



AMÉNAGER

AVEC LA NATURE EN VILLE

Des idées préconçues
à la caractérisation
des effets
environnementaux,
sanitaires et
économiques



ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

Ce document est édité par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Coordination technique : Sarah MARQUET, Service Organisations Urbaines

Rédaction : Isabelle FEIX, Sarah MARQUET, Emmanuel THIBIER

Contribution et relecture : Patrice ANDRE, Mohamedou BA, Antonio BISPO, Frédérique CADIERE, Thomas EGLIN, Laurence GALSOMIES, Cécile GRAND, Samira KHERROUF, Anne LEFRANC, Franck MAROT, Solène MARRY, Céline PHILLIPS, Hélène ROUSSEL, Daniela SANNA

Coordination édition : Véronique DALMASSO, Service Communication et Formation des Professionnels

Création graphique : agence cent vingt neuf

Impression : Imprimé en France par Groupe Lecaux imprimeries
- 260, rue des noisetiers 50 110 Tournelville - certification PEFC, Iso 14001, Imprim'vert, fsc, charte de la diversité

Brochure réf. 010658

ISBN print : 979 1 02971 179 4 - Octobre 2018 - 400 exemplaires

ISBN web : 979 1 02971 180 0

Dépôt légal : ©ADEME Éditions, Octobre 2018

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (Art L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (Art L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

AVANT-PROPOS

Préserver, développer, restaurer la nature en ville, tant de défis au cœur des projets d'aménagement.

La nature en ville est entendue dans cet ouvrage comme l'ensemble des espèces vivantes en zone urbanisée, qu'elles soient 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. Les sols en particulier ont un rôle clé, en tant que support de toute forme d'aménagement et dans la fourniture des fonctions et des services de la nature en ville, grâce aux propriétés physiques, biologiques et chimiques qui leur sont propres et en interaction étroite avec les êtres vivants qu'ils abritent ou qu'ils supportent.

Les pratiques visant à favoriser l'introduction et le renforcement de la nature en ville dans l'aménagement urbain s'appuient sur de nombreux principes souvent issus du bon sens et parfois d'idées préconçues. Il manque parfois une dimension objective : la quantification des effets environnementaux, sanitaires et économiques de la nature en ville. La mise en œuvre de ces principes peut alors être inadaptée et ne pas produire les effets attendus, être perçue comme une contrainte en comparaison avec les bénéfices prévus, voire être source d'impacts négatifs.

Afin de dépasser les intuitions sur les opportunités et les contraintes de la nature en ville, cet ouvrage réalisé par des experts de l'ADEME s'appuie sur des sources documentaires pour donner des clés de compréhension des phénomènes en jeu et des conditions dans lesquelles ils se produisent, ainsi que des ordres de grandeur, chiffres-clés à l'appui, pour caractériser les effets environnementaux, sanitaires et économiques de la nature en ville.

Destiné notamment aux services techniques des collectivités, cet ouvrage est complémentaire aux orientations proposées par ailleurs pour un aménagement favorable à la nature en ville. Il donne le point de vue de l'ADEME sur des effets de la nature en ville pour différents enjeux liés à l'urbanisme durable : la biodiversité, la qualité de l'air, la qualité des sols, l'ambiance sonore, la gestion de l'eau, le confort thermique, la concentration en gaz à effet de serre, l'alimentation, l'attractivité des espaces urbanisés et l'approche économique.

(a) ADEME (2015) : *Les sols portent notre avenir*, éd. ADEME Connaître pour agir, Réf. 8387. 16 p. <http://www.ademe.fr/sols-portent-avenir>



SOMMAIRE

L'ouvrage s'articule en quatorze chapitres en lien avec les leviers de l'aménagement urbain pour des villes et territoires durables. Chaque chapitre est fondé sur une idée préconçue et apporte des éléments de compréhension documentés et, dans la mesure du possible, chiffrés, des phénomènes en jeu et des effets (environnementaux, sanitaires et/ou économiques) de la nature en ville.

Voici un quiz d'entrée en matière, les réponses sont développées dans l'ouvrage aux pages indiquées.

INTRODUCTION

6

1. NATURE EN VILLE ET BIODIVERSITÉ

Idée préconçue : La nature en ville favorise la biodiversité.

VRAI... et FAUX : La biodiversité est favorisée sous certaines conditions.

8

2. NATURE EN VILLE ET BIOSURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'AIR ET DES SOLS

Idée préconçue : La nature en ville permet de mettre en œuvre une biosurveillance de la qualité de l'air et des sols.

VRAI : Elle permet d'examiner les écosystèmes en intégrant l'ensemble des facteurs environnementaux.

14

3. NATURE EN VILLE ET QUALITÉ DE L'AIR [ZOOM SUR LA VÉGÉTATION ET SON SUBSTRAT]

Idée préconçue : La nature en ville contribue à préserver la qualité de l'air [zoom sur la végétation et son substrat].

