

The image shows the interior of a large, ornate conservatory. The structure is made of a complex grid of metal and glass, with a high, vaulted ceiling. The space is filled with lush greenery, including tall banana plants with large, broad leaves on the left, and a dense forest of various ferns and other tropical plants in the center and right. A circular opening in the upper part of the structure allows light to filter through. The overall atmosphere is bright and verdant.

new babylon

construire écoresponsable / 2022
antoine hertenberger

New Babylon

Végétation et confort climatique dans la construction

Construire écoresponsable

Promotion 2022 / Mémoire de fin de formation

Sommaire

A *Première partie : Introduction*

1	Introduction	5
1.1	Méthodologie	6
1.2	Quelques définitions liminaires	7
2	Précédents historiques : des oasis à la conquête spatiale	8

B *Deuxième partie : Potentiel utile théorique du végétal* **13**

1	La nature comme indicateur	13
1.1	Biosurveillance	13
a	Les types d'indicateurs	13
b	Les types d'organismes	14
2	Le végétal comme filtre de la pollution	17
2.1	Pollution et qualité de l'air	17
a	Dispersion	18
b	Déposition	19
c	Pénétration et échanges gazeux	21
d	Réponses physiologiques	22
e	Les microorganismes commensalistes	23
2.2	Pollution et qualité des sols	24
a	Bioremédiation	25
	Phyto-extraction	26
	Phyto-stabilisation	26
	Phyto-décomposition ou phyto-dégradation	26
	Rhizo-filtration	27
	Phyto-volatilisation	27
	Phyto-stimulation	27
	Bio-immobilisation	27
	Bio-stimulation	28
	Biofiltration	28
b	Limites	28
2.3	Traitement des eaux usées	29
a	Les marais filtrants	29
b	Les plantes macrophytes	29
c	Limites	30
2.4	Isolation phonique	31
3	Le végétal comme régulateur	33
3.1	Régulation lumineuse et visuelle	33
3.2	Contrôle thermique estival	33
a	Effets de la chaleur sur la santé	33
b	La chaleur en milieu urbain : les ICU	34
c	Les flux de chaleur	35
d	Forme et matériaux	35

4	<i>Le végétal comme Support</i>	36
4.1	<i>Support de biodiversité</i>	36
4.2	<i>Qualité de vie et santé</i>	38
5	<i>Le végétal comme source</i>	39
5.1	<i>Agriculture urbaine</i>	39
C	<i>Troisième partie : Exemples de mise en œuvre</i>	41
1	<i>Façade serre</i>	41
	<i>Hall d'expositions Paris Nord, Villepinte Lacaton Vassal arch.</i>	41
2	<i>Serre intérieure</i>	44
	<i>Casa Cepe, Barrio Villa Lobos, Hudson, Argentina Adamo-Faiden arch.</i>	44
3	<i>Façades profondes et jardins suspendus</i>	47
	<i>11 de septiembre, logements & bureaux, Buenos Aires Adamo-Faiden arch.</i>	47
	<i>Edificio Bonpland, logements & bureaux, Buenos Aires Adamo-Faiden arch.</i>	49
	<i>Edificio Plaza, bureaux, Buenos Aires Adamo-Faiden arch.</i>	52
4	<i>Plantation en pleine terre</i>	55
	<i>Ilet du centre, logements, Saint-Pierre, La réunion Lab Réunion arch.</i>	55
	<i>Hotel Naman Babylon Vo Trong Nghia Arch.</i>	56
D	<i>Conclusion</i>	59
E	<i>Bibliographie</i>	60

A l'heure ou plus de la moitié de la population mondiale vit en ville, ou la réduction des territoires oblige à repenser la présence de la nature, la question de savoir comment la végétalisation de l'architecture peut contribuer à l'amélioration de la qualité de vie individuelle et collective en milieu urbain mérite d'être posée.

A *Première partie : Introduction*

1 *Introduction*

Si bien les villes et les bâtiments qui les composent sont le reflet des êtres humains, des époques et des sociétés qu'ils habitent, il s'en dégage quelques invariants qui traversent le temps et la géographie. Le besoin de s'entourer de végétation notamment semble être vital et intimement lié à la création de l'espace humain et urbain. Quelques étymologies marquantes nous éclairent sur ce sujet, *Oasis* qui nous parvient de l'égyptien démotique signifiait originellement "lieu d'habitation", pour nos ancêtres romains *Vegetare* signifiait "Croître, Animer et Vivifier"¹. De même, dans la plupart des langues européennes, les mots servant à désigner le *jardin* et le *paradis* appartiennent à la même famille que le vieux vocable persan *paradaiza*, signifiant "l'enclos du Seigneur".

De nos jours la présence de végétation est de plus en plus perçue comme un critère de qualité environnementale et de qualité de vie. Elle pourrait représenter un moyen économique de nous aider à affronter les importants défis auxquels nous devons faire face dans les agglomérations urbaines, défis qui continueront de nous contraindre dans les décades et peut-être les siècles à venir.

La densité croissante des villes reste cependant un frein important à la proportion des surfaces au sol qui peuvent être plantées, aussi il semble intéressant d'étudier et de comprendre comment la végétation pourrait coloniser les bâtiments et, ce faisant, nous aider à faire face aux impacts du changement climatique et à l'intensification d'autres problèmes associés tels que la pollution de l'air.

"New babylon" se centre sur le végétal considéré comme élément technique propre à générer un microclimat sain au sein des structures construites, ces dernières étant considérées comme parties intégrantes d'un plus grand système à échelle urbaine. Nous tenterons ainsi de limiter notre étude à des thèmes et cas de figure en lien avec les leviers de l'aménagement pour des villes durables.

1.1 Méthodologie

La question de la végétalisation des constructions humaines se trouve au confluent de nombreux champs disciplinaires et se montre rapidement un thème vaste et complexe à traiter.

L'usage de plantes concerne d'abord leur culture, la biologie végétale, et l'écologie. Végétaliser le médium construit touche à l'architecture et à tous les aspects structurels et techniques nécessaires au maintien d'un support de vie pour les plantes. Traiter d'une structure construite par l'humain et pour l'humain introduit nécessairement des considérations d'ordre social et psychologique. Le contexte urbain, par ses impacts multiples sur les êtres vivants, entraîne des considérations relevant aussi bien de l'aménagement que des sciences humaines ou encore de l'écologie. Afin de quantifier les bénéfices environnementaux potentiellement dégagés par cette association il existe enfin un important aspect d'observations et de mesures de terrain qui devraient s'appuyer sur de protocoles qui relèvent des sciences naturelles.

Après une première partie introductive, l'étude s'attache à faire le tour des recherches concernant le potentiel d'action théorique du végétal sur notre environnement, à savoir:

- . Comme **indicateur** de l'état des milieux,
- . Comme **filtre** de la pollution, de l'air, des sols, des eaux et acoustique,
- . Comme **régulateur** thermique, lumineux, hygrométrique, des eaux de pluie,
- . Comme **support** pour la biodiversité, la qualité de vie et la santé,
- . Et comme **producteur**, notamment en termes de produits agricoles de saison.

Au travers de ce tour d'horizon on constate rapidement qu'il existe de nombreuses idées préconçues sur les bénéfices de la nature, notamment en ville. Nous chercherons à dépasser ces questions de "bon sens" qui ne présentent généralement pas de véritable fondement et qui renvoient à la double dimension de la nature, à la fois culturelle et scientifique, en tachant de nous appuyer sur des ressources documentaires établies.

La troisième partie de notre travail s'attache à l'analyse de différentes solutions et aspects techniques liés à l'intégration de la végétation dans la construction au travers d'une sélection de projets réalisés. Le propos n'étant pas encyclopédique certaines solutions d'intégration, notamment celles de type pelliculaire comme les toitures terrasses ou les façades végétalisées, déjà largement traitées dans de nombreuses études, ne seront pas abordés ici.

Pour tenter d'avoir une approche globale nous nous sommes intéressés pour chaque thématique traitée à un champ d'application assez large comprenant trois échelles :

. **Les études portant sur le rôle de la végétation en milieu urbain.**

Ces investigations focalisaient généralement sur le rôle des parcs et des arbres d'alignement mais font généralement l'impasse sur le rôle complémentaire qui peut se jouer à l'échelle de la parcelle. Elles sont néanmoins nombreuses et nous permettent de mieux comprendre les interactions qui peuvent se jouer entre la

végétation du bâti et celle de la ville. Elles permettent également d'extrapoler à notre sujet un certain nombre de solutions.

. Les études à l'échelle du bâtiment, sur l'extérieur.

Pour cette catégorie ce sont les toitures terrasses végétalisées et, dans une moindre mesure, les façades vertes verticales qui accaparent de façon presque exclusive le gros des efforts de recherche.

. Les études à l'échelle du bâtiment, à l'intérieur.

Pour cette catégorie le rôle des plantes en intérieur est très souvent cantonné à leur intérêt pour l'amélioration de la qualité de l'air.

Notre objectif a été de croiser ces trois échelles pour tenter de dégager des solutions applicables aux bâtiments et de les illustrer par des exemples construits.

Ce travail s'appuie par nécessité, au vu de l'étendue et la variété des sujets à couvrir, sur une littérature très éclectique. Ouvrages publiés, sites en ligne d'organismes reconnus ou d'amateurs éclairés et surtout une foule d'études universitaires et/ou scientifiques. L'approche de ces travaux nous a semblé souvent soit trop généraliste soit complètement dévouée à une caractéristique tout à fait particulière. Il nous a été difficile de trouver une mise en perspective des différents mécanismes propres à la végétation qui soient potentiellement applicables au maintien d'un climat sain dans la construction. Deux ouvrages se détachent néanmoins : "Green Infrastructure" de John W. Dover et "Aménager avec la nature en ville" de l'ADEME, bien que tous deux focalisent nettement sur l'aménagement urbain.

1.2 **Quelques** **définitions** **liminaires**

Enfin, pour mieux cerner notre propos, quelques précisions avant de rentrer dans le déroulement du sujet :

La ville est ici entendue comme "une communauté où les humains représentent l'espèce dominante ou l'espèce clé, et où l'environnement construit est l'élément dominant contrôlant la structure physique de l'écosystème". Cette définition proposée en 2000 par le World Resource Institute présente l'intérêt d'intégrer plusieurs approches disciplinaires, de transcender les limites des frontières politiques et de considérer les populations humaines comme partie intégrante du reste de l'environnement. On y retrouve aussi l'idée que le construit sert ici de structure support à la nature.

La nature, elle, est comprise comme "l'ensemble des espèces vivantes en zone urbanisée, visibles ou invisibles à l'œil nu, qu'il s'agisse d'animaux, de végétaux, de champignons ou de microorganismes unicellulaires, ainsi que leur milieu de vie (eau & sol)"².



Carte postale : "Dans l'Oasis de Biskra", Sud Algérien.

2

Précédents historiques *Des oasis à la conquête spatiale*

L'utilité de la végétation pour l'acclimatation de l'environnement aux besoins humains est étroitement liée à l'histoire de la colonisation de la planète par l'homme. Un exemple particulièrement parlant est celui des oasis, paradigme du sujet qui nous occupe, souvent d'origine naturelle puis graduellement anthropisés pour créer de véritables microclimats permettant d'habiter des lieux particulièrement hostiles : les déserts.

Les oasis furent cruciales pour le développement des routes de commerce au travers de la péninsule arabique et du Sahara mais on en retrouve dans pratiquement tous les milieux désertiques, de certaines régions de Chine à l'Amérique du Nord et l'Amérique Centrale. Les fouilles archéologiques de Ein Gedi dans la vallée de la mer morte et de Al-Ahsa dans la péninsule arabique attestent de leur utilisation pour configurer l'habitat humain dès le néolithique soit environ -6.000ans avant J.-C.

Le schéma canonique consiste à répondre aux contraintes environnementales en gérant de façon extrêmement efficace des sources d'eau présentes naturellement sur site pour alimenter tout un système végétal généralement composé de trois strates. La première et la plus haute est le plus souvent formée par des palmiers (Date palm : *Phoenix dactylifera*) qui apportent l'ombre nécessaire à la strate intermédiaire composée d'arbres fruitiers. Ces derniers apportent à leur tour l'humidité pour la strate la plus basse : les plantations de céréales, légumes et

fouillage pour animaux. Ces derniers enfin, avec leurs déjections, fournissent l'engrais indispensable au bon développement de l'ensemble.

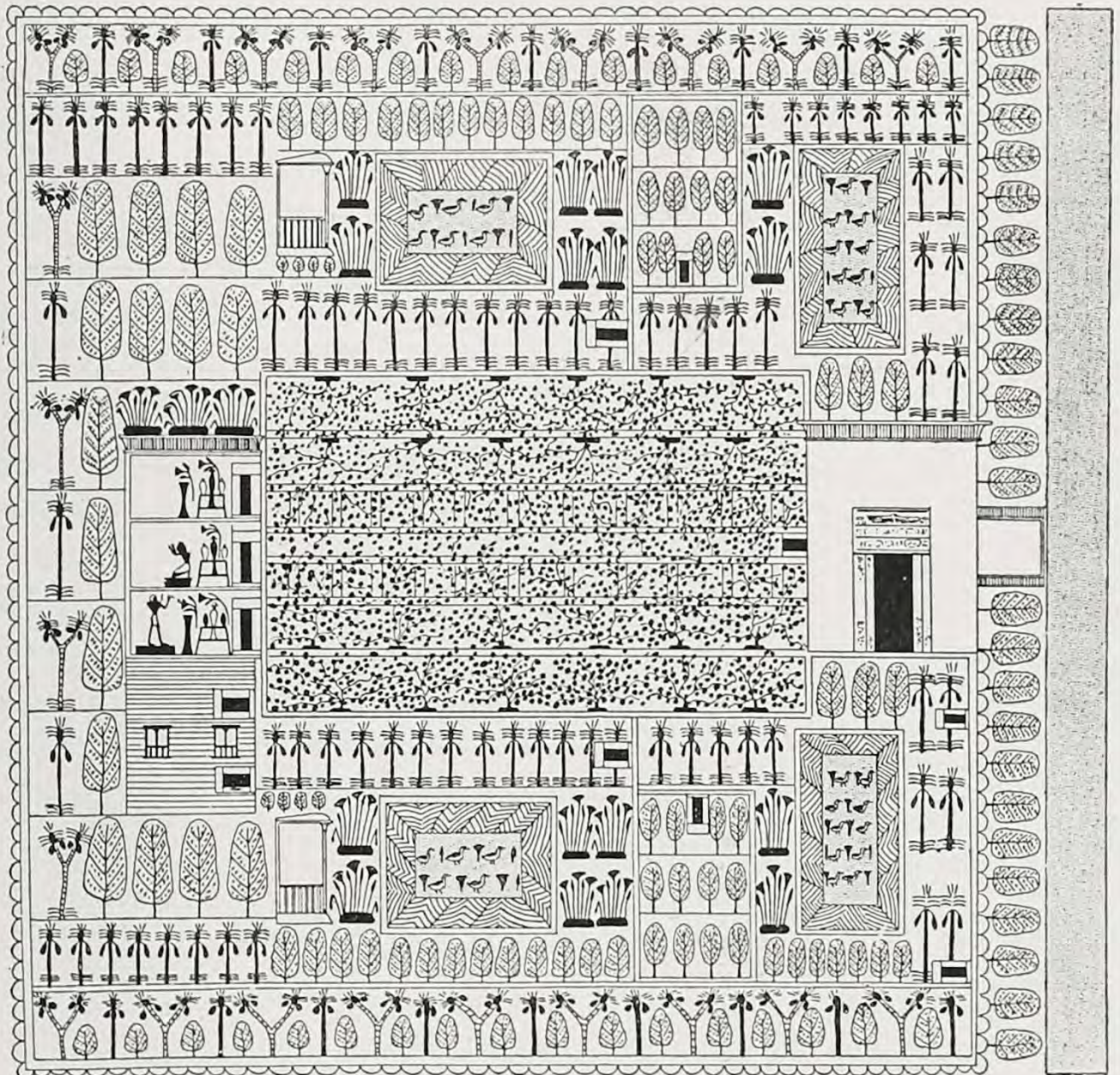
Ces trois couches végétales avec leurs points d'interaction créent une syntonie vertueuse, un véritable cocon environnemental bénéficiant de la protection contre le sable, d'un contrôle étagé des radiations solaires, du vent et de l'humidité, ainsi que de la température relative par l'évapotranspiration produite par les végétaux.



Les jardins suspendus de Babylone.

Il est tout à fait impossible de déterminer avec certitude les premiers efforts fait pour intégrer la végétation dans l'architecture. Les jardins de Babylone, l'une des sept merveilles du monde antique, construits au VI^e siècle avant J.-C par Nabuchodonosor II afin de rappeler à son épouse, Amytis de Médie, les montagnes boisées de son pays natal, sont régulièrement cités comme le premier exemple ou, à tout le moins, le plus marquant de l'antiquité. La réalité de cette construction est cependant régulièrement mise en doute et, en tout état de cause, le manque d'information à son sujet et son caractère tout à fait exceptionnel en font un objet d'étude relativement peu intéressant pour notre propos.

Il nous faut probablement plutôt regarder du côté de la confrontation de climats extrêmes à l'architecture traditionnelle pour déceler les origines de cette symbiose. Ainsi la plupart des civilisations sédentaires qui ont dû affronter des climats chauds ont développé des modèles de villas qui organisent leurs pièces à vivre autour de cours, patios et jardins plantés rafraichissants : c'est notamment le cas des villas perses, égyptiennes, grecques et romaines.



Représentation de la villa d'un noble égyptien, Tombe de Sennefer. On remarque dans ce dessin que la végétation fait partie intégrante de l'architecture et qu'elles sont toutes deux représentées avec le même degré d'importance.

Dans un effort inverse de contrôle de la température, face au froid, ce sont les toitures qui se couvrent de plantations.

***Paléarctique:**

L'écozone paléarctique est l'une des huit écozones ou régions biogéographiques terrestres. Elle correspond essentiellement aux écorégions terrestres de l'Europe, de l'Afrique du Nord, des deux-tiers nord de l'Asie (au nord de l'Himalaya), et du Moyen-Orient.

Cette technique existe vraisemblablement depuis le néolithique (12500 à 8000 av. J.-C.) dans les zones **paléarctique*** et **néarctique*** et fait encore partie des traditions des Amérindiens d'Amérique du Nord.

On en retrouve de nombreux exemples datés à partir de 1000 après J.-C. en Scandinavie et en Islande ou même sur des vestiges de huttes Vikings en Irlande et en Ecosse ou au Canada.

***Néarctique:**

L'écozone néarctique couvre l'essentiel de l'Amérique du Nord, et inclut le Groenland et la partie nord du Mexique.

La même technique semble s'être développée de façon indépendante au Kurdistan³ (Turquie, Irak, Iran et pays avoisinants) et sera reprise beaucoup plus tard, vers la fin du 19^e siècle par les premiers colons canadiens et américains des grandes plaines, de Terre-Neuve et de la Nouvelle-Ecosse^{4/5/6}.



Reconstitution du village scandinave de l'"Anse aux Meadows" établi peu avant l'an mil sur l'île de Terre-Neuve au Canada.

A quelques variations près le principe est toujours le même, une épaisse couche de terre, tourbe ou d'algues dans laquelle on plante des végétaux, généralement des graminées, pour stabiliser un ensemble isolant, étanche à l'air et à l'eau, résistant au vent et au feu. La contrepartie de ces toitures lourdes, dont la charge totale peut aisément atteindre les 500kg/m² en hiver avec l'humidité et la neige, est qu'elles exigent des charpentes conséquentes qui doivent être protégées de l'humidité par un matériau peu putrescible. Usuellement des tuiles de bois, des plaques d'écorce de bouleau déroulées dans les pays scandinaves ou encore des tuiles canal en Iran.

La végétation s'invite aussi dans les constructions sous bien d'autres formes et pour bien d'autres raisons, des toitures plates plantées de l'empire aztèque aux cités agraires du Sud-Est asiatique. On la retrouve encore au moyen Âge ou à la Renaissance, synonyme de statut social, sur les toits verts de la ville de Gênes.

A partir du milieu du XIX siècle le développement des matériaux et des techniques de construction modernes permettent l'avènement des immeubles à toit plat⁷. Les architectes modernes du milieu du XXe siècle canonisent bientôt son usage et développent les premiers modèles contemporains de jardins sur les toits. Les toitures plantées sont probablement à nos jours la forme d'introduction de la végétation dans l'architecture la plus répandue.

A la fin des années 60 l'Allemagne qui connaît une rapide période d'industrialisation et d'urbanisation se lance dans la construction à très large échelle de nombreux logements à prix modique avec des toits plats. Ces derniers étaient alors couverts de matériaux d'étanchéité goudronnés hautement inflammables qu'il fallait protéger avec du sable et du gravier pour réduire les risques d'incendie. Ces innombrables toitures terrasses furent alors colonisées par de la végétation spontanée donnant naissance à une véritable marée verte⁸. À la suite de cette expérience, la présence de groupes de pression écologistes, les recherches scientifiques de plus en plus nombreuses sur la technologie des toitures vertes et un public soucieux de l'environnement sont autant de conditions

qui vont créer un climat social et politique favorable à l'implantation des toitures végétalisées en Allemagne⁹.

