sur CITEPA: <http://www.citepa.org/publications/Inventaires.htm#inv4>
- Court, M. (2010, Aout). *Des arbres le long des routes pour rouler moins vite*. Consulté le Mai 2012, sur Le Figaro: <http://www.lefigaro.fr/actualite-france/2010/08/31/01016-20100831ARTFIG00761-des-arbres-le-long-des-routes-pour-rouler-moins-vite.php>
- Cox, P. M. (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Macmillan Magazines* , 184-187.
- Daily, G. C. (1997). Ecosystem services: Benefits supplied to human societies by natural ecosystems. *Ecological Society of America* , 177-194.
- Doney, S. C. (2009). Ocean Acidification: The Other CO2 Problem. *Annual Reviews* , 169-192.
- Earth System Research Laboratory. (2012). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. Consulté le Mai 2012, sur Earth System Research Laboratory - Global Monitoring Division: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>
- Elsevier. (2012). *Science Direct*. Consulté le Avril 2012, sur Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/>
- Fischer, R. G. (1995). Bioaccumulation of methylmercury and transformation of inorganic mercury by macrofungi. *Environmental science & technology* , 993-999.
- Fisk, W. (1997). Estimates of improved productivity and health from. *Indoor Air* , 158-172.
- Fuller, R. A. (2009). The scaling of green space coverage in European cities. *Biology Letters* , 352-355.
- Geoffroy, V. (2010, Janvier). *Purificateur d'air végétal*. Consulté le Avril 2012, sur Néo-Planète: <http://www.neo-planete.com/2010/01/04/purificateur-d%E2%80%99air-vegetal/>
- Getter, K. L. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience* , 1276-1285.
- Givoni, B. (1991). Impact of planted areas on urban environmental. *Atmospheric Environment* , 289-299.

- Groot, R. S. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* , 393-408.
- Heimann, H. (1963). *La pollution de l'air*. Genève: Organisation Mondiale de la Santé.
- INSEE. (2011). *Évolution de la population totale au 1er janvier 2011 en région Île de France*. Consulté le Avril 2012, sur INSEE, Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques:
http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=20&ref_id=poptc02101
- Johnson, J. (1988). *Building Green, a Guide for Using Plants on Roofs and Pavement*. Londres: London Ecology Unit .
- Li, J.-f. (2010). Effect of green roof on ambient CO2 concentration. *Building and Environment* , 2644-2651.
- Luck, G. W. (2009). Quantifying the Contribution of Organisms to the Provision of Ecosystem. *BioScience* , 223-235.
- Lunginbühl, Y. (2001). La demande sociiale de paysage. *Conseil national du paysage*, (p. 17). Paris.
- Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. *Atmospheric Environment* , 4029-4037.
- Mehdi, L. (2010). Thèse: Structure verte et biodiversité urbaine. . *L'espace vert : analyse d'un écosystème anthropisé* . Tours: Université François-Rabelais.
- Merlin, F. C. (2010). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*. Paris: Presse universitaire de France.
- Millward, A. A. (2011). Benefits of a forested urban park: What is the value of Allan Gardens to the city of Toronto, Canada? *Landscape and Urban Planning* , 177-188.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement. (2012, Mai). *L'ozone*. Consulté le Mai 2012, sur Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/L-ozone.html>
- Mo, J. (2009). Photocatalytic purification of volatile organic compounds in indoor air: A literature review. *Atmospheric Environment* , 2229-2246.
- Morikawa, H. (1998). More than a 600-fold variation in nitrogen dioxide assimilation among 217 plant taxa. *Plant, Cell and Environment* , 180-190.
- Munns, W. R. (2009). Translating Ecological Risk to Ecosystem Service Loss. *Integrated Environmental Assessment and Management* , 500-514.
- Nations-Unies. (1997). *Les causes de la croissance urbaine*. Consulté le Avril 2012, sur Villes d'aujourd'hui, Villes de demain:
<http://cyberschoolbus.un.org/french/habitat/units/un04txt.htm>

- Nations-Unies. (1997). *Urban and Rural Areas 1996*. United Nations publication.
- Nowak, D. J. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening* , 115-123.
- Plant'airpur. (2012). *L'association Plant'airpur*. Consulté le Avril 2012, sur Plant'airpur - Le pouvoir purificateur des plantes d'intérieur:
http://www.plantairpur.fr/web2/p149_1-association-plant-airpur-.html
- Pope, C. A. (1995). Health Effects of Particulate Air Pollution: Time for. *Environmental Health Perspectives* , 472-480.
- Raudsepp-Hearne, C. (2010). Untangling the Environmentalist's Paradox: Why is Human Well-Being. *BioScience* , 576-589.
- Rosenfeld, A. H. (1998). Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings* , 51-62.
- Scott, K. I. (1998). Air pollutant uptake by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture* , 224-234.
- Shan, Y. (2007). Effects of vegetation status in urban green spaces on particle removal in a street canyon atmosphere. *Acta Ecologica Sinica* , 4590–4595.
- Takahashi, M. (2003). Assimilation of nitrogen dioxide in selected plant taxa. *Acta Biotechnolgy* , 241–247.
- Takahashi, M. (2005). Differential assimilation of nitrogen dioxide by 70 taxa of roadside trees at an urban pollution level. *Chemosphere* , 633-639.
- Wargocki, P. (2011). Productivity and Health Effects of High Indoor Air Quality. *Encyclopedia of Environmental Health* , 688-693.
- Yoneyama, T. (1980). Absorption of atmospheric NO₂ by plants and soils. *Soil Science and Plant Nutrition* , 1-7.

Table des figures

Figure 1: Bilan 2011 de la qualité de l'air en Île-de-France (AirParif,2012).....	13
Figure 2: Purificateur d'air mécanique (Geoffroy, 2010)	15
Figure 3:Schéma de relations actuelles entre la population et les espaces végétalisés (Bunel, 2012)	17
Figure 4: Schéma d'une nouvelle relation entre la population et les espaces végétalisés (Bunel, 2012)	17
Figure 5: Coupe transversale d'une feuille (http://svt.ac-dijon.fr)	25