VRAI et FAUX : La végétation contribue à la circulation de l'air voire à la filtration et à l'absorption de certaines particules atmosphériques et polluants, mais peut être une source de polluants et d'allergènes.

20

4. NATURE EN VILLE ET LUTTE CONTRE LA POLLUTION DES SOLS URBAINS

Idée préconçue : La nature en ville permet de « dépolluer » les sols urbains [lutte contre la pollution].

VRAI et FAUX : Les phytotechnologies contribuent à la gestion de certains sols pollués plutôt qu'à leur stricte dépollution.

26

5. NATURE EN VILLE ET AMBIANCES SONORES

Idée préconçue : La nature en ville permet de limiter les nuisances sonores.

VRAI : Cependant, son effet est à relativiser par rapport à l'effet d'autres dispositifs (écrans acoustiques, isolation acoustique des bâtiments). L'intégration d'éléments de nature en ville a un impact positif sur le ressenti et l'appréciation de l'ambiance sonore.

31

6. NATURE EN VILLE ET GESTION DES EAUX PLUVIALES ET DES INONDATIONS

Idée préconçue : la nature en ville permet de gérer les eaux pluviales et de limiter les inondations (régulation).

VRAI : Cependant, la contribution de la nature en ville à la gestion des eaux pluviales et à la limitation des inondations dépend de plusieurs paramètres et vient en complément d'autres mesures.

37

7. NATURE EN VILLE ET LUTTE CONTRE LA POLLUTION DE L'EAU

Idée préconçue : La nature en ville permet de limiter la contamination de l'eau ou de la traiter [lutte contre la pollution].

VRAI : Cependant, les rendements sont variables selon les systèmes et la pollution est en partie déplacée.

42

8. NATURE EN VILLE [ZOOM SUR LES VÉGÉTAUX ET LES SOLS] ET CONFORT THERMIQUE ESTIVAL EN VILLE

Idée préconçue : La nature en ville améliore le confort thermique estival en ville, en apportant de la fraîcheur [zoom sur les végétaux et les sols].

VRAI : Cependant, l'effet de la nature en ville repose sur la présence d'eau et dépend de plusieurs paramètres.

48

9. NATURE EN VILLE ET CONFORT THERMIQUE DANS LES BÂTIMENTS

Idée préconçue : La nature en ville permet d'améliorer le confort thermique des bâtiments.

VRAI : Cependant, l'effet repose sur la présence d'eau, des dispositifs et une végétation adaptée, et vient en complément d'une conception ou rénovation performante du bâti et adaptée à sa localisation.

56

10. NATURE EN VILLE ET LIMITATION DE LA CONCENTRATION EN GAZ À EFFET DE SERRE [ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE]

Idée préconçue : La nature en ville permet de stocker du carbone [atténuation du changement climatique].

VRAI : Cependant, cela ne suffit pas à compenser l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre d'une ville et au-delà du stockage de carbone, il faut considérer le bilan de l'ensemble des GES, y compris les émissions évitées.

64

11. NATURE EN VILLE, APPROVISIONNEMENT ET ALIMENTATION LOCALE

Idée préconçue : La nature en ville peut être une source d'approvisionnement et d'alimentation locale.

VRAI : Les jardins peuvent être une source d'aliments, mais il est nécessaire de veiller à la qualité des milieux pour garantir la qualité des denrées et éviter leur contamination.

73

12. NATURE EN VILLE ET ATTRACTIVITÉ DES ESPACES URBANISÉS

Idée préconçue : La nature en ville contribue à l'attractivité des espaces urbanisés.

VRAI : La nature en ville accroît la valeur des espaces urbains.

81

13. NATURE EN VILLE ET DÉPENSES PUBLIQUES

Idée préconçue : La nature en ville engendre plus de dépenses que les surfaces minérales.

VRAI... et FAUX : La nature en ville peut engendrer des dépenses, fonction des choix de végétalisation et des modes de gestion, mais elle participe à la valorisation des espaces urbanisés.

86

14. NATURE EN VILLE ET VALEUR ÉCONOMIQUE DES ESPACES

Idée préconçue : La nature en ville n'a de valeur économique qu'à travers la réserve foncière qu'elle représente pour l'urbanisation.

FAUX : La nature en ville a une valeur économique, liée aux services écosystémiques qu'elle assure.


91

DES OUTILS POUR AMÉNAGER AVEC LA NATURE EN VILLE

96

CLÉ DE LECTURE :

Pour chaque chapitre :

- Les lettres dans le texte renvoient aux notes de bas de page.
- Les chiffres entre crochets renvoient aux références bibliographiques situées en fin de chapitre.
- Les  indiquent un chiffre clé.



INTRODUCTION

La nature désigne les milieux (l'air, l'eau, les sols), les organismes vivants (bactéries, faune, flore) et les écosystèmes qu'ils forment (naturels, agricoles, forestiers et urbains). Elle a à la fois une dimension affective et culturelle et une réalité objective prise en charge par l'écologie scientifique.