C'est ainsi le premier pays où les toits verts ont véritablement pris leur essor et sont passés de pratique vernaculaire à pratique durable.



La cité des étoiles, Givors, 1981, Jean Renaudie & Renée Gailhoustet

B

Deuxième partie

Potentiel utile théorique du végétal

1

La nature comme indicateur

1.1

Biosurveillance

Selon l'INRA la biosurveillance consiste à mettre en évidence une altération d'un environnement (une pollution par exemple) à travers les réponses des organismes qui y vivent. Elle passe par exemple par la surveillance de certains organismes vivants, que ce soient des végétaux, des animaux ou des microorganismes, pour se renseigner sur la qualité de l'air et des sols et plus généralement sur le bon fonctionnement des écosystèmes dans un milieu déterminé.

L'exemple le plus connu est sans doute celui des canaris que l'on descendait dans les mines de charbon au début du 20^e siècle pour déceler la formation de poches de monoxyde de carbone.



Canaris attendant de descendre dans la mine de Granville Colliery, UK.
Photo David Bagnall

Les types d'indicateurs

La biosurveillance repose principalement sur trois types d'indicateurs :

Les bioindicateurs

La présence ou l'absence de certains organismes ainsi que leur densité et les modifications comportementales et/ou physiologiques qu'elles démontrent permettent de renseigner sur la présence de certains contaminants auxquels ils sont associés. De la même manière ces organismes renseignent sur l'état et le bon fonctionnement de tout un écosystème.

On distingue¹:

. *la bioindication passive* qui se fait à partir des végétaux naturellement présents dans l'environnement et dont on connaît la sensibilité au polluant recherché.

. et la *bioindication active* où l'on expose à un environnement pollué, dans des conditions normalisées, des végétaux préalablement cultivés en atmosphère saine.

Les bio-accumulateurs

Ces indicateurs reposent sur la capacité qu'ont certaines espèces vivantes de concentrer dans leurs tissus différentes substances polluantes. L'étude de ces accumulations permet de quantifier la présence de ces polluants. On utilise généralement les lichens et les mousses pour étudier la contamination de l'air et les plantes et les escargots pour analyser celle des sols.

Les biomarqueurs

Dans ce cas ce sont les effets sur le métabolisme ou l'ADN de différents organismes qui peuvent permettre de recueillir des renseignements sur une série de contaminants. Ce type d'indicateur est plus complexe à manier car il requiert d'analyses en laboratoire pour déceler les modifications recherchées.

La biodisponibilité

La mesure des polluants accumulés dans les tissus différents organismes permet également de caractériser le potentiel de transfert des contaminants des milieux (air, sol et eau) vers les maillons supérieurs de la chaîne alimentaire. Soit des producteurs primaires, les végétaux par exemple, vers les consommateurs primaires comme les escargots, puis vers les consommateurs secondaires tels les hérissons ou vers les détritivores-décomposeurs comprenant les vers de terre et les hérissons.



Lichen : *Ramalina menziesii taylor*, prélevé sur un chêne Californie, photo Jason Hollinger

Les types d'organismes

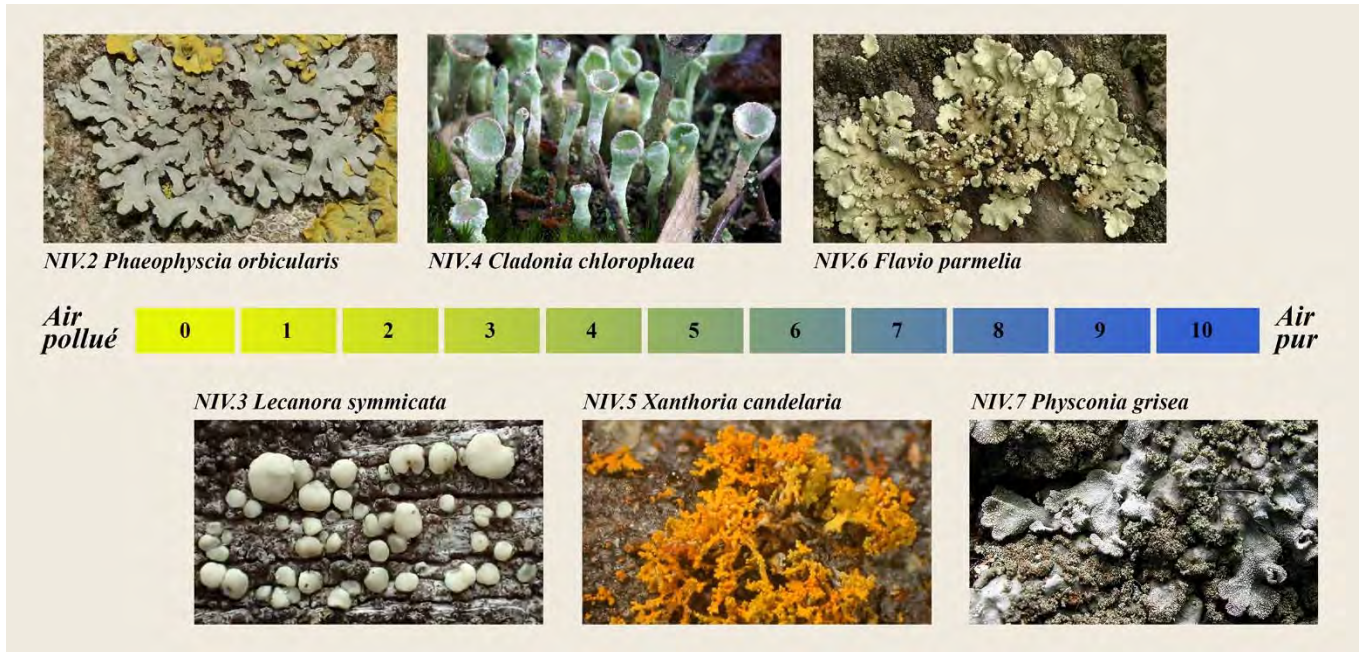
Ces trois types d'indicateurs se répartissent à leur tour en trois types d'organismes :

Les lichens et les mousses

Les lichens ne possèdent ni cuticule, ni stomate pour se protéger, ils absorbent les polluants en même temps que les éléments qui leur sont essentiels pour vivre². Ils sont ainsi particulièrement sensibles à la pollution et constituent un bioindicateur majeur de la qualité de l'air.

Différentes espèces sont classées en fonction de leur résistance à la pollution pour permettre de créer une échelle de correspondance entre lichens et qualité de l'air.

Les mousses de leur côté sont utilisées pour leur rôle de bio-accumulateurs, notamment des polluants métalliques aériens. Certaines espèces vivant en contact avec les milieux aquatiques permettent de réaliser le même travail de suivi sur l'état des eaux.



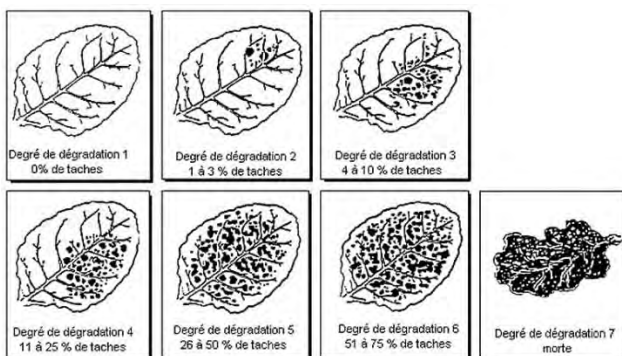
Échelle de la qualité de l'air basée sur la présence de lichens répertoriés.

Les plantes

Différents types de plantes renseignent sur différents types de pollution, ainsi par exemple l'herbe Raygrass, souvent utilisée comme plante fourragère, est utile dans la détection de pollutions métalliques alors que le tabac est un très bon indicateur de la pollution par l'ozone.

Les plantes constituent également un important outil de sensibilisation pédagogique : en ville les services des espaces verts peuvent aisément installer des stations de biosurveillance ouvertes au public et aux écoles.

Depuis 2014 la ville d'Antony a par exemple installé 700 plants de différents végétaux (choux frisés, tabac, pétunia, ray-grass, glaïeul, chlorophytum, ivraie et mousse) sur une dizaine de sites, dont des écoles, pour surveiller la qualité de l'air et informer les habitants.



Effet de l'ozone sur les feuilles de tabac, à gauche Carte de densité des taches pour déterminer le degré de dégradation.

*La faune et les
microorganismes*

De très nombreuses espèces sont utilisables comme indicateurs. Les truites par exemple ont été utilisées jusqu'à récemment, notamment au réservoir d'eau de Montsouris à Paris, pour déterminer si l'eau était potable.

Les vers de terre sont eux à la fois bioindicateurs, bio-accumulateurs et biomarqueurs de la qualité des sols. Les escargots permettent par la bioaccumulation de caractériser à la fois le niveau de pollution des sols et de l'air.

Les sols renferment un nombre incroyablement élevé d'organismes vivants indicateurs, des vers de terre aux nématodes en passant par les collemboles, les bactéries ou les acariens.

Leur diversité et leur activité est très utile pour caractériser la qualité et l'évolution d'un sol dégradé, son niveau de contamination ou le potentiel d'un espace à supporter des espaces verts et des jardins ou pour suivre dans le temps les effets de modes de gestion des sols.

2.1 *Pollution et qualité de l'air*

La question de savoir si la végétation pouvait jouer un rôle significatif dans l'amélioration de la qualité de l'air est curieusement assez ancienne et précède la révolution industrielle : l'abbé Pierre-Nicolas Bertholon de Saint-Lazare tentait déjà d'y répondre au milieu du XVIII^e siècle dans son ouvrage "De l'électricité des végétaux"¹.

Il faudra cependant attendre les années 70 pour que cette même question prenne de l'ampleur et pour qu'essaient les premières études sur le sujet. La National Aeronautics and Space Administration (NASA) lui donnera ses lettres de noblesse en 1989 en réalisant conjointement avec l'Associated Landscape Contractors of America (ALCA) une étude d'envergure, le Clean Air Study², portant sur l'utilisation de filtres biologiques pour purifier l'air confiné des stations spatiales. L'étude permettra notamment de démontrer que, au-delà de la captation de dioxyde de carbone et de la production d'oxygène, des plantes tout à fait communes pouvaient séquestrer des Composés Volatils Organiques (VOC) comme le benzène, le formaldéhyde et le trichloroéthylène.

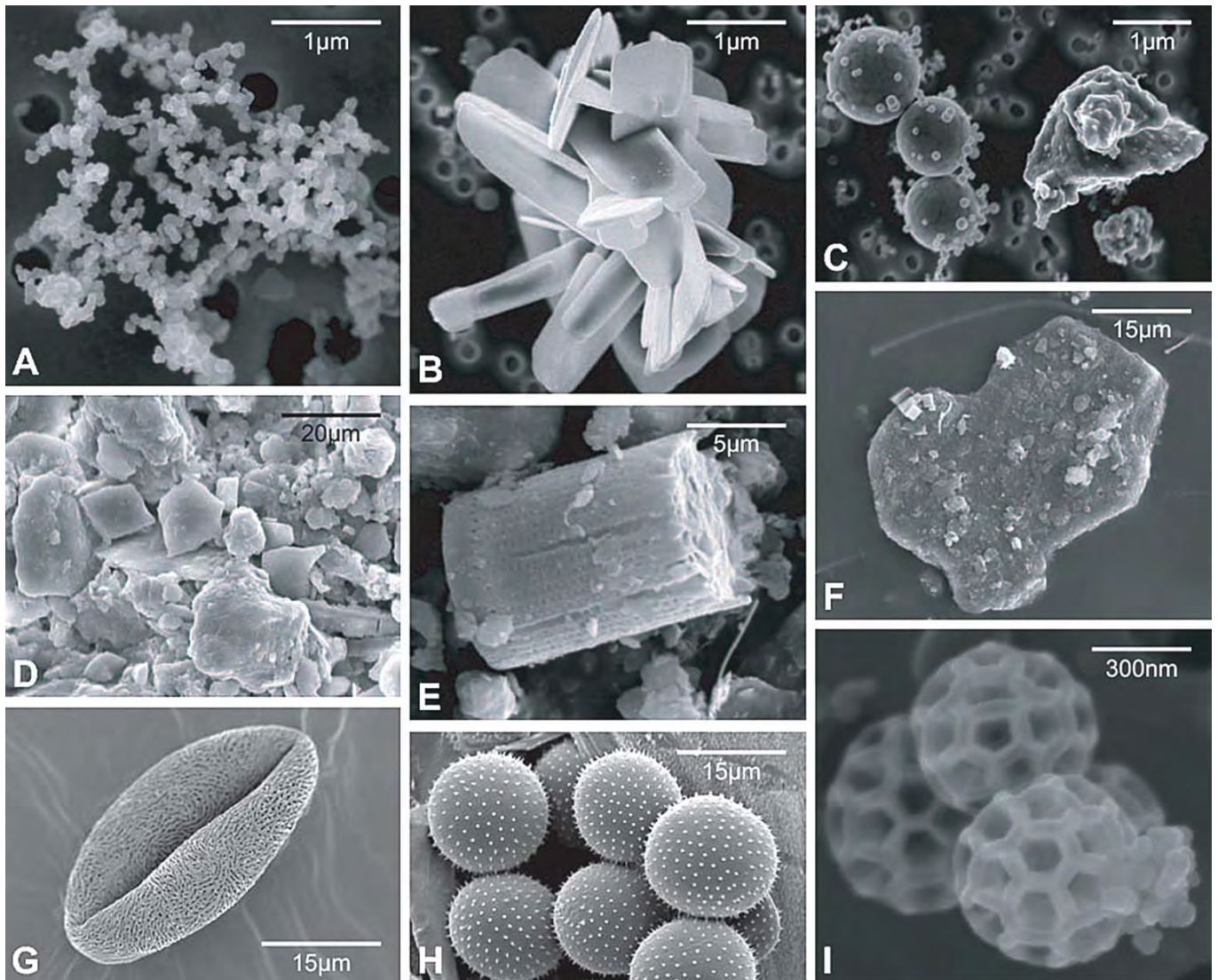


Abbé Pierre Bertholon, *De l'électricité des végétaux*, Paris : Didot Jeune, 1783.

Pour comprendre comment les plantes peuvent jouer ce rôle purificateur il faut d'abord savoir que l'air que nous respirons est contaminé par un ensemble de gaz et de particules en suspension dont les niveaux de concentration varient en fonction des émissions et des conditions météorologiques³. Ces polluants, nuisibles pour la santé et l'environnement, ont des sources très diverses.

En extérieur elles peuvent être d'origine naturelle (pollens, poussières des déserts, poussières et gaz des volcans en éruption, feux, ...) ou bien d'origine **anthropique***. Ces dernières peuvent être à leur tour primaires, c'est à dire directement issues des sources de pollution (trafic routier, industries, chauffage, agriculture, ...) ou secondaires, soit le résultat de réactions chimiques et photochimiques de ces éléments relâchés dans l'air.

**Anthropique* :
dû à l'activité humaine.



Vues prises au microscope électronique à balayage (MEB), Université de Bâle. A-C : particules anthropogéniques, D-I : particules naturelles.
 A : Agrégats de particules de suie; B : Cristaux de Ca-sulfate issus de processus de combustion; C : Sphères et plagioclases de magnétite, même origine;
 D : Calcite et argiles du désert du Sahara, collectés à Barcelone; E : Diatomée et poussière du Sahara, collectées à Santa Cruz de Tenerife; F : Illite, cristaux d'halite, poussière du Sahara, même origine que E; G : Pollen de Buisson au colibri (*Hamelia patens*); H : Spores de rouille brune du blé (*Puccinia triticina*); I : agglomérés de brochosomes issus des carapaces de cicadelles.

Les différents types d'interaction entre végétation et ces différentes sources de contaminations se classent consensuellement en trois catégories:

2.1.a *Dispersion*

Lorsqu'un flux d'air contaminé rencontre les feuilles et ramifications de plantes au cours de son déplacement celles-ci modifient son écoulement en créant des pressions et dépressions qui favorisent le brassage avec de l'air non vicié. C'est cette dilution des contaminants qui est qualifiée de dispersion.

Le phénomène présente évidemment deux lectures, on peut en effet considérer qu'un air contaminé réduit sa concentration en polluants par ce mécanisme en se mélangeant à de l'air sain ou, à l'inverse, que ce mécanisme favorise la contamination d'un air sain par brassage avec une arrivée d'air pollué... En tout état de cause le phénomène en soi ne retire pas de contaminants de l'air ambiant, il les disperse en réduisant leur concentration ce qui peut toutefois permettre une meilleure absorption des polluants par d'autres mécanismes.

2.1.b Déposition

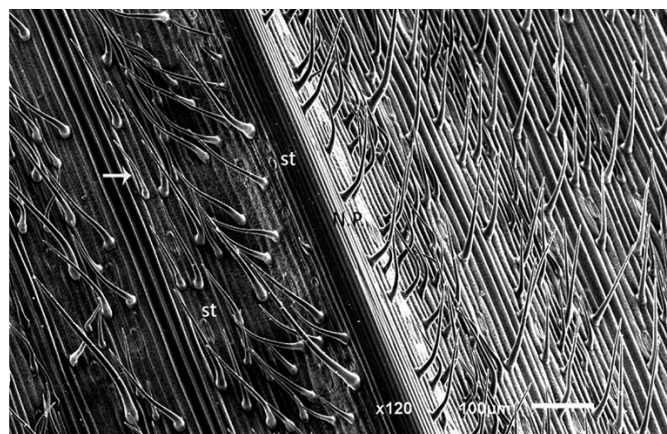
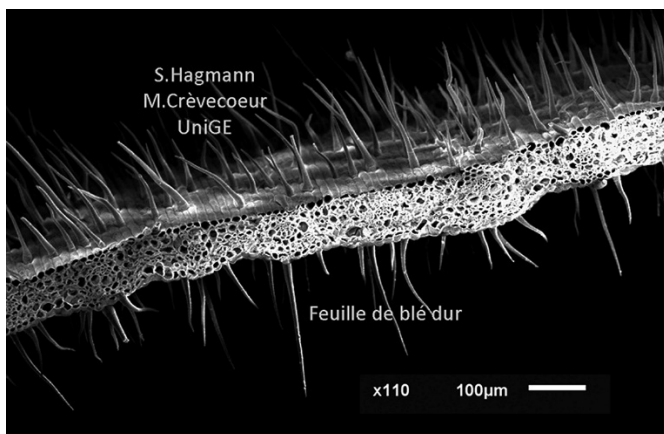
***Adaxial / abaxial :**
dont la direction est tournée vers la tige ou vers l'axe. Se dit de la face supérieure des feuilles. À l'opposé la face inférieure est dite **abaxiale**.

***Stomates :**
pores à la surface des feuilles qui permettent les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère

Ce brassage de l'air au travers des plantes favorise également la déposition des poussières et matières résiduelles sur les feuilles, plus généralement sur sa face **adaxiale***. Ce mécanisme se révèle particulièrement efficace puisque, à titre de comparaison, une plante peut recueillir sur ses feuilles de 10 à 30 fois plus de poussières fines qu'une surface équivalente de béton.

Cette déposition peut se faire de manière mécanique : certaines particules se déposent en choquant contre les feuilles, les plus lourdes se déposent par leur poids tandis que les plus légères peuvent rester attrapées par les micro-poils, les rugosités de surface et les **stomates*** ainsi que par les **cires épicuticulaires***.

L'électrostatique joue également un rôle important dans le phénomène de déposition: la charge électromagnétique créée par l'évapotranspiration à la surface des feuilles attire les particules fines et les gouttes en suspension.



Vues prises au MEB, Michèle Crèvecoeur, www.unige.ch. À gauche coupe sur une feuille de blé dur, à droite détail de la face abaxiale avec les poils clairement visible et indication des stomates (st).

***Cire épicuticulaire :**
Couvre la **cuticule*** des plantes et des insectes. Elle est constituée de composés appartenant à un vaste groupe de substances lipophiles, qui diminuent la mouillabilité de la surface et réduit la perte d'humidité.

***La cuticule :**
est la couche externe qui recouvre et protège les organes aériens des plantes terrestres, des champignons et les organes de certains animaux.

La cire présente sur la surface des feuilles piège alors, de façon plus ou moins efficace selon leur taille et leur composition, ces différents éléments. Le vent vient cependant mitiger l'efficacité de ce système de déposition en tendant à suspendre à nouveau dans l'air les particules les plus lourdes.

Une partie des contaminants est ensuite absorbée par la plante par le biais de mécanismes que nous verrons plus loin. Le reste est ramené au sol, soit par le lessivage de la pluie, soit au moment de la chute des feuilles. La dégradation des contaminants s'y continuera alors par le biais d'autres mécanismes.

Il est généralement considéré que les arbres persistants, dont les feuilles peuvent rester en fonctionnement jusqu'à cinq ans, sont plus efficaces pour la captation de ces contaminants. En effet la quantité de particules captées varie grandement d'une espèce végétale à l'autre. Une étude portant sur différentes espèces d'arbres a permis de déterminer par exemple que l'orme captait 2,7g de particules sur une période de 15 jours pour 100 grammes de feuilles alors que le tilleul n'en captait que 0,9g. Selon l'ADEME⁴ on peut toutefois considérer qu'en moyenne un arbre mature peut piéger jusqu'à 20kg/an de particules.

À l'échelle d'une ville comme Madrid les arbres d'alignement permettent ainsi de capter 16,8kg de métaux par an (molécules de métaux associées aux particules des pots d'échappement, sans considérer les autres particules).

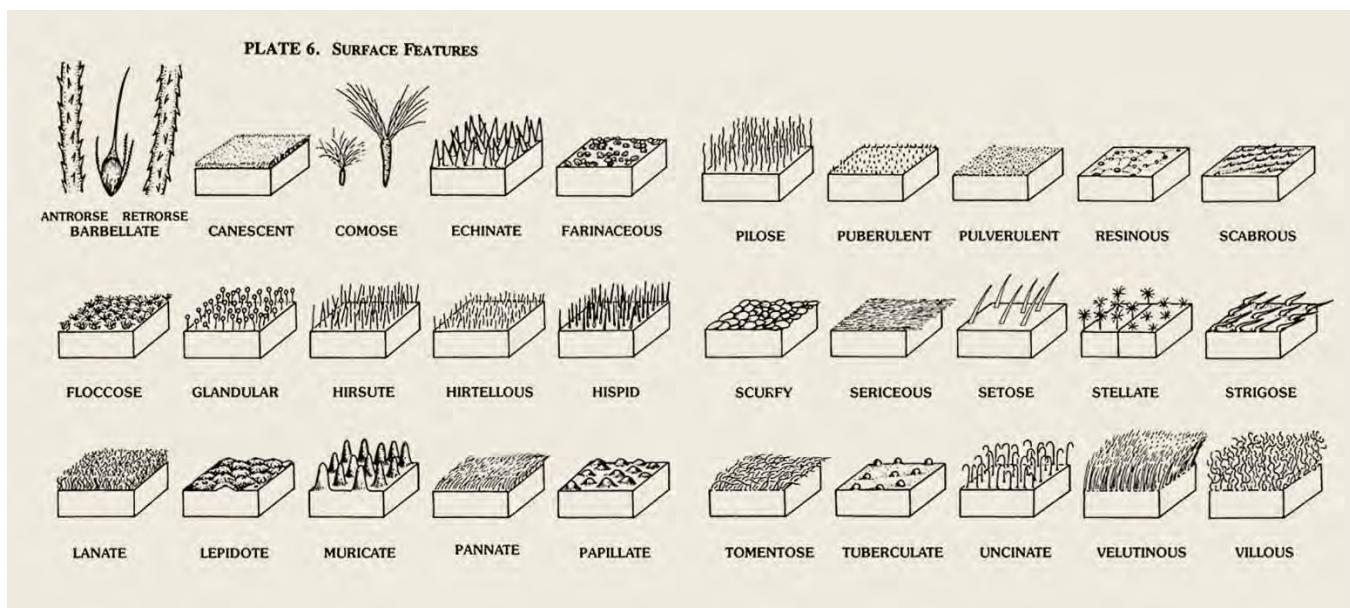
***PM₁₀** :
 Les PM₁₀ regroupent les particules (Particulate Matter) de diamètre inférieur à 10 µm qui sont généralement considérées comme les plus toxiques.

Les données collectées sur Chicago⁵ permettent d'estimer que les arbres de la ville retiennent environ 212t par an de **PM₁₀***. Sur l'ensemble des USA cette valeur atteint les 711.000t par an ce qui peut sembler de prime abord colossal mais est à relativiser (et c'est ce qui est en fait vraiment impressionnant) car ces valeurs ne représentent que 0,2 à 1% des PM émises sur la même période.

Les données collectées à Londres permettent toutefois d'estimer que les zones les plus densément plantées, soit un couvert végétal sur environ 56% de la surface considérée, peuvent absorber jusqu'à 26% des PM₁₀ en suspension dans l'air.

En forêt, en fonction des espèces constitutives, on estime que le dépôt particulaire oscille entre 280 et 1.000kg par hectare⁶.

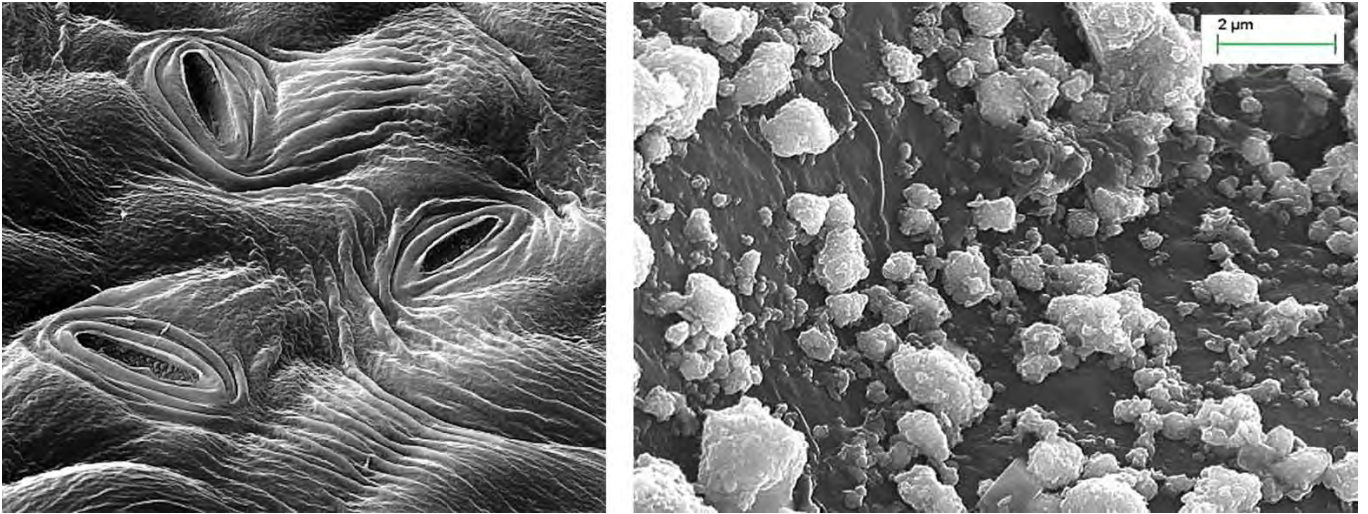
L'efficacité de ce mécanisme de déposition dépend cependant de très nombreux facteurs et peut varier dans un ordre de magnitude allant jusqu'à vingt fois. La forme des feuilles, leur structure, la rugosité de surface (reliefs, cires, poils, etc.) sont autant de caractéristiques déterminantes pour attraper et retenir les particules néfastes. La quantité et la géométrie du branchage ainsi que la forme générale de la plante jouent elles un rôle dans le freinage du déplacement de ces particules et de leur dispersion pour faciliter leur déposition. La densité du feuillage est également particulièrement déterminante. On la caractérise par le Leaf Area Index (LAI) soit la surface totale des feuilles par rapport à la surface couverte au sol par la plante, en principe plus cet indice est élevé plus la plante est efficace.



Swink F. & Wilhelm G. : 1994. Plants of the Chicago region. 4th ed. Indianapolis: Indiana Academy of Science
 Comparatif de différents types de surfaces de feuilles de plantes de la région de Chicago.

Sur 6 espèces d'arbres étudiées à Madrid⁷ le cèdre, l'orme et le pin parasol se sont révélées être particulièrement efficaces pour capturer les métaux lourds sur les feuilles tandis que le marronnier d'inde, le platane d'orient et le chêne vert se sont en revanche montrés nettement moins performants de ce point de vue. De nombreuses études ont permis de démontrer que les aiguilles des conifères sont généralement plus efficaces dans la captation de ces particules pour différentes raisons. Leur morphologie joue un rôle important, leur plus grande résistance à la déformation en cas de vent aussi, ces deux facteurs combinés leur permettent d'augmenter leur porosité par vents forts alors que pour les arbres caducs l'effet est inverse.

Enfin la hauteur et la densité de plantation constituent les derniers paramètres à considérer. Ainsi une plantation très dense forme barrière et dévie l'air sans le filtrer mais une plantation trop lâche ne pourra pas remplir non plus efficacement son rôle. Ces variables doivent donc être manipulées en fonction des problèmes à traiter, il peut notamment être souhaitable de faire barrière contre une source de nuisances importante.



Vues prises au MEB, Michèle Crèvecoeur, www.unige.ch. À gauche trois stomates, à droite dépôts de divers contaminants à la surface d'une feuille.

2.1.c Pénétration et échanges gazeux

***Xénobiotique :**
Molécule d'origine étrangère à un organisme, présente exceptionnellement dans l'organisme et qui n'est ni un substrat, ni un produit habituel des réactions métaboliques.

Le métabolisme des plantes est basé sur les échanges gazeux entre les tissus végétaux et leur environnement. Ils se font pour la plupart des espèces au travers de leurs stomates généralement situés sur la face abaxiale des feuilles. Ces ouvertures de 4 à 10 nm constituent le principal chemin d'entrée pour les gaz et liquides **xénobiotiques*** ainsi que celui d'une partie non négligeable des particules ultrafines, soit les particules inférieures à 0,1 microns (taille d'une molécule d'ADN ou d'un virus). Il peut également exister une légère pénétration par les tiges et le tronc.

Mais avant de pénétrer la plante, le gaz polluant va d'abord devoir traverser la couche d'air non agitée au contact des feuilles. L'épaisseur de cette couche, dite couche limite, bien que subordonnée à la morphologie des feuilles, est généralement de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres.

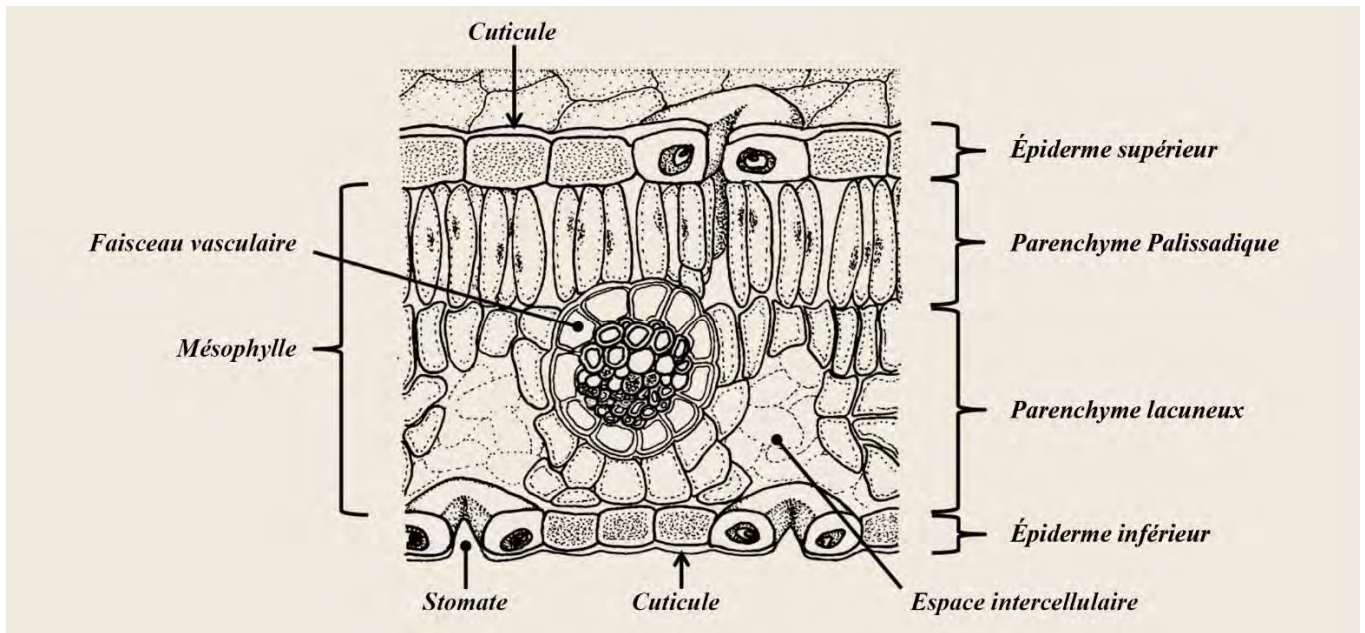
Le polluant, au passage par cette couche, est susceptible de réagir avec différents éléments : Il va tout d'abord rencontrer une phase gazeuse constituée des composants de l'atmosphère et des émissions de la feuille. Il va ensuite se retrouver en contact avec une phase aqueuse constituée du film d'eau présent en surface de la feuille ainsi que de l'eau liée aux groupes polaires de la cuticule. Il va enfin se heurter à une phase lipidique constituée des cires présentes au sein ou en surface de la cuticule.

Selon la nature des réactions qui auront lieu ou non au niveau de cette couche limite, la concentration du polluant qui va pénétrer dans la plante peut varier fortement. Certains produits de ces réactions peuvent même se montrer plus phytotoxiques que le polluant lui-même.

***Lipophile :**
La lipophilie caractérise l'affinité chimique d'une matière ou d'une molécule pour les graisses.

Une partie des polluants organiques, qui n'auront pas pénétré la plante par les stomates, va être absorbée au niveau des feuilles au travers de la structure lipidique que constitue la cuticule. C'est le cas notamment des particules **lipophiles*** telles que les hydrocarbures aromatiques qui seront ainsi

transportées plus profondément vers les cellules parenchymes (voir schéma) ou elles seront détoxifiées. Les polluants vont ensuite se diffuser soit en traversant les cellules (circulation symplastique) soit en se déplaçant entre celles-ci (circulation apoplastique).



Coupe de détail sur une feuille type. Ivy Livingston, image modifiée, Wikipedia : Parenchyme.

En botanique, les parenchymes sont des tissus végétaux constitués de cellules vivantes, à paroi mince, perforées de ponctuations qui permettent des communications intercellulaires et une circulation des substances par l'intérieur des cellules (dite circulation symplasmique). Elles peuvent être jointives (Parenchyme palissadique) mais elles présentent souvent des décollements ce qui favorise le développement de micro-organismes endophytes. Le développement de ce réseau de cavités peut conduire à la formation d'espaces importants (Parenchyme lacuneux). Ces espaces permettent une circulation des substances par l'extérieur des cellules (dite circulation apoplastique).

La cuticule des plantes est cependant une barrière de protection dont l'efficacité, variable en fonction des types de plantes et de leur état phytosanitaire, va déterminer le taux d'absorption de ces polluants.

2.1.d Réponses physiologiques

Après pénétration, la réponse physiologique des plantes à la pollution atmosphérique pour se protéger de sa toxicité va dépendre de nombreux facteurs, dont les caractéristiques propres à chaque espèce ainsi que la nature de la pollution.

Conjugaison

La méthode prédominante, la conjugaison, consiste à lier les contaminants à des composés cellulaires comme les protéines, les saccharides, la lignine, les acides aminés ou organiques pour réduire substantiellement leur toxicité.

Les conjugués créés peuvent alors rester suffisamment longtemps dans les cellules pour être dégradés peu à peu par le système enzymatique des plantes.

Compartment- alisation

***Vacuoles** :
Compartiment d'une cellule
végétale qui contient une
solution aqueuse.

Une autre possibilité est que ces conjugués créés par la plante soient ensuite déplacés pour être stockés sur le long terme mais de façon compartimentalisée loin des organes sensibles.

Les conjugués solubles dans l'eau sont stockés dans les **vacuoles***, tandis que ceux lipophiles s'accumulent dans les parois des cellules. Certains peuvent également se retrouver dans les espaces extracellulaires.

Volatilisation

Ces conjugués peuvent aussi être excrétés à nouveau vers l'atmosphère, une fois leur toxicité contrôlée, par le biais de l'évapotranspiration.

2.1.e Les microorganismes commensalistes

*Phytobiote :

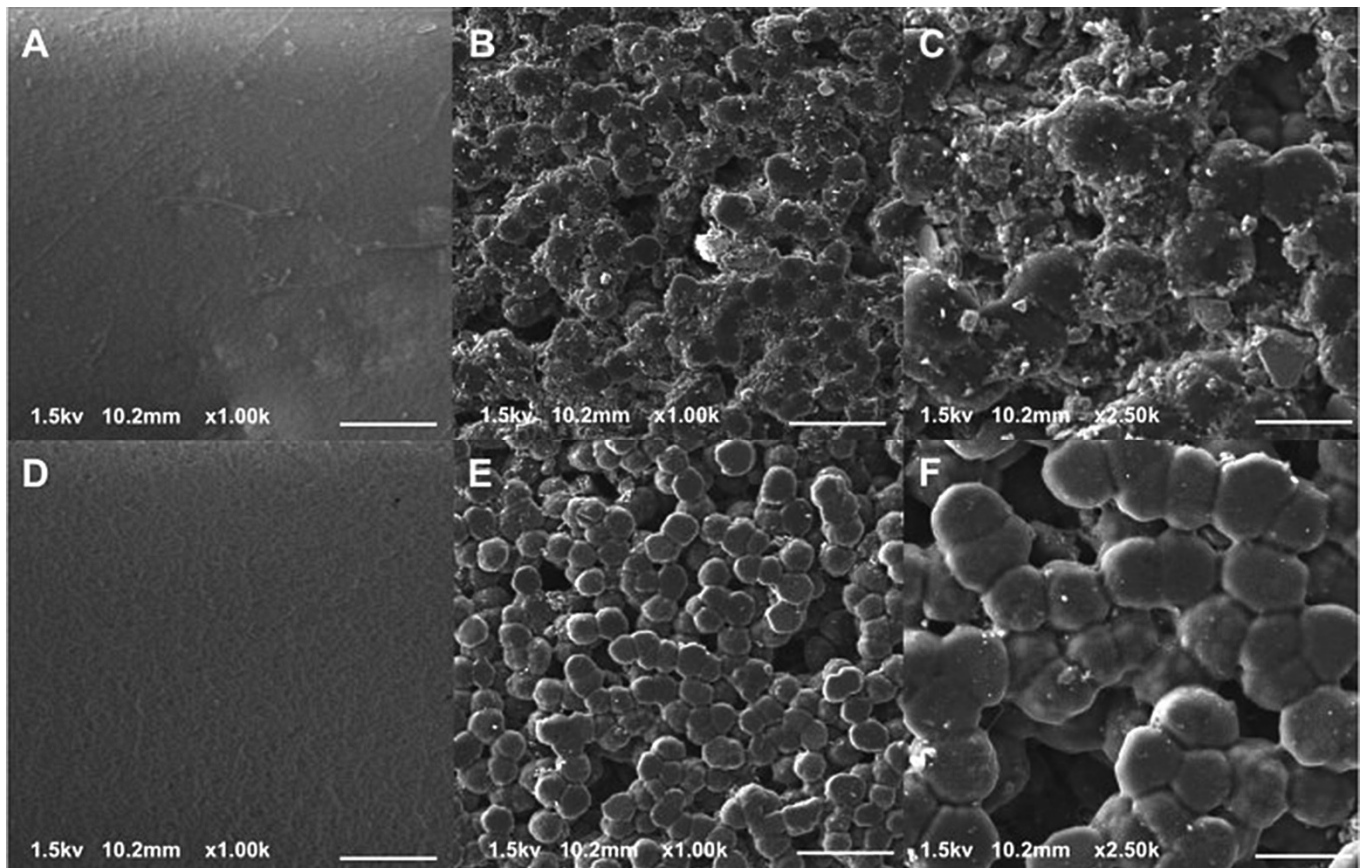
Le microbiote des plantes, il est constitué de la communauté de micro-organismes bactériens et fongiques plus ou moins mutualistes ou symbiotiques, associée à la plupart des plantes.

En microbiologie l'ensemble des parties des plantes situées au-dessus du niveau du sol est considéré comme habitat pour le **phytobiote***.

Chaque partie de la plante abrite une communauté différente : celle associée aux racines s'appelle la Rhizosphère, pour les feuilles on parle de Phyllosphère, pour la tige c'est la Caulosphère, etc. Une part importante enfin, vit à l'intérieur des feuilles et de certaines cellules végétales, il s'agit de l'Endosphère.

Toutes ces bactéries, champignons, levures, algues et moisissures abritées par la plante jouent également un rôle important et complémentaire, mais malheureusement encore peu étudié, dans la dégradation des polluants.

Ainsi parmi les moisissures⁸ le *Penicillium oxalicum* a un fort pouvoir sur les Hydrocarbures Aromatiques Polycliniques (HAP) avec notamment une dégradation d'environ 80% des phénanthrènes et 96% des naphthalènes avec lesquels elle rentre en contact. De son côté le *colletotrichum siamense* dégrade le xylène, les phénanthrènes et naphthalènes et le toluène dans des proportions allant de 52 à 70%.