La nature en ville, ou nature dans la ville, se définit par une approche alliant la ville ou l'urbanité, et la nature. Le renforcement de cette alliance est un enjeu clé pour assurer l'équilibre des territoires et de leurs ressources : « L'idée même de ville doit être refondée comme un « système ouvert » qui collabore avec sa géographie, s'appuie sur les milieux naturels aménagés ou cultivés qui l'entourent, s'y glissent ou la portent. Les débats, les savoirs et les actes concernant la ville et la nature ne peuvent plus s'opposer ou s'ignorer, mais doivent au contraire se rejoindre et se croiser dans une approche résolument transversale.^(a) »

En France, depuis le début du XX^{ème} siècle, l'urbanisme a intégré la nature dans la ville en premier lieu en tant que facteur hygiénique et vecteur d'aménités, les espaces verts contribuant d'abord à aérer et à rendre agréable le cadre urbain. Au cours des dernières décennies, ce principe s'est enrichi en intégrant des enjeux et des exigences écologiques qui concernent notamment la qualité du cadre bâti, et une nouvelle vision du vivant centré sur la biodiversité^(b). Ainsi, le plan nature en ville^(c), lancé en 2010, a pour objectifs « d'améliorer la qualité de vie et le lien social, d'adapter la ville au changement climatique, de préserver la biodiversité et les services que l'on retire du bon fonctionnement des écosystèmes, et, enfin, de promouvoir des modes de production et de consommation durables qui soient favorables notamment au maintien et au développement des filières économiques de proximité »^(d).

Les perceptions des habitants sont en correspondance avec l'approche urbanistique : la nature en ville contribue à la **qualité des espaces urbains et du cadre de vie**. Elle permet de répondre aux attentes de loisirs et de bien-être, tout en offrant des lieux de rencontre, de lien social, de promenade.

La demande de nature en ville s'accompagne souvent d'une demande de nature maîtrisée et sans nuisance (insectes tels que les moustiques vecteurs de maladies, déjections de pigeons, ou pelouse non tondue par exemple). Si certaines espèces sont surreprésentées, certaines espèces et pratiques font partie intégrante des écosystèmes urbains et participent à la préservation de la biodiversité. L'enjeu réside alors dans la sensibilisation à l'environnement, aux fonctions de chaque espèce, à l'importance de la biodiversité et à ses multiples effets : environnementaux, sanitaires, voire économiques. Ils s'agit de diffuser la connaissance du fonctionnement des écosystèmes (comme par exemple les plantes toxiques, les espèces invasives, les réseaux de chaînes alimentaires, le recyclage de la matière organique). Les espaces de nature en ville peuvent y contribuer, être utilisés comme vecteurs de communication et modifier les perceptions. **Il est essentiel d'inverser le regard, « de situer la ville dans la nature »^(e).**

Pour la planification et l'aménagement des territoires, la question de la nature en ville est incontournable face aux enjeux environnementaux, sanitaires et socioéconomiques.

Néanmoins, il existe beaucoup d'**idées préconçues** sur les effets de la nature en ville, qui ne présentent parfois pas de véritable fondement. Cela renvoie notamment à la double dimension de la nature, à la fois culturelle et scientifique.

De nombreux impacts de la nature en ville, positifs comme négatifs, sont reconnus, mais tous ne sont pas objectivés et quantifiés. Des aménagements sont conçus pour préserver ou restaurer la nature en ville, sans que les moyens à y consacrer soient adaptés aux objectifs visés, ni leur impact quantifié en amont. Les mesures en faveur de la nature en ville ne génèrent donc pas toujours les résultats attendus et peuvent être perçues comme une contrainte plus qu'une opportunité de service rendu.

Cet ouvrage apporte un éclairage particulier sur la nature en ville, en complément des ouvrages donnant des orientations pour l'intégrer dans l'aménagement, il est centré sur ses effets.

La nature en ville est comprise ici 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 et sol).

Il s'agit, à travers un regard pluridisciplinaire, de donner des éléments de compréhension documentés et étayés de chiffres clés sur les effets de la nature en ville, les concurrences et synergies entre phénomènes et les ordres de grandeur des impacts. Les thèmes traités sont en lien avec les leviers de l'aménagement pour des villes et territoires durables : la biodiversité, la qualité de l'air, la qualité des sols, l'ambiance sonore, la gestion de l'eau, le confort thermique, la concentration en gaz à effet de serre, l'alimentation, l'attractivité des espaces urbanisés et l'approche économique.

(a) **MEDDTL** (2010) : *Plan Restaurer et valoriser la nature en ville*, 36 p.

(b) **REYGROBELLET, B.**, Conseil économique et social (2007) : *La nature dans la ville : biodiversité et urbanisme*, Journal officiel de la République française, avis et rapports du Conseil économique et social, 182 p.