Biodégradation de polyesters aliphatiques (PHB & PHBV) par la moisissure *Penicillium Oxalicum*. Dégradation complète en 36 à 48 heures à 30 °C.

Sadia Mehmood Satti, Ziaullah Shah, Aaisha Luqman, Fariha Hasan, Muhammad Osman & Aamer Ali Shah.

Department of Microbiology, Faculty of Biological Sciences, Quaid-I-Azam University, Islamabad, 45320, Pakistan

Les bactéries, comme par exemple *Hymenobacter*, *Sphingomonas*, *Methylobacterium* et *Massilia* qui colonisent habituellement les magnolias ou les cèdres, peuvent aussi jouer un rôle important de détoxification des HAP.

* Taxa :

Pluriel de taxon, unité taxinomique (telle qu'une famille, un genre, une espèce).

Les dernières études réalisées tendent à démontrer⁹ que la dégradation n'est pas le fait des **taxa*** pris séparément mais celui de l'association de l'ensemble du phytobiote. De fait, à la différence des bactéries, les HAP ne peuvent pas

représenter la seule source d'énergie pour les moisissures qui peuvent par ailleurs rencontrer quelques difficultés à en dégrader les molécules les plus complexes. La coopération entre différentes espèces d'organismes est souvent indispensable pour y arriver.

Les interactions entre la plante hôte et son phytobiotte participent dans de nombreux processus métaboliques, notamment la réduction du stress par le biais de propriétés antioxydantes de certaines bactéries et moisissures^{10/11} mais aussi la fertilisation et la stimulation de la pousse. Ces derniers points permettent à la plante de mieux se développer et ainsi offrir une plus grande surface de captation des polluants et une meilleure résistance. En retour le feedback positif des plantes par le biais de la production d'acides salicyliques, de flavonoïdes et d'acides gras permet de stimuler l'expression de gènes des bactéries responsables des dégradations xénobiotiques ce qui leur permet d'affiner leur efficacité.



Diagnostic d'un site pollué aux hydrocarbures.

2.2 *Pollution et qualité des sols*

Une grande partie des particules polluantes aériennes captées par les plantes est ramenée vers le sol, soit au moment des pluies par le lessivage des feuilles, soit au moment de la chute de ces dernières. Les sols peuvent cependant aussi piéger directement les polluants atmosphériques par déposition ou par liaison avec ses constituants minéraux et / ou organiques ou par précipitation de nouveaux minéraux.

Ces sources de contamination issues de l'air ne sont malheureusement pas les seules à affecter le substrat. L'accumulation des activités polluantes dans l'espace et le temps conduisent inévitablement les sols qui supportent les villes à présenter des taux de contamination anormalement élevés. Les sources sont nombreuses, activités industrielles, artisanat, garages, chantiers, transport, stockage, chauffage au bois, au charbon, au fioul mais également le remblaiement par des terres contaminées ou les pratiques de jardinage intensives.

Les aspects traités dans ce chapitre ne concernent que les plantations en pleine terre. L'utilisation de terres contaminées, récupérées sur site comme substrat pour les plantations en bac en étage, avec l'idée de les traiter par les plantes, est à priori techniquement envisageable mais pose toutefois question.

L'ADEME dans son ouvrage "Aménager avec la nature en ville" produit une liste assez complète de contaminants, classée par type d'activités pratiquées. Ainsi sur les anciens sites industriels on retrouve généralement des contaminants organiques (hydrocarbures, solvants halogénés, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), polychlorobiphényles (PCB) et polychloroterphényles (PCT)), des éléments traces métalliques (ETM) et des cyanures.

Pour les espaces verts et jardins ce sont les HAP, ETM, pesticides et biocides que l'on retrouvera le plus abondamment. Pour les sols proches des voies de circulation ce seront plutôt des ETM (notamment le plomb), des HAP et des PCB.



Site d'expérimentation pour la Bioremédiation de l'Institut de Recherche en Biologie Végétale de Montréal, Canada.

2.2.a **Bioremédiation**

Différentes techniques biologiques reposant sur les plantes et/ou les microorganismes existent pour dépolluer les sols. Elles sont regroupées sous le terme de bioremédiation ou phytoremédiation et consistent généralement à immobiliser ou extraire les polluants dans le cas des métaux ou bien à les dégrader dans le cas des composés organiques.

Ces techniques tirent parti de la capacité des plantes à fixer, dégrader ou accumuler des polluants provenant du substrat et présentant des similitudes atomiques ou moléculaires avec les nutriments nécessaires à leur croissance. Elles concernent un très large spectre de polluants allant jusqu'à s'avérer efficaces dans le traitement des contaminations nucléaires (strontium, césium, uranium...).

Aujourd'hui au stade de l'industrialisation, avec la création de plusieurs unités pilotes en France comme la plantation de saules sur un site Total à Vendin-Le-Vieil dans le Nord-Pas-de-Calais, ces technologies devraient se développer de manière importante dans les années à venir.

Leur faible coût (10 à 100 fois moindre qu'avec un traitement physico-chimique) et leur intérêt paysager permettent de les envisager comme une réelle alternative

et/ou complément aux techniques de dépollution traditionnelles reposant sur l'excavation, l'épandage ou l'incinération.

Le classement des techniques de bioremédiation repose sur les différentes possibilités d'exploitation offertes par les mécanismes de défense des plantes face aux polluants. Ces techniques étant nombreuses et en constante évolution nous n'en listerons ici que les principales.



Métamorphose du terrain industriel des hauts-fourneaux et des houillères de Thyssen-Meiderich en parc paysager. Duisburg-Nord, 1991-1998, DE, Latz & Partner paysagistes. Différentes stratégies de bioremédiation ont ici été mises en place, visant soit à contenir, soit à dégrader puis éliminer les contaminants.

Phyto-extraction

Les plantes sont utilisées pour concentrer les polluants dans les parties récoltables, soit le plus souvent les feuilles et les racines. Elles sont ensuite généralement brûlées en usine et les cendres traitées. Cette technique fonctionne bien pour les métaux (Cadmium, cobalt, chrome, nickel, mercure, plomb, sélénium, zinc).

Phyto-stabilisation

Des plantes tolérantes aux métaux sont utilisées pour réduire la mobilité des métaux par extraction et fixation dans leurs tissus et prévenir ainsi leur passage depuis la terre contaminée vers les nappes phréatiques ou l'air. Cette technique est similaire à la précédente mais dans ce cas les plants ne sont pas prélevés. En plus des métaux cette méthode peut fonctionner sur les dépôts de certains minéraux ainsi que les composés phénoliques et chlorés.

Phyto-décomposition ou phyto- dégradation

Des plantes terrestres ou aquatiques sont utilisées pour capturer des composés organiques et les dégrader en dérivés moins ou non toxiques, notamment par la libération d'enzymes et par des processus d'oxydation et de réduction. Cette dégradation ou transformation peut s'appuyer également sur le travail des microorganismes rhizosphériques.

L'éventail de polluants traités de cette manière est large, on y retrouve entre autres les composants de munitions et d'explosifs (TNT, DNT, RDX, nitrobenzène, nitrotoluène), l'atrazine, les solvants chlorés, le DDT, les pesticides phosphatés, les phénols et nitrites, hydrocarbures, etc.

Les saules, par exemple, sont très fréquemment utilisés sur les sites pollués par les hydrocarbures¹². Leur système racinaire dense et profond installe dans le sol contaminé une activité microbienne qui va peu à peu réduire la longueur des chaînes d'atomes de carbone et d'hydrogène composant ce polluant pour produire des substances moins ou pas toxiques comme l'eau ou le CO₂. Cette technique est séduisante car la dépollution ayant lieu directement dans le sol, il n'est pas nécessaire de devoir récupérer les contaminants comme c'est le cas chez les plantes hyper-accumulatrices de métaux.



Hargreaves Associates, Queen Elisabeth Olympic Park, Londres, 2007-2012. Bioremédiation de terrains lourdement pollués sur un ensemble de sites industriels et chimiques.

Rhizo-filtration

Les racines de certaines plantes sont utilisées pour leur capacité à dégrader les composés organiques ainsi que leur capacité à absorber, précipiter et concentrer les métaux lourds provenant de liquides contaminés. (Cadmium, cobalt, chrome, nickel, mercure, plomb, sélénium, zinc, isotopes radioactifs, composés phénoliques).

Phyto-volatilisation

Cette technique, plus délicate, s'appuie sur les capacités de certaines plantes à absorber les métaux lourds et les composés organiques pour les lier à d'autres composants ou les modifier pour les rendre moins toxiques puis les rejeter dans l'atmosphère par le biais de l'évapotranspiration. Elle fonctionne bien pour le mercure, le sélénium et les solvants chlorés (tétrachlorométhane et trichlorométhane).

Phyto-stimulation

Les exsudats des racines de certaines plantes stimulent le développement de microorganismes (bactéries ou champignons) capables de dégrader des composés nocifs, notamment les hydrocarbures, le benzène, le toluène, l'atrazine, etc.

Bio-immobilisation

Cette technique spécialisée est spécifiquement applicable dans le cas de pollutions des sols par du chrome ou d'autres métaux. Elle repose sur l'utilisation de certains microorganismes tels que bactéries, champignons, protistes ou microalgues présents dans les sols et dont le métabolisme est capable

de transformer les polluants organiques en molécules de moins en moins polluantes en termes de persistance et de toxicité pour l'environnement. Le processus repose soit sur la dégradation du polluant par la modification de sa structure, soit sur sa transformation par polymérisation avec d'autres composés.

Bio-stimulation

Il s'agit ici d'apporter une aide humaine dans ces processus en stimulant et accélérant la capacité de ces microorganismes à dégrader et transformer les propriétés physico-chimiques des polluants par l'apport d'adjuvants chimiques et biochimiques. Les polluants sont alors mieux tolérés et plus facilement absorbés par les plantes.

Biofiltration

La biofiltration est un procédé de filtration par les plantes reposant également sur l'assistance humaine. Il consiste à injecter de l'air contaminé par des polluants dans le substrat pour que les bactéries (notamment *Pseudomonas* et *Bacillus*) et autres microorganismes qui s'y développent puissent les dégrader. Les racines des plantes prennent ensuite le relais et absorbent les résidus formés.

Ce système est en cours de test en Île-de-France et à Lyon pour abattre les effluents atmosphériques issus du trafic routier, notamment dans les tunnels et la couverture de réseaux routiers. Les performances semblent pour l'instant satisfaisantes, sauf pour le monoxyde d'azote (NO), mais ce système présente l'inconvénient de demander surveillance et maintenance sur les parties techniques de l'installation et pose la question de l'analyse du cycle de vie (ACV) de ces dernières.

Limites

La bioremédiation est un champ particulièrement intéressant et prometteur. Il faut toutefois savoir que les temps de traitement par ces méthodes sont très longs, (au moins trois ans) et que le niveau de contamination se doit d'être modéré et délayé sur de grandes surfaces (pour que les plantes survivent). À cela vient s'ajouter les limitations propres à toute entreprise reposant sur l'utilisation du végétal, notamment la profondeur racinaire qui limite à environ trois mètres l'épaisseur de substrat traité, l'influence de la nature du sol, la météorologie, les attaques d'insectes et de microorganismes, etc.



Réhabilitation d'une ancienne mine d'uranium, Cunha Baixa, Viseu, Portugal. Les plantes sont ici incorporées dans un substrat flottant, les racines descendent dans l'eau et participent au processus de récupération et de dégradation des métaux lourds.

2.3 Traitement des eaux usées

La décontamination des eaux par la végétation recouvre un très large spectre de polluants, traités par un nombre important de procédés distincts. Ces procédés, qui connaissent une évolution importante ces derniers temps, s'appuient de plus sur une très large palette végétale. Nous n'approcherons ici que les aspects liés au traitement des eaux usées domestiques.

Ces dernières contiennent une grande quantité de matériaux organiques et inorganiques complexes, dont notamment des protéines, amines et graisses, de l'urée, de la cellulose, des carbohydrates, du savon. Les infrastructures de traitement biologiques reposent généralement sur le travail de bactéries, champignons, zooplancton et d'algues pour dégrader ces matériaux complexes. Ce système résulte cependant en un important rejet d'effluents riches en nitrogène, potassium, phosphore et autres éléments néfastes à terme pour l'environnement.

Les recherches menées ces dernières décades ont permis de déterminer que les plantes **macrophytes*** pouvaient jouer un rôle purificateur bien plus complet et parfois même, plus rapide.

***Macrophytes :**

Les macrophytes sont des végétaux aquatiques (végétaux supérieurs et algues filamenteuses) visibles à l'œil nu. Ils peuvent appartenir à différents groupes taxonomiques : phanérogames (plantes à fleurs), bryophytes (mousses), ptéridophytes (fougères) et algues.

Le système le plus répandu s'inspire du fonctionnement purificateur naturel des marais et marécages. Ces zones de transition naturelles entre milieux aquatiques et terrestres permettent un lien dynamique entre les deux. L'eau, en parcourant les sols au gré de la topographie, incorpore et charrie des composés chimiques et des sédiments qui viennent s'accumuler dans les milieux aquatiques. Les marécages jouent dans ces parcours un rôle important en absorbant tout ou partie des polluants organiques et inorganiques.

Les sédiments du sol filtrent et retiennent les polluants qui sont ensuite absorbés au travers des racines par les plantes aquatiques propres à ce type de milieu. Ces éléments sont alors séquestrés dans les tissus de la plante qui, peu à peu, lors des dépérissements végétatifs annuels, formeront une couche isolante à leur pied.

L'eau purifiée filtre ainsi peu à peu vers les réservoirs d'eau.

Dans l'interprétation **anthropique*** de ce système, l'eau contaminée, après être passée par une première série de filtres mécaniques pour la débarrasser des déchets solides les plus volumineux, est acheminée vers des bassins remplis de sable (60cm de profondeur maximum) et servant de support pour des plantes de berge ou de marais. Les plantes les plus communément utilisées sont les massettes (*Typha latifolia*) et les roseaux (*Juncaceae*).

Le sable est à la fois filtre pour les particules fines et substrat pour les plantes qui vont absorber les contaminants au travers de leurs racines.

Il faut compter pour traiter les eaux usées avec ce système une surface d'environ 5m² par personne.

Un système alternatif ou complémentaire consiste à utiliser des plantes flottantes ou submergées dans des bassins peu profonds. La recherche a démontré que ces systèmes sont particulièrement efficaces pour le traitement d'eaux **eutrophisées***.

Les plantes flottantes extraient le dioxyde de carbone et l'oxygène directement dans l'atmosphère tandis que leurs apports en minéraux proviennent de l'eau.

Les plantes submergées doivent en revanche subvenir entièrement à leurs besoins à travers la colonne d'eau et sont malheureusement sensibles à la turbidité de celle-ci qui peut affecter profondément leur capacité de photosynthèse.

***Eutrophisation :**

L'eutrophisation est une forme singulière mais naturelle de pollution de certains écosystèmes aquatiques qui se produit lorsque le milieu reçoit trop de matières nutritives assimilables par les algues et que celles-ci prolifèrent.



Cette lagune de traitement des eaux usées à Kochice en Pologne a été projetée par l'ingénieur / artiste Viet Ngo. Elle utilise le système Lemna qu'il a mis au point et qui se base sur l'utilisation de lentilles d'eau.

Le système le plus étudié repose sur l'utilisation de lentilles d'eau (*Lemna minor*) mais (*E. crassipes*), (*Pistia stratiotes*), (*Hydrocotyle umbellata*), (*Altermanthera philoxeroïdes*) et (*Cleistanthus operculatus*) sont également particulièrement efficaces).

Des essais réalisés à la station d'épuration d'El-Fayoum en Egypte¹³, portant sur les lentilles d'eau, les hyacinthes et les algues vertes donne à voir des résultats tout à fait encourageants. Les trois plantes se sont montrées capables de faire décroître au bout de 21 jours tous les indicateurs testés (métaux lourds, N, P, K, BOD, COD) dans des eaux usées domestiques pour les ramener à des niveaux qui en permettent l'usage pour l'irrigation.

Les lentilles, la plus efficace des trois plantes, présentent par ailleurs l'énorme avantage de pouvoir être récupérées postérieurement pour servir de fourrage pour le bétail.

Limites

Au-delà des problèmes inhérents au maintien en bonne santé d'un ensemble végétal, ces systèmes de traitement présentent un certain nombre de limitations. Ils requièrent d'une part une surface assez importante pour être efficaces, les systèmes mis en place doivent fonctionner en continu sous peine de voir les plantes dépérir, il y a une limite biologique à ce qui peut être absorbé en quantité de polluant par les plantes (le surplus courant donc le risque d'être rejeté), enfin certains produits toxiques introduits par mégarde pourraient facilement décimer toute une plantation.

2.4 Isolation phonique

L'imposition faite aux communes de plus de 100.000 habitants par le Parlement Européen depuis 2002 de réaliser et de publier une cartographie de l'environnement sonore ainsi que d'élaborer un Plan de Prévision du Bruit dans l'Environnement (PPBE)¹⁴ a largement permis de se rendre compte de l'ampleur du problème du bruit en milieu urbain :

Environ 40% de la population de l'Union Européenne est exposée au bruit du trafic routier à des niveaux dépassant 55dB(A) le jour et 30% à des niveaux dépassant 55dB(A) la nuit. 1 européen sur 5 serait même régulièrement exposé la nuit à des niveaux sonores pouvant être nocifs pour la santé¹⁵. Ils provoquent des effets liés au stress : fatigue physique et nerveuse, insomnie, hypertension artérielle chronique, anxiété, comportement dépressif ou agressif, altération de la fonction immunitaire et dans des cas extrêmes diabète.

Il s'agit donc d'une forme de contamination en milieu urbain particulièrement importante et qui est pourtant rarement perçue comme telle. Sa caractérisation qui n'est pas très évidente y est peut-être pour quelque chose. L'environnement sonore est en effet formé de la superposition de tous les sons audibles ou non et sa perception est influencée par une grande quantité de paramètres, qu'ils soient individuels, environnementaux, temporels ou autres.

Le seul niveau sonore mesuré en décibels (dB) n'est pas suffisant pour le caractériser et il faut le pondérer avec la sensibilité de l'oreille humaine en fonction de la fréquence d'un son, grave ou aigu. C'est le dB(A) qui est classiquement utilisée en acoustique environnementale.



Mur antibruit végétalisé, quai Fulchiron, Lyon, Ecolyon 2011. La végétation n'est en fait utilisée ici que pour masquer le mur antibruit.

Pour ce qui est du rôle de la végétation face à ce fléau le constat est assez décevant : contrairement à une idée reçue et bien implantée la plupart des études sur le potentiel de réduction du niveau sonore par les plantes tendent à démontrer qu'il n'est pas significatif. Le Danish Acoustical Laboratory, après l'étude de sept espaces végétalisés de nature différente, dont l'épaisseur varie de 15 à 40 mètres, aboutit au constat de la quasi-absence d'atténuation sonore liée à la végétation¹⁶, notamment sur les moyennes fréquences qui composent

majoritairement le bruit du trafic routier. D'un point de vue strictement acoustique la réduction atteinte, comprise entre 1 et 5 dB(A), n'est pas perceptible. Pour comparer, un écran acoustique permet une réduction allant de 8 à 12 dB(A) et une fenêtre isolante entre 30 et 35 dB(A).

Les niveaux sonores sont réduits par interaction avec le matériel végétal principalement de deux manières : le son peut être soit redirigé (par réflexion, diffraction, ou diffusion), soit être absorbé par la matière végétale aérienne et le sol en amortissant les vibrations acoustiques. Le substrat constitue in fine le principal matériau d'atténuation acoustique alors que les tiges, les feuilles ou les troncs ont une contribution pratiquement négligeable. Une simple haie d'arbustes et de buisson d'une largeur inférieure à 1 mètre est ainsi totalement transparente aux ondes sonores.

Pour trouver une piste d'amélioration il faut se tourner vers une autre série d'études, dites psychoacoustiques, qui traitent du ressenti de l'environnement acoustique. Elles démontrent que la végétalisation d'un espace influence le jugement porté sur la qualité de l'ambiance sonore. Ainsi masquer la vue d'une route passante provoque la diminution de la gêne associée même si les niveaux sonores restent identiques. La présence d'eau peut également jouer un rôle avec notamment les sons générés par le mouvement qui sont jugés agréables et/ou permettent de masquer un autre son.

La végétation contribue ainsi à une appréciation positive de l'ambiance sonore. Elle doit donc être intégrée dans une approche globale des ambiances sonores.

3.1 *Régulation lumineuse et visuelle*

L'ombrage est probablement l'un des apports majeurs de la végétation, celui que nous avons tous apprécié par une chaude journée d'été et qui est, par là même, un des aspects les plus reconnaissables et les mieux compris.

Les plantes constituent en effet un formidable filtre qui joue un important rôle de contrôle lumineux et de lutte contre l'éblouissement. La baisse de rayonnement incident qui leur est imputable dépend notamment de la densité du feuillage et du branchage, de la taille des feuilles et de la géométrie de la couronne.