(c) Ce plan concrétise l'engagement national de « restaurer et valoriser la nature en ville », issu des lois Grenelle 1 et 2 : loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement et loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement.

(d) Pour en savoir plus, consulter le portail de la Nature en Ville porté par le centre technique du végétal en ville Plante & Cité, plateforme qui présente les résultats des actions réalisées dans le cadre du plan "Nature en Ville" et les autres initiatives qui le poursuivent et l'enrichissent. <http://www.nature-en-ville.com/>

(e) **REYGROBELLET, B.**, Conseil économique et social (2007)



1 NATURE EN VILLE ET BIODIVERSITÉ

EN BREF

La biodiversité est favorisée sous certaines conditions

La nature en ville peut contribuer au développement et au maintien de la biodiversité en milieu urbain et offrir un refuge à certaines espèces. Cela nécessite non seulement d'augmenter ou de maintenir la surface de nature en ville (espaces verts, y compris sur le bâti, masses d'eau), mais aussi d'assurer des continuités écologiques par la combinaison de réservoirs de biodiversité et de corridors écologiques notamment. Cependant, le caractère écologique de ces continuités n'est pas systématique : les choix d'aménagement sont déterminants car ils peuvent contribuer à fragiliser et fragmenter les espaces naturels, et les pratiques peuvent neutraliser une partie des progrès obtenus grâce aux aménagements. La connaissance et la gestion éclairée des espaces naturels, des masses d'eau et des espaces verts (parcs, jardins, friches, accompagnements végétalisés des voies et des bâtiments, berges des masses d'eau, stades sportifs, cimetières, campings) est indispensable.



© Arnaud Bouissou/MEEM-MLHD

La biodiversité, de quoi parle-t-on ?

Selon la Convention sur la diversité biologique (CDB), la diversité biologique (ou biodiversité) correspond à la « variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces, ainsi que celle des écosystèmes ». Quatre composantes de la biodiversité sont généralement distinguées : diversité génétique (variabilité des gènes au sein d'une espèce), diversité spécifique (diversité des espèces vivantes), diversité écosystémique (diversité des écosystèmes sur Terre - êtres vivants et leur milieu) et diversité fonctionnelle (processus biologiques, fonctions et caractéristiques d'un écosystème).^[22]

(a) La trame verte et bleue a pour objectif « d'enrayer la perte de biodiversité en participant à la préservation, à la gestion et à la remise en bon état des milieux nécessaires aux continuités écologiques, tout en prenant en compte les activités humaines, et notamment agricoles, en milieu rural » (Code de l'Environnement, article L371-1). La trame verte comprend des espaces protégés, des espaces naturels, les corridors écologiques, la végétation le long de cours et plans d'eau. La trame bleue comprend les cours d'eau, des zones humides.

Éléments de cadrage sur la préservation de la biodiversité

La préservation de la biodiversité est un objectif national. Elle repose en particulier sur les schémas régionaux de cohérence écologique, les continuités écologiques et la création de trames vertes et bleues^(a). Cet objectif de préservation est conforté par la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages^(b) et l'opération Capitale française de la Biodiversité^(c) y contribue. La Stratégie Nationale pour la Biodiversité est inscrite dans le Code de l'Environnement.



La biodiversité nous fournit en biens et en services deux fois la valeur de ce que nous produisons chaque année^(d).

(b) LOI n° 2016-1087 du 8 août 2016.

(c) L'opération est portée par l'Agence française pour la biodiversité, Natureparif (l'agence régionale pour la nature et la biodiversité en Île-de-France), et Plante & Cité (centre d'ingénierie sur la nature en ville). Le thème en 2017 est « Aménager, rénover et bâtir en favorisant la biodiversité ». Pour en savoir plus : <http://www.capitale-biodiversite.fr/>

(d) LOI n° 2016-1087 du 8 août 2016.

LES ESPACES URBANISÉS : MENACE ET REFUGE POUR LA BIODIVERSITÉ

Les principales causes d'érosion de la biodiversité en France sont :

- la destruction et la dégradation qualitative des habitats par fragmentation, changement d'usage, artificialisation des sols et intensification des pratiques agricoles, la sylviculture et la pêche ;
- la surexploitation des ressources naturelles (ressources halieutiques, eau, sols, forêts) ;
- les pollutions de l'eau, des sols et de l'air ;
- le changement climatique ;
- les espèces exotiques envahissantes[22].

L'urbanisation provoque une baisse de la biodiversité, en particulier par l'imperméabilisation et la pollution qu'elle engendre[14 ; 23 ; 33]. Elle induit la dégradation et la fragmentation des habitats et perturbe les déplacements (quotidiens, saisonniers) et la dispersion^(d) des espèces. La lumière artificielle nocturne et le bruit peuvent gêner certaines espèces et créer des barrières écologiques [13 ; 18 ; 19 ; 21 ; 25 ; 38 ; 43]. Il existe d'autres risques : la concentration d'animaux domestiques prédateurs et les activités humaines (collisions avec des voitures) par exemple[14 ; 18 ; 39].

Par ailleurs, on observe une tendance à l'uniformisation de la biodiversité urbaine, en lien avec l'uniformisation des zones urbaines et des habitats qu'elles créent, et l'introduction d'espèces exogènes.

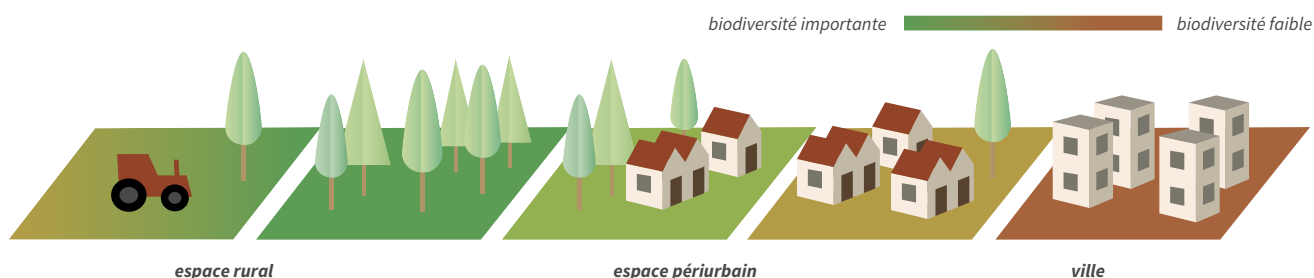
Les espaces urbanisés sont favorables à la biodiversité lorsqu'ils offrent une grande variété d'habitats : forêts et parcs urbains, jardins, friches urbaines[8 ; 32], squares, cours d'eau et leurs alentours, bassins de rétention ou filtration des eaux pluviales, étangs artificiels et mares, cordons boisés, accotements des voies de circulation (train, routes) voire terre-pleins centraux végétalisés[36 ; 39], toitures[27 ; 41] et murs[29] végétalisés, par exemple.

Les espèces les plus présentes dans les espaces urbanisés sont les plus généralistes^(e), les plus mobiles et/ou à forte capacité de dispersion[4 ; 6 ; 15 ; 38].

Les espaces urbanisés peuvent constituer un refuge.

La biodiversité peut être plus importante dans les espaces urbains et périurbains que dans certains espaces ruraux, en raison des paysages peu diversifiés, de la destruction des habitats naturels et de l'utilisation importante de pesticides par l'agriculture intensive et/ou spécialisée [47] (voir schéma ci-dessous).

Biodiversité selon l'usage des sols - © Isabelle Feix



(d) La dispersion désigne des mouvements : des êtres vivants, séparés géographiquement d'une population d'origine, colonisent un nouveau territoire.

(e) Une espèce généraliste est en mesure de prospérer dans un grand

nombre de conditions environnementales et peut faire usage d'une grande variété de ressources.

(f) Méta-analyse effectuée sur des villes du monde entier : 54 villes pour les oiseaux et 110 villes pour les plantes.



En France, 5,1 millions d'hectares sont artificialisés (soit 9,3% du territoire), dont les 2/3 sont imperméabilisés[26], entraînant la perte de biodiversité.



Au niveau mondial, les villes abritent seulement 8% des espèces natives d'oiseaux et 25% des espèces natives de plantes observées à proximité[2]^(f).



Au niveau mondial, les villes contiennent en moyenne 28% d'espèces de plantes exotiques et 3% d'oiseaux exotiques. 4 espèces cosmopolites d'oiseaux sont observées dans plus de 80% des villes et 11 espèces végétales cosmopolites, la plupart d'origine européenne, sont observées dans plus de 90% des villes[2]^(f).



Paon du jour, papillon qui peut s'adapter aux zones les plus urbanisées d'Ile-de-France [6]

© Isabelle Feix



Des espèces menacées ou spécialisées retrouvent en milieu urbain des conditions d'habitats similaires à leur habitat naturel (plantes spécialisées sur les habitats aux conditions extrêmes : forte température, forte lumière, sols secs, sols tassés, sols eutrophisés, sols aux pH extrêmes ; espèces d'oiseaux et de chauves-souris capables de coloniser les immeubles ; espèces d'abeilles ou de petits mammifères aimant la chaleur)[4 ; 11 ; 20 ; 27 ; 38]. Les masses d'eau artificielles peuvent pallier le manque d'eau ou la destruction de zones humides et servir de corridors, en particulier lorsqu'elles sont bordées d'une végétation naturelle[38].