Ce faisant, la végétation absorbe une bonne partie de l'énergie contenue dans la lumière notamment pour alimenter la photosynthèse.

Cette énergie captée permet de réduire de façon importante la chaleur qui serait sinon absorbée et emmagasinée au sol ou sur les surfaces construites sur lesquelles l'arbre porte son ombrage. Elle permet également de réduire la charge calorifique sur les personnes.

Les plantes à feuillage caduc présentent même le double avantage de s'adapter aux besoins propres à chaque saison, ainsi en automne et en hiver la perte de feuillage permet de compenser la baisse lumineuse importante en ces saisons et de pouvoir profiter des apports solaires.

3.2 *Contrôle thermique estival*

Les épisodes de chaleur intense peuvent avoir un impact très important sur la santé humaine, potentiellement léthal. Cet impact peut être direct avec des symptômes allant d'un simple inconfort à la syncope en passant par des faiblesses, des troubles de la conscience ou des crampes. Il peut aussi se manifester indirectement par l'exacerbation de maladies chroniques telles que le diabète, l'insuffisance respiratoire, les maladies cardio-vasculaires, neurologiques, cerebro-vasculaires ou rénales.

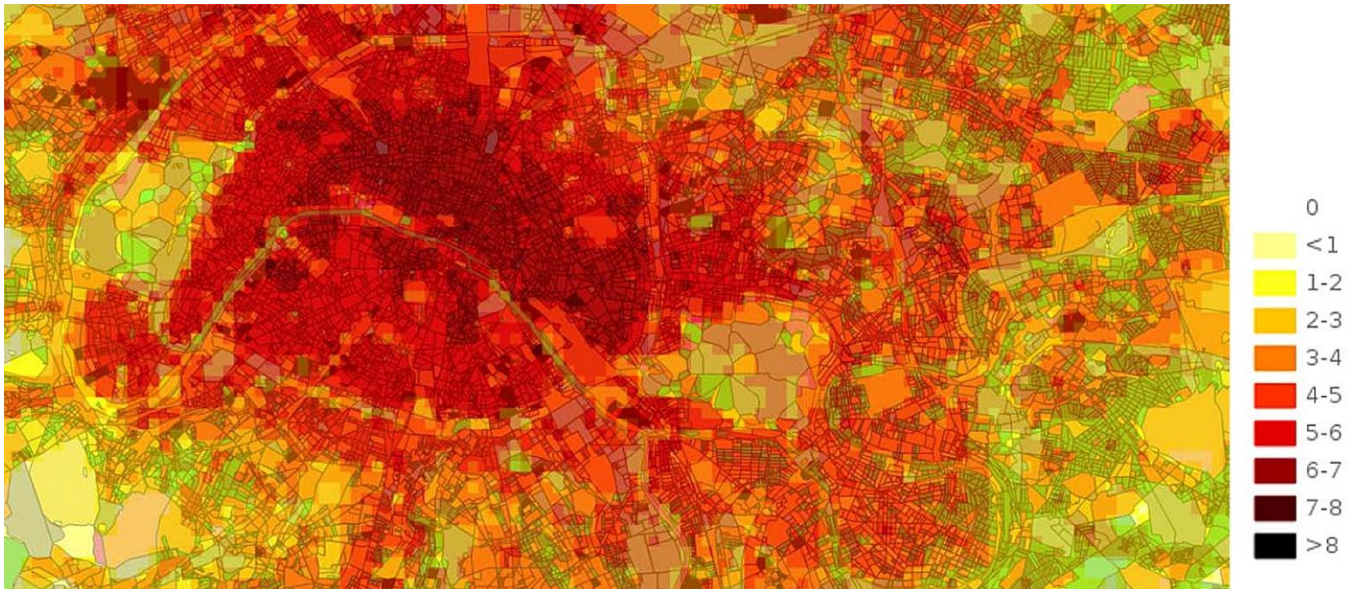
3.2.a *Effets de la chaleur sur la santé*

La vague de chaleur de 2003 serait ainsi responsable du décès de près de 2.000 personnes en Angleterre et d'environ 20.000 personnes dans le Nord de la France. A Paris seulement elle serait à l'origine de 2.600 admissions aux urgences et de 500 décès. Bien qu'aucun secteur de la population ne soit immune¹ aux effets des épisodes de chaleur excessive, ils ne nous affectent pas tous de la même manière. On considère généralement que les groupes de personnes les plus vulnérables sont les personnes âgées, les enfants, les personnes souffrantes ou présentant des troubles psychologiques, les personnes sous tranquillisants et les alcooliques. Il existe de plus un certain nombre de facteurs aggravants liés à des environnements particuliers, comme les professions qui se déroulent en milieu chaud ou le fait d'occuper des espaces très exposés comme les combles ou le dernier étage sous toiture d'immeubles mal isolés. Le taux de mortalité semble aussi plus élevé pour les zones fortement urbanisées et les zones les plus pauvres².

L'élévation des températures (au-delà de 30°C) favorise par ailleurs la formation d'ozone et l'accumulation dans l'atmosphère des particules nuisibles pour la santé ce qui renforce l'effet déjà délétère des vagues de chaleur.

Parallèlement ces épisodes de surchauffe induisent une surconsommation d'énergie pour alimenter les réfrigérateurs, congélateurs, climatiseurs, ventilateurs et autres appareils de production du froid. Elle serait estimée à environ 10% en France pour la canicule de l'été 2003.

Il est à redouter que des épisodes extrêmes de froid qui pourraient être provoqués par le dérèglement climatique puissent avoir des effets tout autant délétères. La lutte contre le froid est cependant mieux comprise et moins complexe à traiter que la mitigation des surchauffes.



Îlot de chaleur nocturne estival à Paris superposé aux îlots morphologiques urbains à 250m de résolution. La colorimétrie représente l'écart en °C entre une simulation rurale lors d'un épisode météorologique estival correspondant à un type de temps favorisant l'ICU.

3.2.b *La chaleur en milieu urbain : les ICU*

Ces épisodes de chaleur estivale intense qui gagneront probablement en fréquence et en importance sont par ailleurs exacerbés par un phénomène inhérent aux environnements urbanisés : les Ilots de Chaleur Urbains (ICU). Le climat des villes diffère en effet de celui des campagnes qui les entourent. La minéralisation des sols, la suppression de la végétation et des cours d'eau, la création d'alignements de constructions sont autant de facteurs qui modifient les différents mécanismes impliqués dans la modélisation du climat local. On considère ainsi généralement que les villes de l'hémisphère Nord ont une humidité relative plus faible, moins de soleil, plus de nuages et de pluie que les zones rurales qui les entourent^{3/4}.

Une des facettes les plus étudiées de ce déphasage est probablement l'augmentation, tout au long de l'année, de quelques degrés Celsius de la température en ville par rapport à celle de son environnement immédiat. Ce phénomène semble n'avoir été compris et décrit pour la première fois que très récemment, au tout début du XIXe siècle par Luke Howard, un pharmacien passionné par la météorologie, dans son ouvrage *The Climate of London*. L'importance de ce phénomène est bien entendu tributaire de la morphologie propre à chaque ville et tend à s'amplifier avec leur taille. Les températures en ville peuvent ainsi varier de +2°C à +12°C selon la densité de population.

Si bien les îlots de chaleur hivernaux peuvent représenter un réel bénéfice^{5/6} avec notamment des consommations d'énergie atténuées durant les périodes froides, l'impact estival de ce déphasage est, lui, résolument néfaste.

Les flux de chaleur

La chaleur provient de différentes sources, du rayonnement solaire tout d'abord, du rayonnement infrarouge en provenance de l'atmosphère et des activités humaines (industries, circulation routière, climatisation en été, chauffage en hiver). La chaleur issue de ces sources est alors reçue et en partie réfléchi, en partie absorbée par différentes surfaces (sols, toits et murs, végétation). Puis ces surfaces, tout au long du cycle jour / nuit, vont réémettre à leur tour tout ou partie de la chaleur qu'elles ont absorbée.

Ces cycles d'absorption / restitution créent un déphasage temporel qui commence généralement à se faire sentir en milieu d'après-midi, pour continuer à augmenter graduellement jusqu'à atteindre son pic au cours de la nuit.

Forme et matériaux

La forme urbaine et construite joue ici un rôle déterminant, la dimension des rues, la distance entre les bâtiments qui les bordent, leur hauteur peuvent favoriser le piégeage du rayonnement infrarouge par réflexion entre les immeubles et les différentes surfaces absorbantes, limitant ainsi l'évacuation de la chaleur, notamment par les vents.

Les matériaux de construction, que ce soit pour l'espace public ou le bâti, sont un deuxième facteur d'importance à prendre en compte pour comprendre les flux de chaleur.

Pour caractériser leur rôle il faut étudier différents facteurs.

Leur capacité de réflexion tout d'abord, en partie lié à la couleur des matériaux, joue un rôle essentiel quant à la quantité de chaleur qu'ils peuvent absorber. Cette capacité est caractérisée par l'échelle d'albédo (du latin "blancheur") allant de 0,00 dans le cas d'un corps noir parfait absorbant toutes les longueurs d'onde ; à 1,00 pour un miroir parfait réfléchissant toutes les longueurs d'onde.

Ce premier facteur est à compléter par une série d'autres en relation avec la manière qu'ont ces mêmes matériaux d'emmagasiner la chaleur absorbée, soit l'inertie, l'effusivité (ou la vitesse d'absorption de la chaleur) et la diffusivité (ou vitesse de transmission des flux de chaleur).

Il est enfin très important de prendre en compte les associations de matériaux lors de leur mise en œuvre. Ainsi un trottoir parisien typique, formé d'une couche de finition en asphalte de 2cm présentant un albédo et une effusivité particulièrement élevées, transmettra rapidement un pourcentage très important de l'énergie reçue au cours de la journée vers la sous-couche d'assise de 10cm de béton qui, elle, présente une formidable capacité de stockage de cette énergie. (Entretien avec Julien Bigorgne, Ingénieur environnement à l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR)).

4.1 Support de biodiversité

Il n'existe probablement pas de ville exclusivement minérale, elles intègrent toutes, de façon plus ou moins importantes selon leur contexte géographique et culturel des espaces verts dans leur composition. La quantité d'espèces animales et végétales que ces espaces abritent, même sur des surfaces réduites, reste particulièrement étonnant.

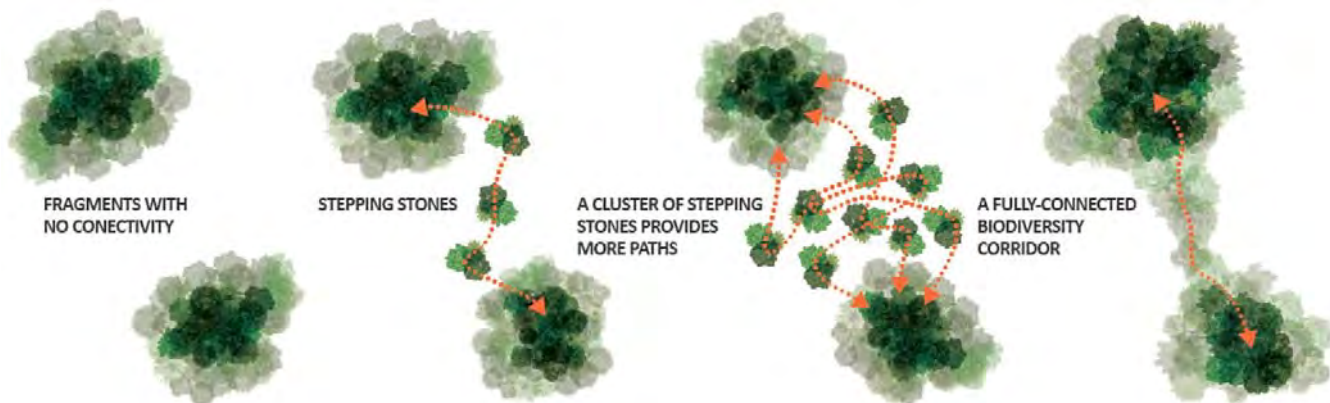
L'étude du jardin d'une maison de la ville de Leicester par sa propriétaire, réalisée sur une période de 35 ans, a permis par exemple de démontrer l'incroyable biodiversité présente sur de petites surfaces en milieu urbain¹. Elle n'y décomptera, en effet, pas moins de 1.300 espèces d'insectes différentes. L'accumulation de ces différents types d'espaces en milieu urbain permettent par exemple à l'agglomération Lyonnaise d'abriter pas moins de 293 espèces d'abeilles, soit un tiers des espèces présentes en France. En effectuant une recherche sur 54 villes du monde entier on s'aperçoit qu'environ 30% d'entre elles servent de refuge à des espèces d'oiseaux menacés d'extinction².

Ces espaces, de nature souvent variée, se connectent entre eux pour former des corridors biologiques³ qui aident différentes espèces animales et végétales à se déplacer au sein du paysage urbain.

Il est bien évident que si la distance entre deux espaces potentiellement habitables pour une espèce déterminée est plus grande que la distance que cette espèce peut parcourir pour se propager sa population restera isolée et beaucoup plus vulnérable. La connexion de nombreux espaces végétalisés pour la création d'un vaste maillage est donc essentielle au développement de ce que l'on nomme des "métapopulations" ou "populations de populations"⁴ dans lesquels les individus peuvent se déplacer et se reproduire.

Cette mise en relation d'espaces végétalisés permet ainsi⁵ :

- aux espèces/colonies d'échapper à la disparition et de recoloniser les lieux,
- de leur permettre l'accès à leurs différents besoins qui ne sont pas toujours disponibles au même endroit,
- de faciliter les migrations saisonnières,
- de promouvoir la circulation des gènes entre populations,
- d'offrir des routes de déplacement pour mieux s'adapter au réchauffement climatique.



Corridors and stepping stones, Grant Rosoman, Greenpeace.

Les grands espaces végétalisés étant souvent éloignés les uns des autres, la création d'un maillage effectif repose sur la présence de maillons de moindre échelle qui fonctionnent comme des tremplins ("stepping stones" en Anglais).

L'intégration de la végétation dans la construction pourrait permettre la multiplication de ces tremplins de connexion pour créer un maillage beaucoup plus resserré sur l'ensemble d'un milieu urbain. La superposition en hauteur permet par ailleurs l'étagement de ces connexions

Il faut cependant savoir que tous les types d'espaces verts n'ont pas forcément la même valeur en termes de biodiversité. Il a été ainsi déterminé que les parcelles abandonnées en ville abritent jusqu'à quatre fois plus d'espèces que les parcs urbains⁶. Tous les espaces verts ne sont donc pas forcément de bons conducteurs de biodiversité. Le facteur déterminant semble dans ce cas être l'hétérogénéité de la végétation et de sa structure (du couvre sol jusqu'à la cime des arbres) et pose la question des bons assemblages à prévoir dans les aménagements.

Un autre aspect qui est malheureusement souvent négligé dans le choix des espèces est que les cultivars, souvent développés pour leur esthétique, sont de moins bons supports pour la vie sauvage que les espèces sauvages dont ils sont issus⁷. De la même manière il semble que les espèces d'origine locales soient de bien meilleurs supports de biodiversité que les espèces importées.

Par ailleurs les ressources nécessaires au développement de chaque espèce n'étant pas toutes toujours couvertes au même endroit ni au même moment⁸ il est probablement plus important de différencier les espaces entre eux que de chercher à couvrir toutes les nécessités sur chaque petit espace.

Les papillons par exemple vivent sous forme de chenille, se métamorphosent, se nourrissent, se reproduisent et pondent dans des biotopes tous différents les uns des autres⁹.



Victoria's Park, East London, "The People's Park". Ouvert en 1845. James Pennethorne, architecte.

3.2 *Qualité de vie et santé*

L'idée que les espaces verts pourraient avoir des effets bénéfiques pour la santé est probablement très ancienne. Une étude intéressante sur le sujet estime que les premiers hôpitaux étaient probablement des institutions monastiques dans lesquelles les jardins jouaient un rôle dans le processus de guérison¹⁰.

Au milieu du 19^e siècle une note du "Registrar for births, marriages and deaths" Anglais selon laquelle "Un parc dans le Est End de Londres pourrait probablement diminuer les morts annuelles de plusieurs milliers et prolonger de plusieurs années les vies de la population locale" donnera lieu à la création du Victoria Park. Au même moment le sanatorium pour désordres mentaux de Virginia Water en Angleterre se dotait de jardins avec des visées thérapeutiques.

De très nombreuses études se sont intéressées au sujet, démontrant que la santé humaine, physique et mentale, était quantifiablement meilleure pour les personnes ayant accès à des espaces verts de qualité¹¹, et que cette amélioration était même proportionnelle à la richesse de la biodiversité¹². Inversement il semblerait que les problèmes de santé associés à la pauvreté soient exacerbés par le manque d'accès aux espaces verts¹³.

Une étude menée en 2014¹⁴ réussit à déterminer que la disparition de plus de 100 millions d'arbres au travers de 15 états des USA entre 1990 et 2007 causée par l'invasion d'un coléoptère, l'agrile du frêne, aurait causé la mort additionnelle de plus de 21.000 personnes par le biais de problèmes respiratoires et cardiovasculaires.

La végétation jouerait donc, entre autres, un rôle important dans :

- . la réduction du stress et d'autres désordres psychologiques¹⁵,
- . l'amélioration du niveau d'attention¹⁶,
- . la récupération après une concentration et des efforts prolongés.

Plus surprenant une étude réalisée en 2005¹⁷ démontre que les personnes visualisant des images de végétation pendant un entraînement physique en salle présentent des améliorations significativement plus importantes de la pression du sang que les personnes ayant fait le même exercice et visualisant d'autres types d'images.

Plusieurs théories ont été développées pour tenter expliquer pourquoi l'être humain répond de façon positive à la présence de la nature. La plus connue est probablement l'hypothèse de la Biophilie, inventée et définie par le psychanalyste Eric Fromm comme "l'amour passionné de la vie et de tout ce qui vit" et repris en 1984 par le biologiste E.O. Wilson pour mettre en avant le besoin inné de l'homme de s'intégrer au monde naturel. Le terme trouve même une déclinaison architecturale pour désigner une conception qui favorise une reconnexion avec notre environnement naturel en intégrant directement des éléments naturels et des éléments qui évoquent la nature et le lien matériel avec celle-ci¹⁸.



Agriculture urbaine sur les toits, Anvers, Belgique. Photo Bram Vangampelaere

5 *Le végétal comme source*

5.1 *Agriculture urbaine*

La production locale de fruits et légumes peut jouer de nombreux rôles intéressants. Elle est bien sur un véhicule formidable pour l'éducation et la cohésion sociale, pour le loisir, la satisfaction personnelle et la santé. Le jardinage est en effet souvent pointé comme activité bonne pour la santé mentale et psychologique.

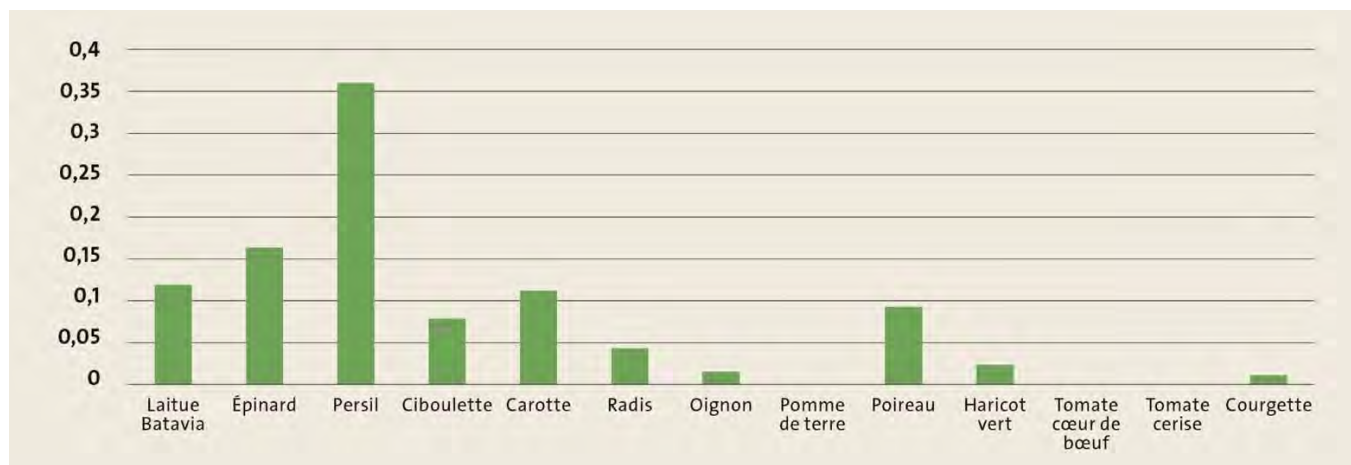
Notons qu'un Français sur trois voudrait disposer d'un jardin potager et fruitier. Et que ceux qui en disposent produisent une partie non négligeable des légumes qu'ils consomment soit environ 26% pour les légumes feuille ou 13% pour les légumes fruit. Les produits étant consommés directement et non commercialisés ils échappent à toute forme de circuit même ceux dits en circuit court.

Grace au compostage domestique (voire également grâce à l'alimentation de petits animaux d'élevages comme les volailles) les jardins permettent de réduire de façon importante le volume de déchets verts et de déchets alimentaires des ménages à la charge des collectivités.

Quelques précautions importantes à prendre toutefois. Dans une étude menée sur 54 jardins communautaires de la ville de New York en 2014, 70% des sites présentaient des échantillons de terre contaminés, principalement au Baryum et au plomb¹. Ces résultats ne sont évidemment pas extrapolables à tous les sites mais posent très clairement la question des sols contaminés. La même étude démontre que les cultures faites sur des sols et compost à la qualité contrôlée et importés sur site permettent une réduction significative des polluants. La mise à disposition d'espaces de culture au sein d'un projet est donc indissociable d'une approche en amont en matière de risques sanitaires liés à la contamination de ces espaces.

Les sources de contamination sont nombreuses, elles peuvent être liées aux utilisations préexistantes du site ou à son aménagement avec des remblais

pollués. Mais elles peuvent également provenir de la mauvaise gestion du jardin, notamment par l'usage intensif de produits phytosanitaires et d'engrais phosphatés ou l'utilisation de déchets contaminés pour l'amendement. Il faut également prendre en compte la question des intrants en cours de culture, notamment par la déposition de particules sur les feuilles, par le ruissellement des eaux provenant des toitures en zinc ou des chaussées proches.



En mg/kg de Pb dans le légume (matière fraîche). INRA / AgroParisTech.
Exemple de résultats d'analyses de différents légumes en contamination par le plomb (Pb) sur un sol pollué.

En général les plantes tendent à accumuler les contaminants dans les racines plutôt que dans les parties aériennes et plutôt dans le feuillage et les tiges que dans les grains et les fruits. En ce qui concerne les éléments trace métalliques (ETM) par exemple, les légumes feuilles en accumulent plus que les grains de graminées et les légumes racines, qui eux-mêmes accumulent plus que les fruits et les légumes fruits. Par mesure de précaution il est donc préférable de ne pas consommer les légumes à feuilles et de préférer les fruits aux légumes.

Notons cependant qu'au vu de l'échelle à laquelle la production de fruits et de légumes peut être implantée sur un bâtiment dont ce n'est pas l'usage exclusif, son rôle reste probablement assez limité.

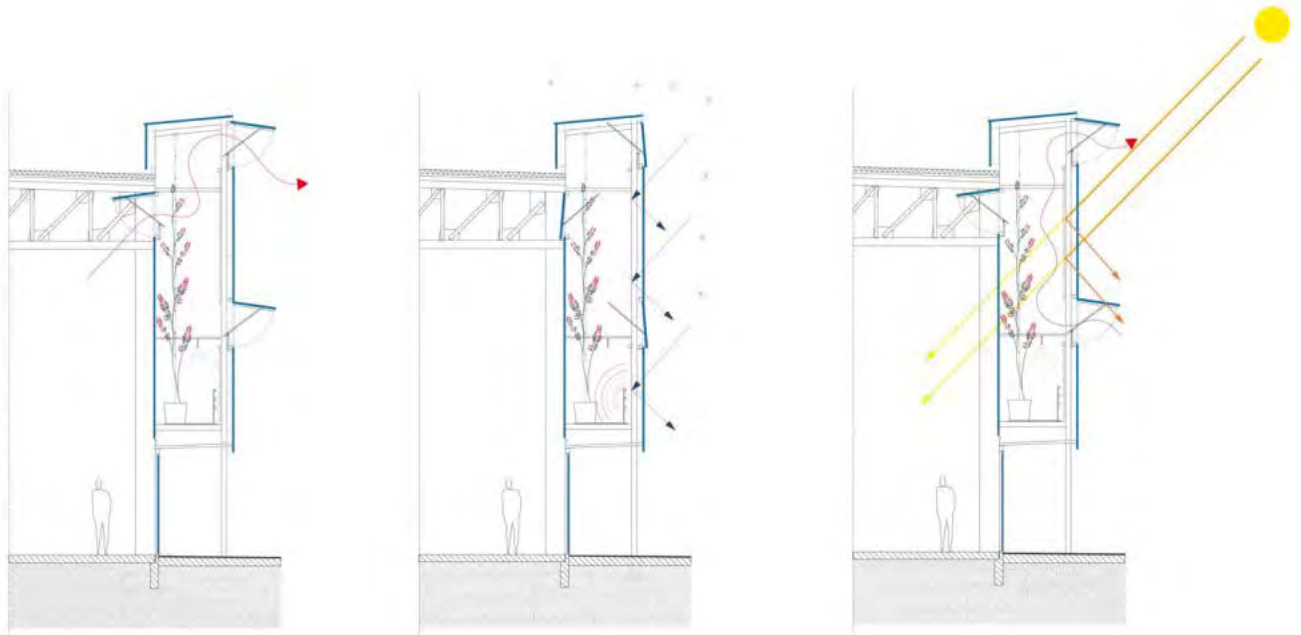
C **Troisième partie** *Exemples de mise en œuvre*

1 **Façade serre**



Lacton Vassal
Hall d'exposition Paris Nord Villepinte

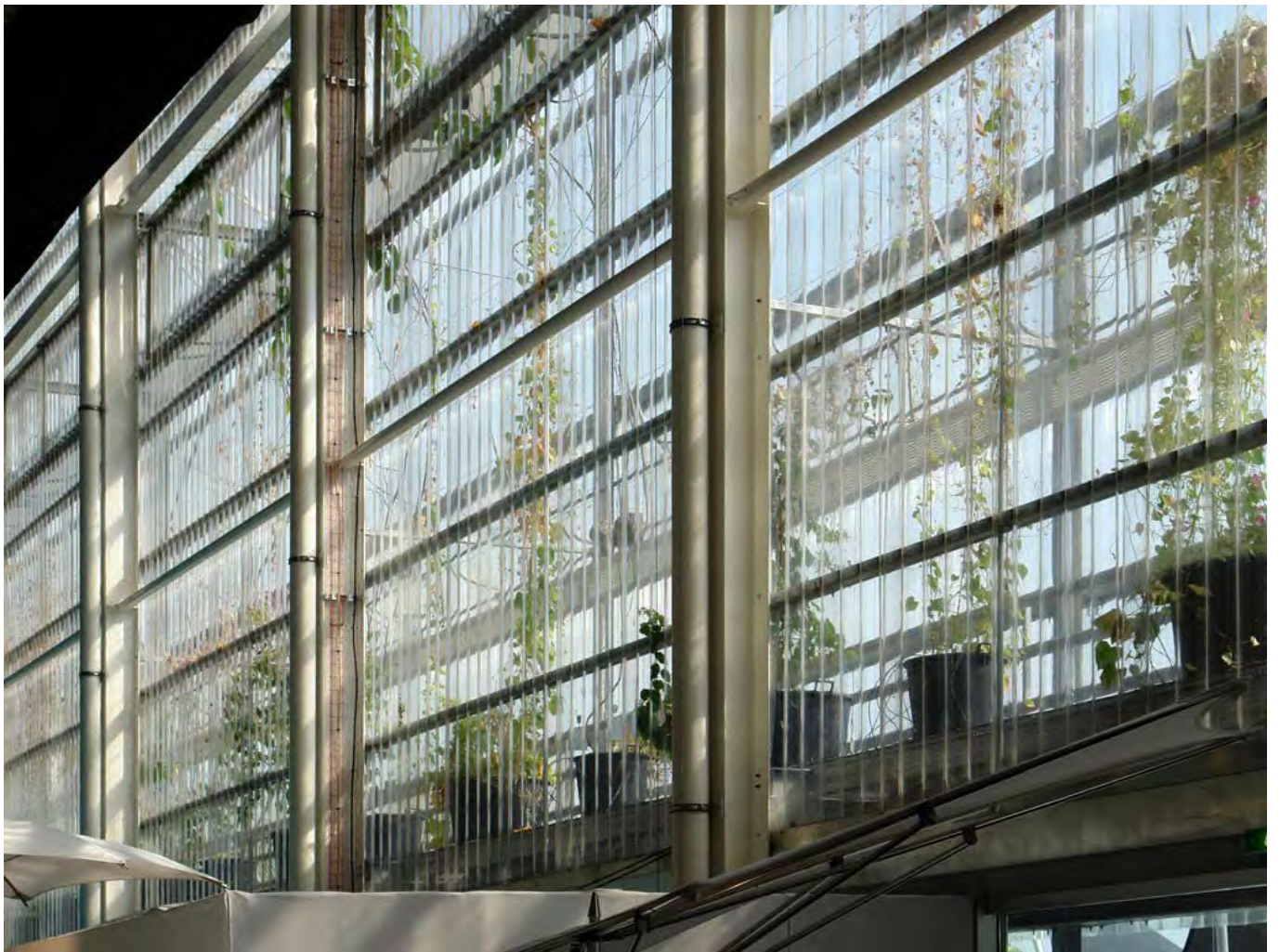
Vue sur l'intérieur de la façade - serre



Principe de fonctionnement de la façade

Vue sur la façade Sud





Vue depuis l'intérieur

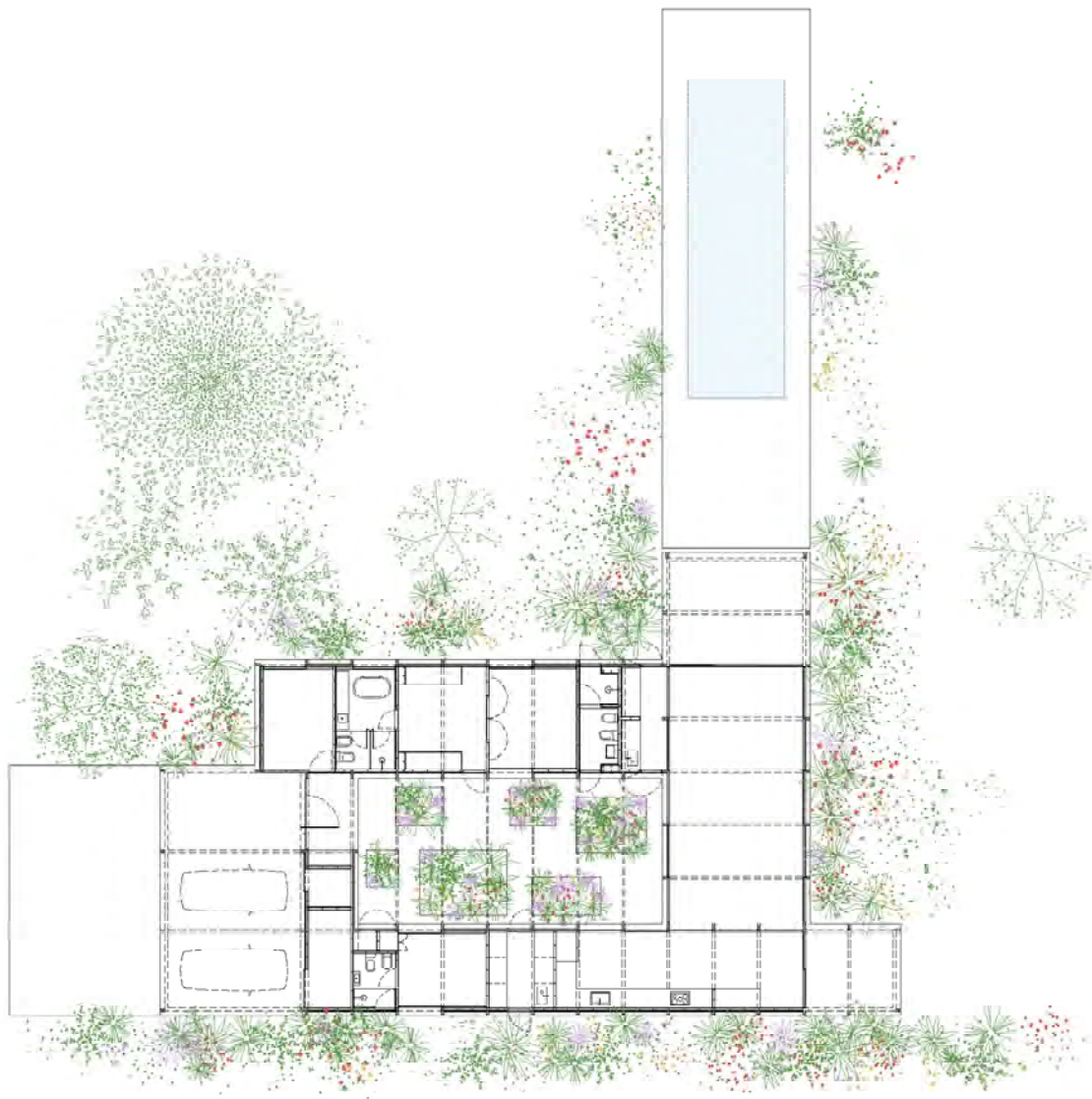
***Adamo-Faiden****Casa Cepe, Barrio Villa Lobos, Hudson, Argentina*