L'ORGANISATION URBAINE AU SERVICE DES RÉSERVOIRS DE BIODIVERSITÉ ET DES CORRIDORS ÉCOLOGIQUES

Afin que les villes favorisent la biodiversité, il est important de maintenir des zones naturelles péri-urbaines et intra-urbaines (réservoirs de biodiversité^(d)), ainsi que des espaces verts urbains relais^(d) (publics ou privés) et de connecter ces éléments entre eux grâce à des corridors écologiques^(e)[24]. Les zones tampon^(f) autour des réservoirs et des corridors ont aussi leur importance.

Au sein des villes, la grande taille et la richesse des réservoirs de biodiversité et leur interconnexion (continuité) sont favorables à la biodiversité des oiseaux, petits mammifères[39], insectes, araignées et plantes. La nature des corridors peut influencer leur efficacité (par exemple : l'araignée sauteuse *Phidippus princeps*, un prédateur à orientation visuelle, préfère les corridors végétalisés aux corridors dénudés, tel qu'un chemin, pour émigrer vers de nouvelles taches d'habitat isolées

Q Dans l'agglomération lyonnaise, 293 espèces d'abeilles ont été dénombrées (soit près du tiers des espèces présentes en France). Leur richesse spécifique^(a) est maximale lorsque le taux d'imperméabilisation est intermédiaire (50%, ce qui correspond au périurbain) et moindre sur les sites ruraux et les sites très urbanisés[16 ; 17].

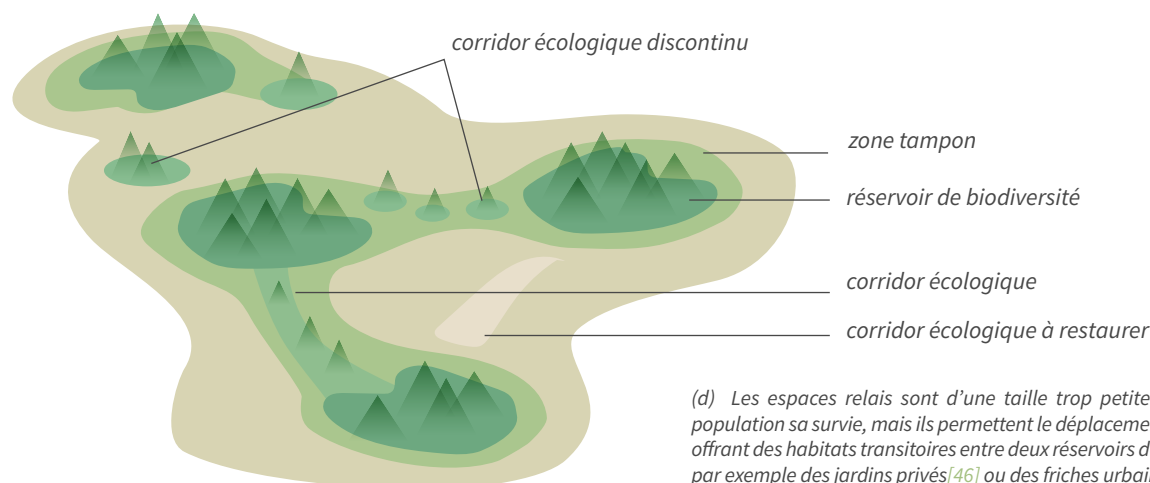
Q 8% des villes servent de refuge à des espèces végétales menacées d'extinction et 30% à des espèces d'oiseaux menacées d'extinction[2]^(b).

ou en revenir[3]. Les toitures et les façades végétalisées peuvent agir comme corridors écologiques discontinus pour les espèces animales capables de voler sur de longues distances et pour les espèces végétales à forte capacité de dispersion[9 ; 24 ; 28]. L'existence d'espaces de nature en ville ne garantit pas toujours la continuité : la fréquentation humaine peut créer une fragmentation de ces espaces. Il faut trouver un équilibre entre l'ouverture du milieu et sa fragmentation spatiale[10].

Q Les réservoirs de biodiversité (insectes, oiseaux et plantes) doivent avoir une taille d'au moins 4,4 ha pour la préservation des espèces adaptées au milieu urbain et 53,3 ha pour prévenir la perte rapide d'espèces sensibles ou non adaptées au milieu urbain[5].

Q Dans la région parisienne, l'abondance des staphylinidés^(g) et des araignées et la richesse en espèces de staphylinidés sont plus élevées dans les jardins domestiques connectés à des corridors écologiques arborés (rattachés eux-mêmes à des espaces boisés), que les jardins déconnectés[46].

Les différents éléments de la trame verte et bleue © DREAL PACA



(a) La richesse spécifique correspond au nombre d'espèces d'un groupe (par exemple : genre, famille, ordre) donné.

(b) Méta-analyse effectuée sur des villes du monde entier : 54 villes pour les oiseaux et 110 villes pour les plantes.

(c) Les réservoirs de biodiversité sont des espaces dont la superficie est suffisante pour assurer aux populations animales ou végétales les ressources nécessaires à leur survie (espaces naturels protégés : zones humides, forêts, pelouses sèches ; mais aussi grands parcs urbains et friches urbaines)[32].