Vue depuis la cuisine

Salon



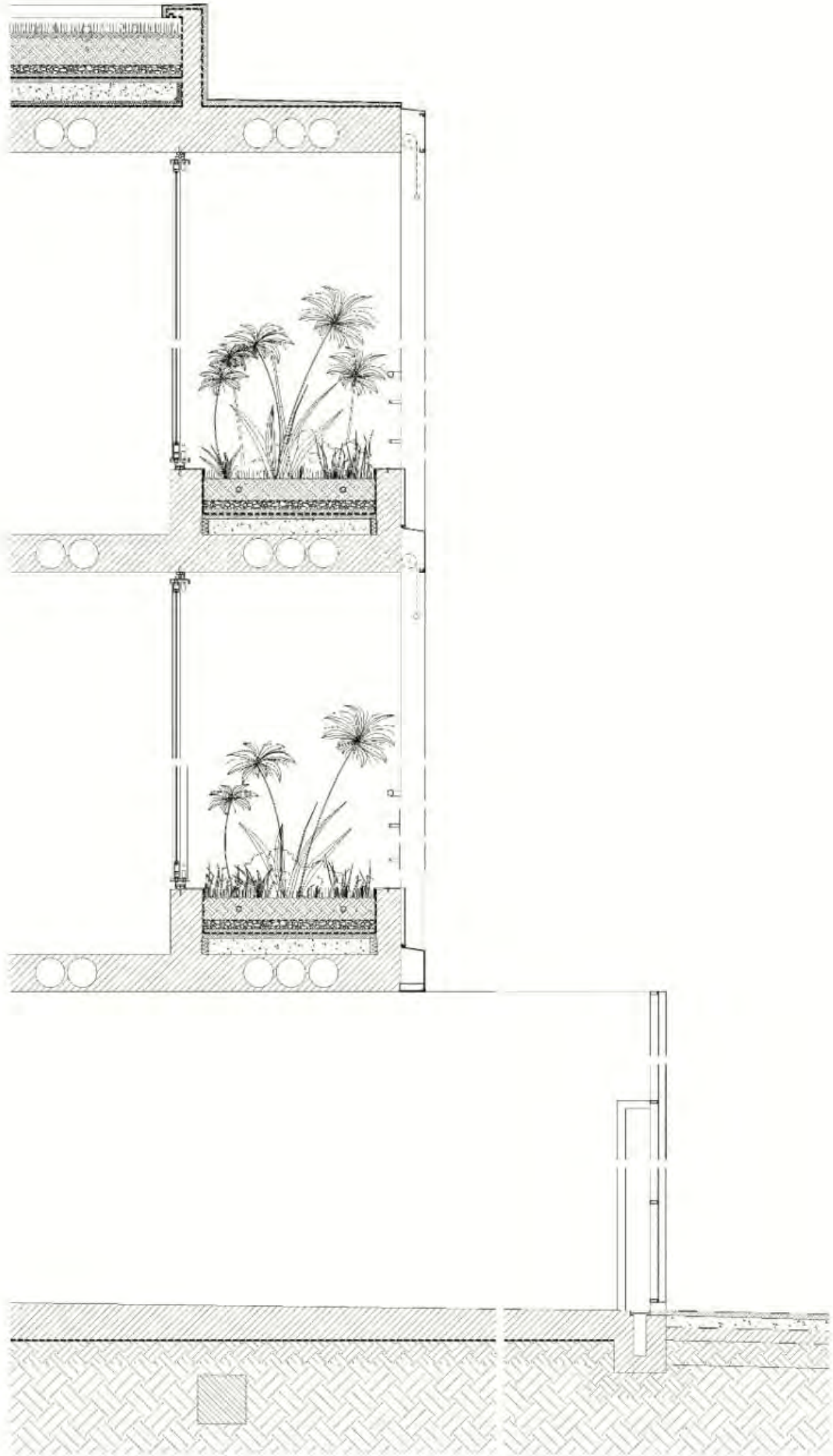


Plan du rez-de-chaussée

**Adamo-Faiden**

11 de septiembre, logements & bureaux, Buenos Aires

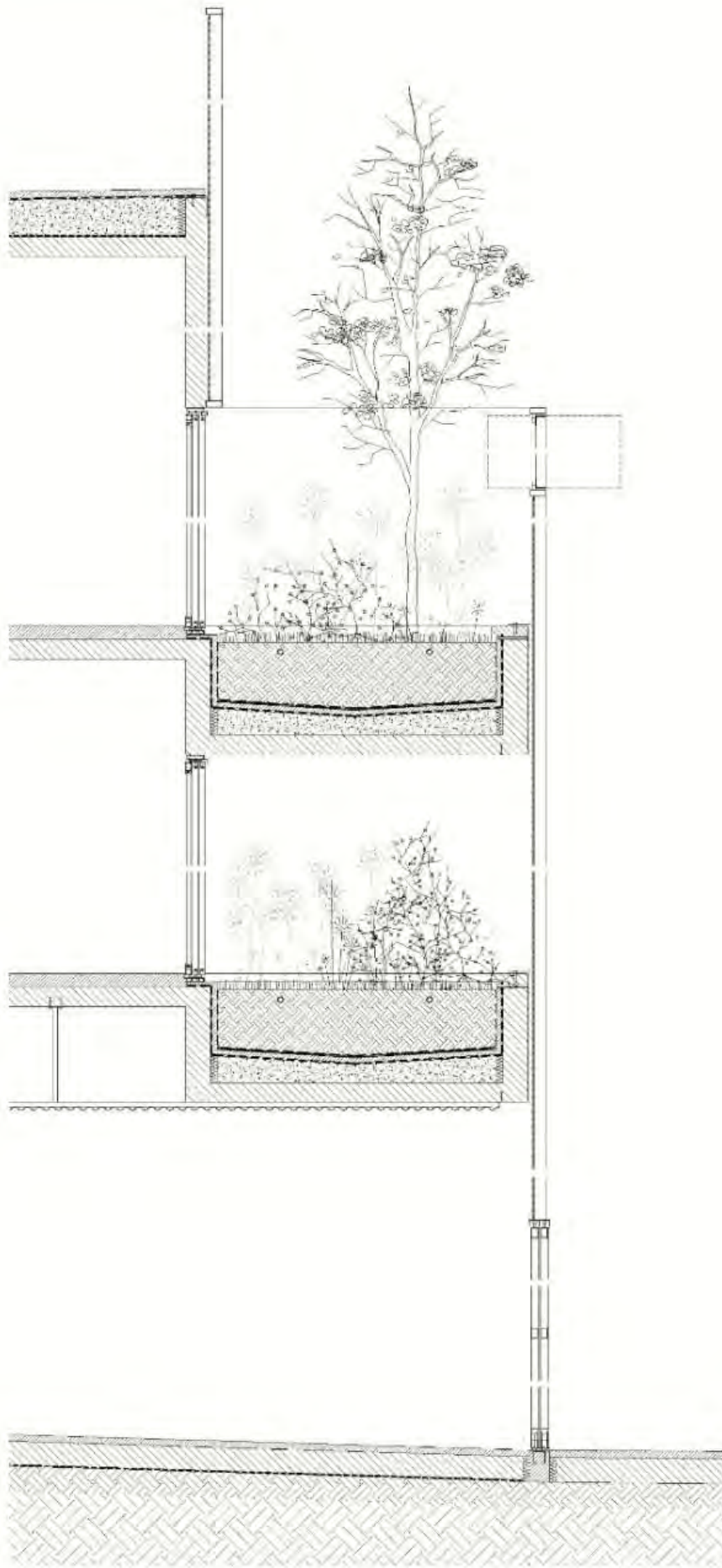




Coupe de détail

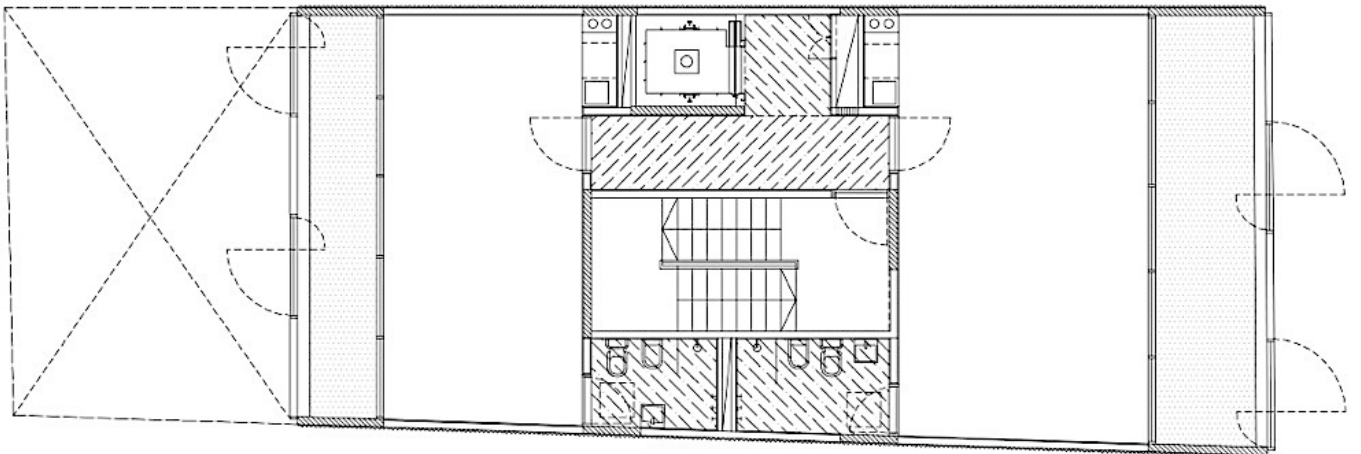


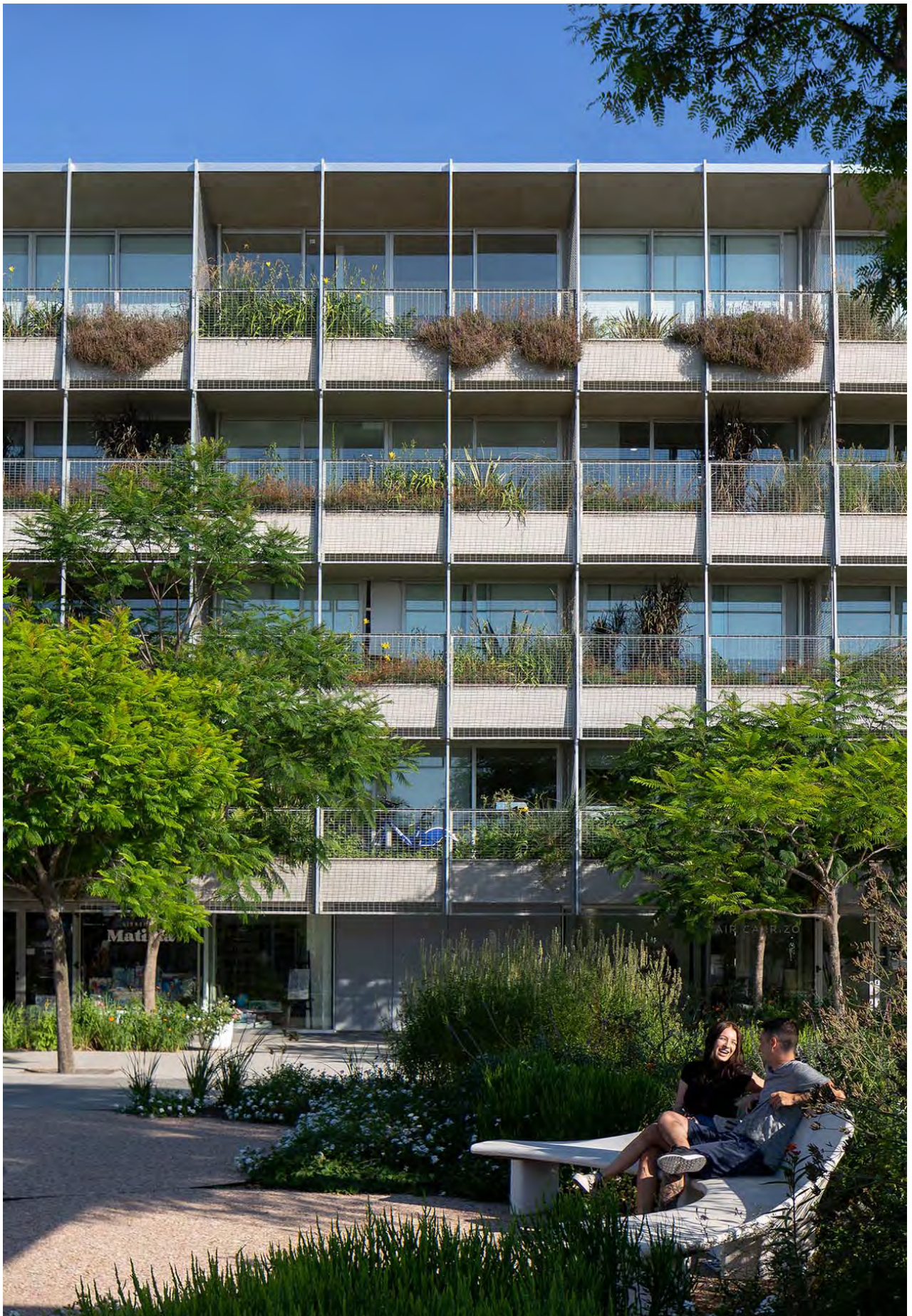
Adamo-Faiden
Edificio Bonpland, logements & bureaux, Buenos Aires



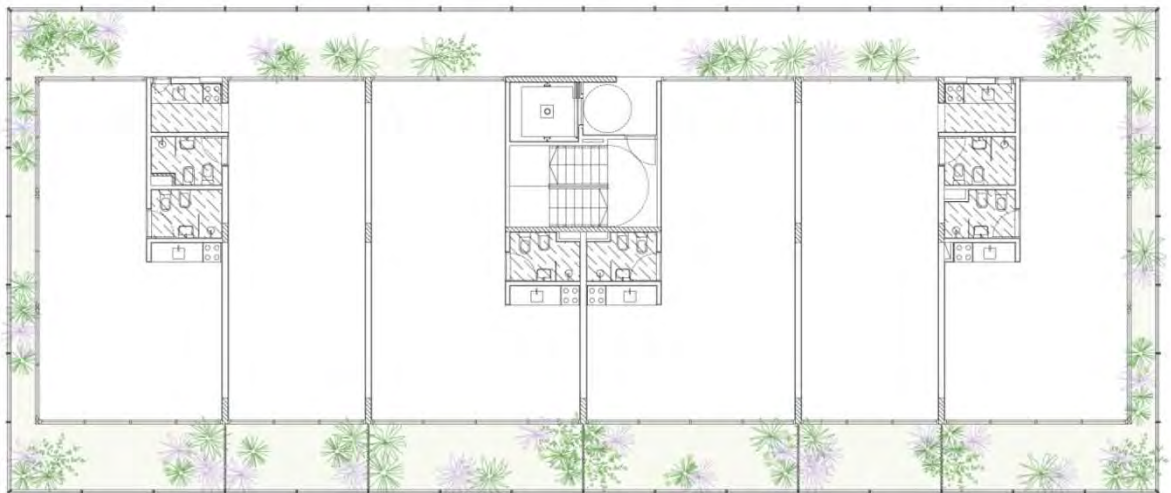


Plan d'étage courant

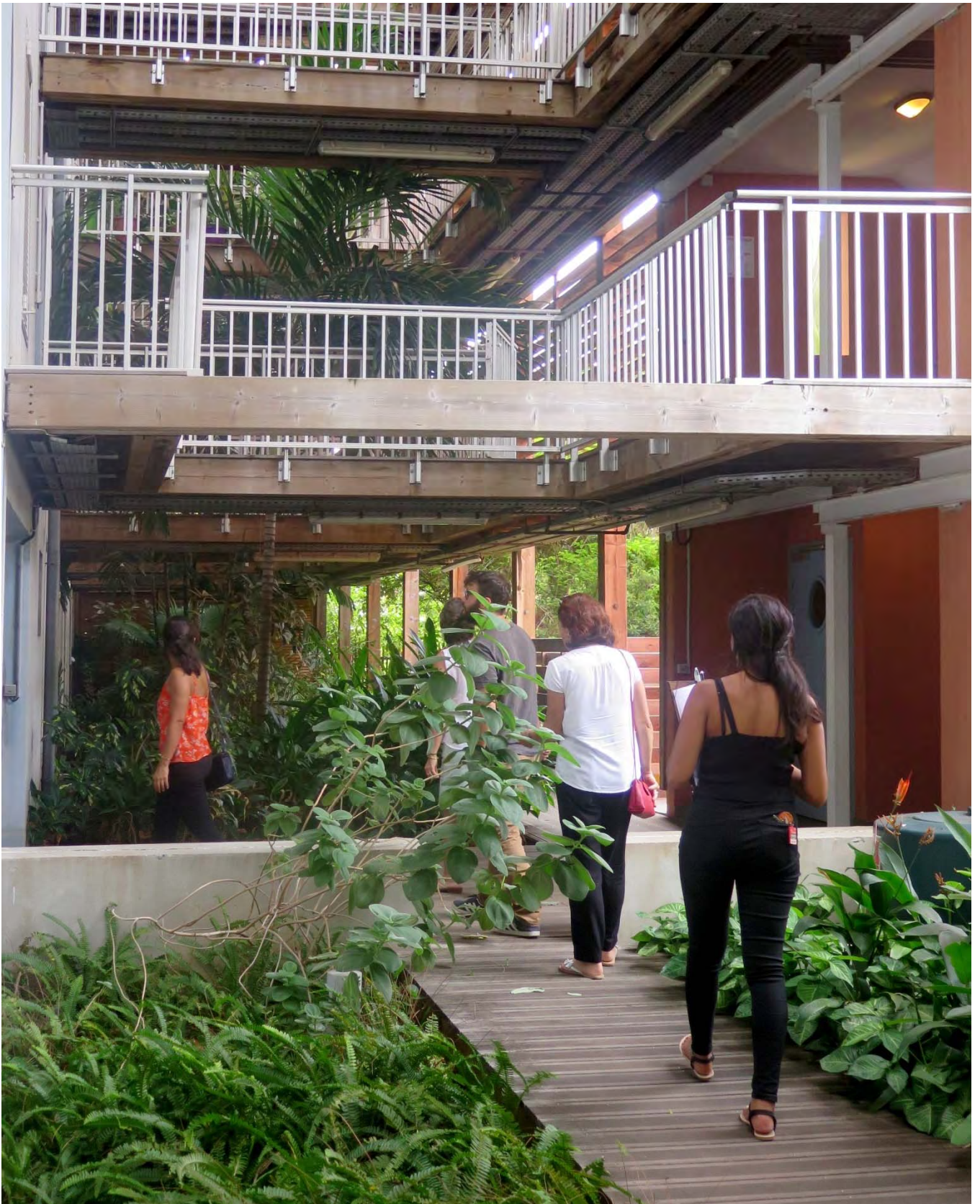




Adamo-Faiden
Edificio Plaza, bureaux, Buenos Aires



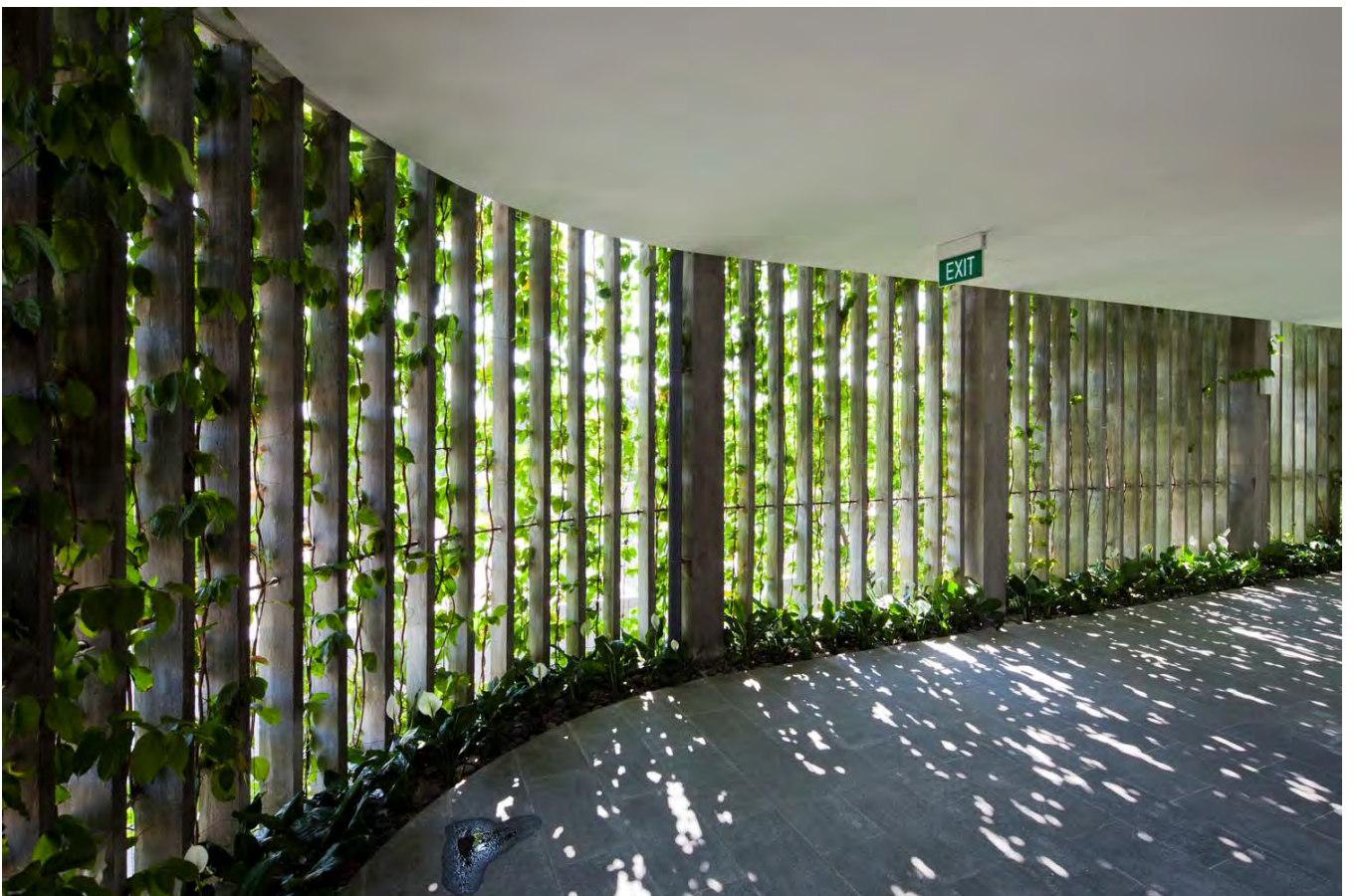


**Lab Réunion**

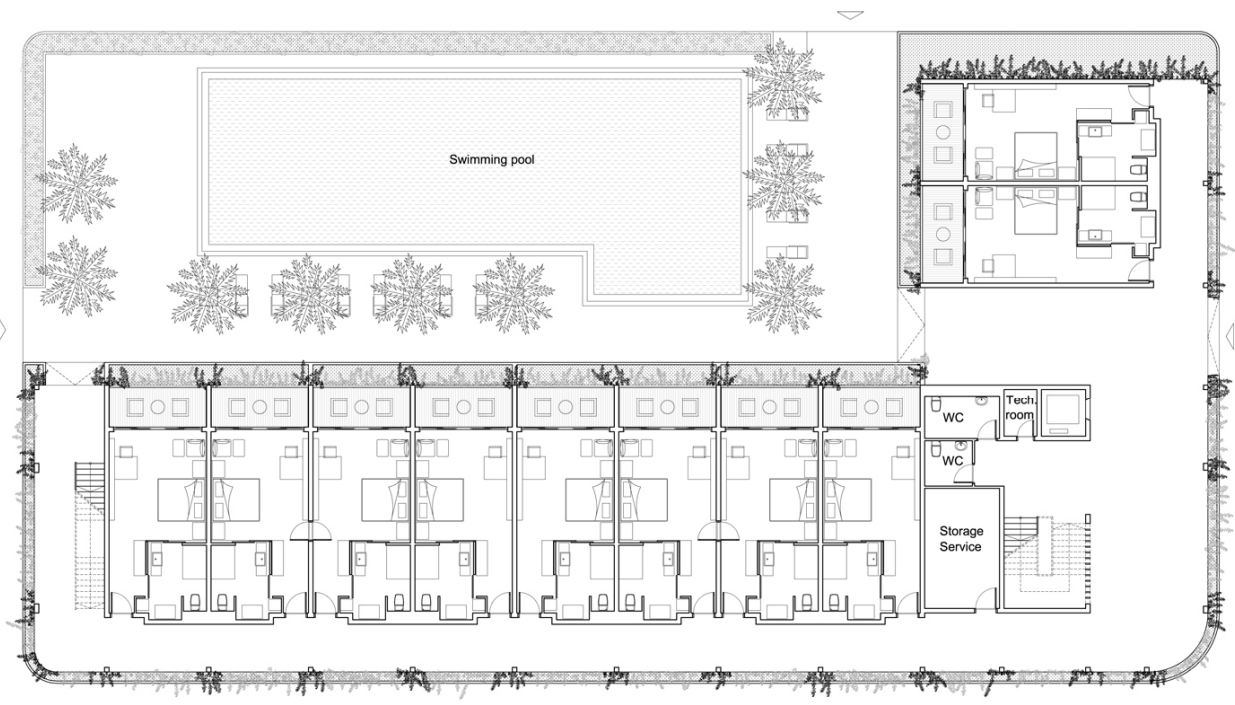
Ilet du centre, logements, Saint-Pierre, La réunion



Vo Trong Nghia
Hotel Naman Babylon

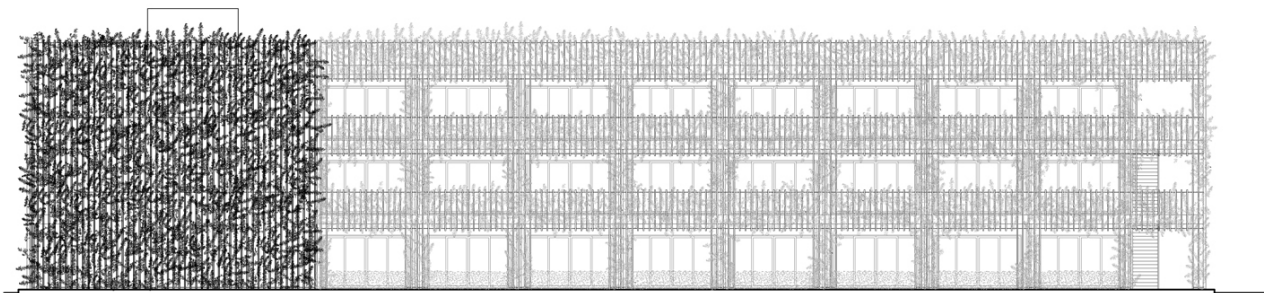






0 2 4 6M

FIRST FLOOR



0 2 4 6M

NORTH-EAST ELEVATION

Au travers de ce premier tour d'horizon force est de constater qu'il existe de nombreuses idées préconçues sur les bénéfices de la nature, notamment en ville. Ces questions de "bon sens", qui ne présentent généralement pas de véritable fondement, renvoient à la double dimension de la nature, à la fois culturelle et scientifique et soulignent l'importance d'établir des ressources documentaires fiables, basées autant que possible sur des retours d'expérience.

La végétalisation des structures construites est pour l'instant suggérée pour valider certaines exigences dans les certifications écologiques mais n'est intégrée que superficiellement dans les méthodes environnementales. Les complications techniques et réglementaires qu'elle entraîne, la maintenance et la fragilité accrues semblent être autant de facteurs qui n'incitent pas les concepteurs et les investisseurs à s'investir dans cette voie.

Pourtant l'association de l'architecture et de la végétation, au-delà des effets de mode, semble pouvoir présenter de réels atouts environnementaux, elle favorise notamment la biodiversité et permet de refaire le lien avec les trames écologiques vertes et bleues qui se dessinent dans et entre les villes. Elle pourrait permettre également d'améliorer globalement et localement la qualité de l'air et les facteurs hygrométriques, la qualité des sols et de l'eau, la gestion des pluies. Sans compter encore les aspects sociologiques, psychologiques et de santé liés à la proximité de la végétation et aux activités liées à son entretien.

Il convient également de rappeler deux points importants :

Tout d'abord que les bâtiments occupent l'espace en trois dimensions et qu'à ce titre ils permettent de démultiplier les surfaces potentiellement offertes à la végétalisation. Puis qu'il n'est pas toujours évident de trouver des surfaces libres en cœur de ville pour aménager des espaces plantés.

Incorporer des éléments d'infrastructure verte dans projets de rénovation et de construction neuve semble ainsi confiner à l'évidence.