(d) Les espaces relais sont d'une taille trop petite pour assurer à une population sa survie, mais ils permettent le déplacement des espèces en leur offrant des habitats transitoires entre deux réservoirs de biodiversité. Ce sont par exemple des jardins privés[46] ou des friches urbaines.

(e) Les corridors écologiques sont les voies de déplacement, qui relient les réservoirs de biodiversité entre eux, avec des conditions favorables à la migration (haies, rivières, dépendances vertes des routes, fossés, voire toitures ou façades végétalisées). Ils facilitent les échanges génétiques nécessaires à la survie des espèces.

(f) Les zones tampons sont des espaces périphériques qui protègent les réservoirs de biodiversité et les corridors (jardins privés, rues arborées ou squares pour les oiseaux forestiers par exemple) [14]

(g) Les staphylinidés sont des insectes, de la famille des coléoptères, à la forme généralement allongée.

LA GESTION DE CES ESPACES EST DÉTERMINANTE POUR LA BIODIVERSITÉ

À l'échelle de la parcelle, l'impact des espaces verts urbains sur la biodiversité dépend des choix de végétalisation et de gestion. Ces choix ont un impact plus ou moins important selon les catégories d'organismes vivants, certains sont plus sensibles (araignées et bactéries du sol par exemple) que d'autres.

Le choix des végétaux ornementaux, souvent exotiques, mais aussi le fait de laisser ou de réimplanter des espèces sauvages locales (dans des jardins publics et privés, des zones en friche ou des bords de routes par exemple[42]) peuvent être capitaux pour certains animaux (dont les abeilles[16 ; 17]), tant en termes de richesse que de diversité spécifique^(g).

La biodiversité est étroitement dépendante des plantes spontanées (présentes dans les espaces tels que bords de route, friches, et considérées comme «mauvaises herbes»). Toutefois, certaines plantes ornementales, comme les renoncules et les digitales, choisies pour fleurir jardins et parcs, peuvent aussi favoriser les abeilles (en termes d'abondance). D'autres (parterres fleuris avec tulipes et pétunias par exemple) présentent une biodiversité relativement pauvre[45].

La complexité et la structure de l'habitat et la biodiversité végétale (végétaux de tailles, d'architectures et de natures variées en particulier) favorise la biodiversité des animaux. La couverture herbacée est essentielle pour la biodiversité des insectes et les petits mammifères terrestres[12 ; 15] et l'abondance et la structure des arbres et arbustes l'est pour la conservation de la biodiversité des oiseaux, ainsi que pour certaines araignées (celles qui tissent des toiles circulaires). Un mélange équilibré entre arbres à feuilles caduques et conifères et la présence de vieux arbres maximisent la richesse spécifique des oiseaux forestiers[14 ; 15].

L'épaisseur du substrat des toitures végétalisées est déterminante pour la biodiversité des insectes et des araignées, car elle conditionne les plantes qui peuvent être implantées ou s'installer (seul un substrat épais permet l'implantation de végétaux cultivés ou spontanés de tailles et de natures variées : muscinal, herbacé, arbustif et arboré)[9 ; 27 ; 28]. De plus, l'épaisseur du substrat, l'évolution de ses propriétés chimiques (avec l'âge de la toiture) et la couverture végétale influencent la biodiversité des organismes du sol (arthropodes, vers de terre) de ces toitures[40 ; 41].

Les différents types de façades végétalisées offrent aux araignées et coléoptères des habitats très contrastés et abritent donc des espèces différentes : le mur avec plantes grimpantes constitue un habitat comparable à une falaise, tandis que le mur végétal ou vivant (comportant un substrat humide) constitue un habitat frais et humide[29].

Les pratiques d'entretien (types et degré d'utilisation des pesticides, fréquence et gestion des tontes des pelouses, des feuilles mortes, fertilisation et amendement^(h) des sols, arrosage et irrigation) et la fréquentation (piétinement) de ces espaces ont un impact sur la biodiversité. Cet impact concerne en particulier la flore, les insectes, ainsi que les propriétés des sols (densité, humidité, acidité, teneurs en matière organique, en azote, et en carbonates), donc les organismes du sol[1 ; 44], et les petits mammifères[39]. Ainsi, dans le sud-est de Paris, sur 79 espèces végétales herbacées⁽ⁱ⁾, les espèces pollinisées par les insectes ne sont présentes que dans les espaces verts où il n'est pas utilisé de pesticides et qui sont fermés au public[7].

L'abondance des papillons et des bourdons dans les jardins privés français⁽ⁱ⁾ est négativement corrélée avec l'utilisation d'insecticides et d'herbicides [31].

La biodiversité des organismes du sol de Central Park à New-York (Etats-Unis) traduit la diversité des sols, des couvertures végétales et des pratiques de jardinage : sur les 167 169 « espèces » présentes dans le parc, 73% sont communes avec celles répertoriées dans le monde (incluant des sols tropicaux, désertiques, arctiques)[37].