Il reste à démontrer la valeur économique et communautaire de ces solutions, établir des réponses techniquement envisageables et à inspirer la politique de planification et les réglementations en matière de construction.

Un autre aspect important vient complexifier cette relation pourtant désirable. Au-delà de l'opposition un peu simpliste entre une architecture qui serait perçue comme ordonnée, artificielle et solide et une végétation informelle et fragile, c'est toute la question de la nature vivante de la végétation qui se pose et s'oppose à la stabilité du construit. La végétation est en effet organique, cyclique et saisonnière, du moins sous nos latitudes, et présente une émergence et un déclin, comme tous les êtres vivants. Inscrire la végétation dans le construit c'est inscrire celui-ci dans les cycles du vivant, accepter de ramener une part d'incertitude, de travail constant et de salissure.

E *Bibliographie*

Classée par chapitres

Général

-
- 2 ADEME Agence de l'environnement et de la Maitrise de l'Energie (2018): *Aménager avec la nature en ville*. Ed. ADEME coll. Expertises, réf. 010658.
- DOVER, John W. (2015): *Green infrastructure, incorporating plants and enhancing biodiversity in buildings and urban environments*. Ed. Routledge studies in urban ecology, Taylor & Francis, London, New York.
- 1 REY A. (2000): *Dictionnaire historique de la langue française*, éditions Dictionnaires le Robert, Paris.
- SCHUITEN L. & LOZE P. (2010). *Vers une cité végétale*. Mardaga, Wavre

A *Introduction et historique*

Les numéros renvoient aux références dans le texte

-
- 3 / 4 / 7 / 9 DUNNETT, N.P. & KINGSBURY, N. (2004): *Planting Green Roofs and Living Walls*. Timber Press, Portland, Oregon.
- 8 GETTER, K.L. & ROWE, D.B. (2008): *Media depth influences Sedum green roof establishment*. Urban Ecosystems.
- MONTERO FENOLLOS J. R. (2020): *Les jardins suspendus de Babylone, la plus mystérieuse des sept merveilles du monde*, National Geographic. Consulté 6 juin 2022.
<https://www.nationalgeographic.fr/histoire/2020/07/les-jardins-suspendus-de-babylone-la-plus-mysterieuse-des-sept-merveilles-du-monde>
- 5 PECK, S.W., CLALLAGHAN, C., KUHN, M.E., & BASS, B. (1999): *Greenbacks from Green Roofs: Forging a new industry in Canada. Status report on benefits, barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology diffusion*. Canada Mortgage and Housing Corporation, Ottawa.
- 6 VELAZQUEZ, L.S. (2004): *SkyGardens – travels in landscape architecture*. Greenroofs.com.
www.greenroofs.com/archives/sg_jan-apr04.htm.

B.1 *La nature comme indicateur*

ADEME (2012): *Bioindicateurs : des outils biologiques pour des sols durables*. Fiches outils, <http://www.ademe.fr/bioindicateurs-outils-biologiques-sols-durables-fiches-outils>

ADEME (2017): *Les bio-indicateurs de l'état des sols. Principe et exemples d'utilisation. Nouveaux résultats de recherche et démonstration*. Ed. ADEME coll. Expertises, réf. 010216.

ADEME (2012): *Bioindicateurs et phytotechnologies, des outils biologiques pour des sols durables*.

Journées Techniques Nationales, Paris, 16 & 17 octobre 2012. Recueil des interventions.

AEA Technology (2005): *Étude pour la Commission européenne dans le cadre du Programme Clean Air for Europe (CAFE), CAFÉ, Cost-Benefice-Analysis, Baseline analysis 2000 to 2020*.

- 1 CASTEL, Jean-François (2017): *Biosurveillance végétale et qualité de l'air*
Support de conférence, 5 octobre 2017, INRA-AgroParisTech.
- 2 CUNY, Damien (2012): *Introduction à la biosurveillance végétale et fongique de la qualité de l'air*. Journée scientifique, 25 janvier 2012, Académie nationale de Pharmacie et Académie des Technologies.

GARREC J.P., Van HALUWYN C. (2002): *Biosurveillance végétale de la qualité de l'air. Concepts, méthodes et applications*. Ed. Tec et Doc – Lavoisier.

RAUSCH DE TRAUBENBERG C., GALSOMIES L., MARTINET Y. (2013): *Pollution atmosphérique par les métaux en France : 10 ans de biosurveillance des retombées*. Co-édition ADEME – EDP sciences.
<http://www.ademe.fr/pollution-atmospheriquemetaux>

B.2 *Le végétal comme filtre de la pollution*

- 1 Abbé BERTHOLON, Pierre (1783): *De l'électricité des végétaux : ouvrage dans lequel on traite de l'électricité de l'atmosphère sur les plantes, de ses effets sur l'économie des végétaux, de leurs vertus médico & nutritivo-électriques, & principalement des moyens pratiques de l'appliquer utilement à l'agriculture, avec l'invention d'un électro-végétomètre*. Paris, Didot Jeune.
- 4 ADEME Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie (2018): *Aménager avec la nature en ville*. Ed. ADEME coll. Expertises, réf. 010658.

ADEME et Conseil National du Bruit : *Analyse bibliographique des travaux français et européens : le coût social des pollutions sonores*.
- 13 BADR EL-DIN SM, ABDEL-AZIZ RA. (2018): *Potential uses of aquatic plants for wastewater treatment*. J Microbiol Biotechnol Rep.
- 7 CALDERON GUERRERO, C. (2014): *Urban trees and atmospheric pollutants in big cities: effects in Madrid*, Thèse de doctorat, Universidad Politécnica de Madrid.

Centre d'information et de documentation sur le bruit (2013): *Bruit et santé*.
<http://www.bruit.fr/images/stories/pdf/guide-bruit-sante-cibd-2013.pdf>

FORSSSEN J., DEFRANCE J., VINCENT B. et al. (2013): *Holistic and sustainable abatement of noise by optimized combinations of natural and artificial means* – Projet HOSANNA finance par l'Union Européenne (FP2/2007-2013) Summary brochure.
- 9 FRANZETTI A., GANDOLFI I., BESTETTI G., PADOA SCHIOPPA E., CANEDOLI C., BRAMBILLA D., CAPPELLETTI D., SEBASTIANI B., FEDERICI E., PAPANICHI M., et al (2020): *Plant-microorganisms interaction promotes removal of air pollutants in Milan (Italy) urban area*. J Hazard Mater. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121021>

JANHÄLL, Sara (2015): *Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion*, Article dans Atmospheric Environment, Swedish National Road and transport Research Institute – VTI, Sweden.
- 16 KRAGH J. (1982): *Road traffic noise attenuation by belts of trees and bushes*. Danish Acoustical Laboratory.

- 6 MCDONALD AG, BEALEY WJ, FOWLERD, DRAGOSITS U, SKIBA U, SMITH RI, DONOVAN RG, BRETT HE, HEWITT CN, NEMITZ E. (2007): *Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM10 in two UK conurbations*. Atmos Environ, 41:8455-8467. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.025>
- 15 OMS (2009): *Valeurs guide concernant le bruit nocturne en Europe*.
- 11 SÁNCHEZ-LÓPEZ AS. et al. (2018): *Leaf epiphytic bacteria of plants colonizing mine residues: possible exploitation for remediation of air pollutants*. Front Microbiol 9:1-16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03028>
- 8 UNDUGODA LJ, KANNANGARA S., SIRISENA DM. (2016): *Aromatic Hydrocarbon degrading fungi inhabiting the phyllosphere of ornamental plants on roadsides of urban areas in Sri Lanka*. J Bioremediation Biodegrad. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000328>
- 10 WEYENS N. et al. (2015): *The role of plant microbe interactions and their exploitation for phytoremediation of air pollutants*. Int J Mol Sci 16:1-14. <https://doi.org/10.3390/ijms161025576>
- 2 WOLVERTON BC., JOHNSON A., BOUNDS K. (?): *Interior Landscape Plants for Indoor Air Pollution Abatement*, NASA TM-101766.
- 5 WROBLEWSKA Katarzyna, RYONG JEONG Byoung (2021): *Effectiveness of plants and green infrastructure utilization in ambient particulate matter removal*. Environmental Sciences Europe, Springer Open.

Webs

- 12 *Des plantes pour dépolluer les sols ?*
<https://www.lesoir.be/art/923361/article/demain-terre/environnement/2015-06-30/des-plantes-pour-depolluer-sols>
- 6 *Impact des polluants de l'air sur la végétation*.
<https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/impacts-polluants-air-sur-vegetation>
- 14 *Observatoire du bruit en Île-de-France*
<https://www.bruitparif.fr>
- 3 *Qu'est-ce que la pollution de l'air ?*
<https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et-sante/air/articles/qu-est-ce-que-la-pollution-de-l-air>

B.3 Le végétal comme régulateur

ADEME (2012) : *Adaptation au changement climatique*. 12 fiches pour agir dans les collectivités locales.

ADEME, Région Île de France (2012) : *Guide de recommandation pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain*. Guide rédigé par I CARE, ALTO STEP, ALTO Ingénierie.

CNRC (Conseil National de recherches du Canada) en collaboration avec Environnement Canada (2002) : *Un projet pour quantifier les avantages des terrasses-jardins*.

- DE MUNCK C. (2013) : *Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse.
- DIMOUDI A., NIKOLOPOULOU M. (2003): *Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits*. Energy and buildings.
- GREUILLET C., GALSOMIÈS L. (2013) : *L'îlot de chaleur urbain et le lien avec la qualité de l'air*. Pollution Atmosphérique, vol.163, n° spécial.
- 6 ICHINOSE T., SHIMODOZONO K., & HANAKI K. (1999): *Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo*. Atmospheric Environment.
- 3 KUSAKA H. (2008): *Recent progress on urban climate study in Japan*. Geographical Review Japan.
- MANGONE, G., & VAN DER LINDEN, K. (2014). *Forest microclimates: Investigating the performance potential of vegetation at the building space scale*. Building and Environment
- MUSY M. et al. (2014): *Rôle du végétal dans le développement urbain durable ; une approche par les enjeux liés à la climatologie, l'hydrologie, la maîtrise de l'énergie et les ambiances*. VegDUD, ANR.
- MUSY M. (coord.) (2014) : *Une ville verte. Les rôles du végétal en ville*. Éd. Quae.
- OCHOA DE LA TORRE, José Manuel (1999): *La vegetación como instrumento para el control microclimático*. Thèse doctorale sous la direction de Rafael SERRA FLORENSA, Universitat Politècnica de Catalunya, ETSAB, Barcelona.
- OTTELÉ, M., VAN BOHEMEN, H. D., & FRAAIJ, A. L. A. (2010): *Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls*. Ecological Engineering.
- 2 REY G., FOUILLET A., JOUGLA E., & HEMON D. (2007): *Heat waves, ordinary temperature fluctuations and mortality in France since 1971*. Population, n°62, 2007.
- 1 REY G., FOUILLET A., BESSEMOULIN P., FRAYSSINET P., DUFOUR A., JOUGLA E. & HEMON D. (2009): *Heat exposure and socio-economic vulnerability as synergistic factors in heat-wave-related mortality*. European Journal of Epidemiology.
- SHASHUA-BAR L., HOFFMAN M.E. (2000): *Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees*. Energy and Buildings, vol. 31, n°3.
- 4 SHEPHERD, J.M., PIERCE, H., & NEGRI, A.J. (2002): *Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite*. Journal of Applied Meteorology.
- 5 WHITFORD, V., ENNOS, A.R., & HANDLEY, J.F. (2001): *City form and natural process – indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK*. Landscape and Urban Planning.

B.4 *Le végétal comme support*

- AGENCE CHARTIER-DALIX (2017): *Groupe scolaire de la biodiversité et gymnase à Boulogne-Billancourt*. Dans: Yudina A., Villes jardins. Vers une fusion entre le végétal et la ville. Tour du monde des projets et réalisations les plus innovants. Editions Ulmer.
- 2 ARONSON M. F., LA SORTE F. A., NILON C. H., KATTI M., GODDARD M. A., LEPCZYK C. A., WARREN P. S., WILLIAMS N. S. G., CILLIERS S., CLARKSON B., DOBBS C.,

- DOLAN R., HEDBLUM M., KLOTZ S., LOUWE KOOIJMANS J., KÜHN I., MACGREGOR-FORS I., MCDONNELL M., MONTBERG U., PYSEK P., SIEBERT S., SUSHINSKY J., WERNER P., WINTER M. (2014): *A global analysis of the impacts of urbanization on bird and diversity reveals key anthropogenic drivers*. Proceedings of the Royal Society of London B : Biological Sciences, vol. 281, issue 1780, 20133330.
- BENINDE J., VEITH M., HOCHKIRCH A. (2015): *Biodiversity in cities needs space: a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation*. Ecology Letters, vol. 18, n°6.
- BONTHOUX S., BRUN M., DI PIETRO F., GREULICH S., BOUCHÉ-PILLON S. (2014): *How can wastelands promote biodiversity in cities? A review*. Landscape and Urban Planning.
- CLERGEAU, P. (Coord.) (2018): *La biodiversité en ville dense : nouveaux regards, nouveaux dispositifs*. Programme de recherche ANR ECOVILLE, Synthèse opérationnelle, Plante&Cit .
- 7 COMBA L., CORBET S.A., BARRON A., BIRD A., COLLINGE S., MIYAZAKI N. & POWELL M. (1999): *Garden flowers: Insect visits and the floral reward of horticulturally modified variants*. Annals of Botany.
- CROCI S., BUTET A., GEORGES A., AGUEJDAD R., CLERGEAU P. (2008): *Small urban woodlands as biodiversity conservation hot-spot: a multi-taxon approach*. Landscape Ecology, vol. 23, n°10.
- 11 / 15 CROUCHER, K., MYERS, L., & BRETHERTON, J. (2007): *The Links Between Greenspace and Health: a Critical Literature Review*. Greenspace Scotland, Stirling.
- 5 DAWSON, D. (1994): *Are habitat corridors conduits for animals and plants in a fragmented landscape? A review of the scientific evidence*. English Nature, Peterborough.
- 8 DENNIS R.L.H., DAPPORTO L. & DOVER J.W. (2014): *Ten years of the resource-based habitat paradigm: the biotope-habitat issue and implications for conserving butterfly diversity*. Journal of Insect Biodiversity.
- 3 DIAMOND J.M. (1975): *The island dilemma: lessons of modern biogeographic studies for the design of nature reserves*. Biological Conservation.
- 14 DONOVAN, G.H., BUTRY, D.T., MICHAEL, Y.L., PRESTEMON, J.P., LIEBHOLD, A.M., GATZIOLIS, D., & MAO, M.Y. (2013) *The relationship between trees and human health evidence from the spread of the emerald ash borer*. American Journal of Preventive Medicine.
- 9 DUNNING J., DANIELSON, B., & PULLIAM H. (1992): *Ecological processes that affect populations in complex habitats*. Oikos.
- FERENC M., SEDLÁČEK O., FUCHS R. (2014): *How to improve urban greenspace for woodland birds: site and local-scale determinants of bird species richness*. Urban Ecosystems, vol. 17, n°2.
- 4 FORMAN, R.T.T. (1995): *Some general principles of landscape and regional ecology*. Landscape Ecology.
- 12 FULLER, R.A., IRVINE, K.N., DEVINE-WRIGHT, P., WARREN, P.H., & GASTON, K.J. (2007): *Psychological benefits of greenspace increase with biodiversity*. Biology Letters.
- 10 GERLACH-SPRIGGS, N., KAUFMANN, R.E., & WARNER, S.B.J. (1998): *Restorative Gardens: The Healing Landscape*. Yale University Press, New Haven, CT.
- 16 KAPLAN, R. & KAPLAN, S. (1989): *The Experience of Nature: A Psychological Perspective*. Cambridge University Press, Cambridge.
- LAUGIER R. (2013) : *La biodiversité – Une synth se documentaire*. Centre de Ressources Documentaires Am nagement, Logement et Nature / METL-MEEM.
- LONGCORE T., RICH C. (2004): *Ecological light pollution. Reviews*. Frontiers in Ecology and the Environment, vol. 2, n°4.

- 13 MEEM (2016) : *Projet de loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages*. Brochure.
- MITCHELL, R. & POPHAM, F. (2007): *Greenspace, urbanity and health: relationships in England*. Journal of Epidemiology and Community Health.
- MORRIS, N. (2003): *Health, Well-being and Open Space. OPENspace: the research centre for inclusive access to outdoor environments*. Edinburgh College of Art and Heriot-Watt University, Edinburgh.
- MURATET A., MACHON N., JIGUET F., MORET J., PORCHER E. (2007): *The role of urban structures in the distribution of wasteland flora in the greater Paris area, France*. Ecosystems, vol. 10.
- OBRIST K., SATTLER M., T., HOME R., GLOOR S., BONTADINA F., NOBIS M., BRAAKER S., DUELLI P., BAUER N., DELLA BRUNA P., HUNZIKER M., MORETTI M. (2012): *La biodiversité en ville – pour l'être humain et la nature*. Notice pour le praticien n°48, Institut fédéral de recherches WSL.
- 1 OWEN J. (2010): *Wildlife of a Garden: A thirty-five year study*. The Royal Horticultural Society, Peterborough.
- 17 PRETTY, J., PEACOCK, J., SELLENS, M., & GRIFFIN, M. (2005): *The mental and physical health outcomes of green exercise*. International Journal of Environmental Health Research.
- 6 SUKOPP H. (1990): *Urban ecology and its application in Europe*. In *Urban Ecology*. Ed. by H. Sukopp, SPB Academic, The Hague.

Webs

- 18 *Biophilie ou la nature au centre de l'habitat*.
<http://www.karibati.fr/la-biophilie-ou-la-nature-au-centre-de-lhabitat/>

B.5 *Le végétal comme source*

ADEME, INERIS, INP/ENSAT, UNIVERSITE LORRAINE/ENSAIA, ISA LILLE (2012) : *Base de données des teneurs en éléments traces métalliques de plantes potagères (BAPPET)*. Présentation et notice d'utilisation. 16 p.
<http://www.ademe.fr/base-donnees-teneurs-elements-traces-metalliques-plantes-potageres-bappet-presentation-notice-dutilisation>

DOUAY F., PRUVOT C., MAZZUCA M., HOWSAM M., FOURRIER H., DE SAINT MAHIEU A.S., WATERLOT C. (2005): *Cadmium, lead and zinc concentrations in soil and vegetables from kitchen gardens in urban and highly-contaminated areas of northern France: evaluation of the risk of population exposure*. In: Proceedings of 9th International FZK / TNO Conference on Soil-Water Systems, Bordeaux, France, 3-7 October 2005.

FEIDT C., GROVA N., LAURENT C., RYCHEN G., LAURENT F. (2000): *Le transfert des micropolluants organiques dans la chaîne alimentaire – Etat et perspectives de recherche*. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, Dossier: Sécurité sanitaire des aliments et industrie, vol. 7, n°5.

HEINEGG A., MARAGOS P., MASON E., RABINOWICZ J., STRACCINI G., WALSH H. (2002): *Soil contamination and urban agriculture - A practical guide to soil contamination issues for individuals and groups*. McGill University, Montreal, Quebec, Canada.

LAURENT C., FEIDT C., LAURENT F. (2005) : *Contamination des sols : transfert des sols vers les animaux*. ADEME, EDP Sciences.

MITCHELL, R.G., SPLIETHOFF, H.M., RIBAUDO, L.N., LOPP, D.M., SHAYLER, H.A., MARQUEZ-BRAVO, L.G., LAMBERT, V.T., FERENZ, G.S., RUSSELL-ANELLI, J.M., STONE, E.B., & MCBRIDE, M.B. (2014) : *Lead (Pb) and other metals in New York City community garden soils: Factors influencing contaminant distributions*. Environmental Pollution.

RÉMY E., DOUAY F., CANAVÈSE M., LEBEAU T., BERTHIER N., BRANCHU P., PINTE E. (2015) : *Jardins collectifs urbains et contaminations des sols : quels enjeux en termes d'évaluation et de gestion des risques ?* Topia, 18p.

SÄUMEL I., KOTSYUK I., HÖLSCHER M., LENKEREIT C., WEBER F., KOWARIK I. (2012): *How healthy is urban horticulture in high traffic areas? Trace metal concentrations in vegetable crops from plantings within inner city neighbourhoods in Berlin, Germany*. Environmental Pollution, Vol. 165.

SCHWARTZ C. (2013) : *Les sols de jardins, supports d'une agriculture urbaine intensive*. Vertigo – la revue électronique en sciences de l'environnement, hors-série 15. <https://vertigo.revues.org/12858>

TREMEL - SCHAUB A., FEIX I., (2005) : *Contamination des sols : transferts des sols vers les plantes*. ADEME, EDP Sciences.

UNEP-IPSOS (2010) : *Enquête. Un jardin, un bien social à partager. Les Français font le choix du vert*.

UNEP-IPSOS (2011) : *Enquête. Le jardin rêvé des Français*.