Les pissenlits, «mauvaises herbes» essentielles à la biodiversité des abeilles en ville © Isabelle Feix

Préserver et renforcer la biodiversité doit aller de pair avec la prise en compte du développement en milieu urbanisé d'espèces gênantes ou perturbatrices telles que le moustique, en lien avec la présence d'eau, et des espèces végétales invasives par exemple. En revanche, certaines espèces animales (connues, indigènes et hors élément perturbateur dans la cohabitation avec l'être humain), comme les papillons, représentent à la fois la diversité biologique et la nature souhaitée et appréciée. Ces espèces emblématiques peuvent devenir des ambassadrices de projets visant à valoriser la nature en ville, de façon à influencer positivement l'attitude de la population vis-à-vis des mesures d'entretien[34]^(k).

(g) La diversité spécifique caractérise la diversité des espèces, la richesse spécifique correspond au nombre d'espèces d'un groupe donné.

(h) L'amendement améliore la composition physique, chimique et biologique du sol.

(i) Observations réalisées dans les pelouses de 100 espaces verts publics ou privés.

(j) Etude réalisée sur 3 722 jardins dans le cadre de l'observatoire participatif sur les papillons et 1 119 jardins

(k) Cité dans [35].



BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 1

- [1] AMOSSÉ J., DÓZSA-FARKAS K., BOROS G., ROCHAT G., SANDOZ G., FOURNIER B., MITCHELL E.A.D., LE BAYON R.C. (2016): *Patterns of earthworm, enchytraeid and nematode diversity and community structure in urban soils of different ages*. *European Journal of Soil Biology*, vol. 73, pp. 46-58.
- [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., MÖRTBERG U., PYŠEK P., SIEBERT S., SUSHINSKY J., WERNER P., WINTER M. (2014): *A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers*. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 281, issue 1780, 20133330.
- [3] BAKER L. (2007): *Effect of corridors on the movement behavior of the jumping spider Phidippus princeps (Araneae, Salticidae)*. *Canadian Journal of Zoology*, vol. 85, n°7, pp. 802-808.
- [4] BANASZAK-CIBICKA W., ŻMIHORSKI M. (2012): *Wild bees along an urban gradient: winners and losers*. *Journal of Insect Conservation*, vol. 16, n°3, pp. 331-343.
- [5] 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, pp. 581-592.
- [6] BERGEROT B., FONTAINE B., JULLIARD R., BAGUETTE M. (2011): *Landscape variables impact the structure and composition of butterfly assemblages along an urbanization gradient*. *Landscape ecology*, vol. 26, n°1, pp. 83-94.
- [7] BERTONCINI A.P., MACHON N., PAVOINE S., MURATET A. (2012): *Local gardening practices shape urban lawn floristic communities*. *Landscape and Urban Planning*, vol. 105, no 1, p. 53-61.
- [8] 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*, vol. 132, pp. 79-88.
- [9] BRAAKER S., GHAZOUL J., OBRIST M.K., MORETTI, M. (2014): *Habitat connectivity shapes urban arthropod communities: the key role of green roofs*. *Ecology*, vol. 95, n°4, pp. 1010-1021.
- [10] CHELKOFF, G., PARIS, M., LINGLART, M. (2012) : *La nature au bord de la route. Le cas des jardins familiaux de l'agglomération grenobloise*, Rapport final de la recherche, Programme de recherche ITTECOP 2, financée par le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (ex-Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie)
- [11] CONCEPCIÓN E.D., OBRIST M.K., MORETTI M., ALTERMATT F., BAUR B., NOBIS M.P. (2015): *Impacts of urban sprawl on species richness of plants, butterflies, gastropods and birds: not only built-up area matters*. *Urban Ecosystems*, pp. 1-18.
- [12] 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, pp. 1171-1186.
- [13] DAVIES T.W., BENNIE J., GASTON K.J. (2012): *Street lighting changes the composition of invertebrate communities*. *Biology letters*, rsbl.2012.0216.
- [14] 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, pp. 625-640.
- [15] FONTANA S., SATTTLER T., BONTADINA F., MORETTI M. (2011): *How to manage the urban green to improve bird diversity and community structure*. *Landscape and Urban Planning*, vol. 101, n°3, pp. 278-285.
- [16] FORTEL L., HENRY M., GUILBAUD L., GUIRAO A.L., KUHLMANN M., MOURET H., ROLLIN O., VAISSIERE B.E. (2014): *Decreasing abundance, increasing diversity and changing structure of the wild bee community (Hymenoptera: Anthophila) along an urbanization gradient*. *PloS one*, vol. 9, n°8, p. e104679.
- [17] FORTEL L. (2014). *Écologie et conservation des abeilles sauvages le long d'un gradient d'urbanisation*. Mémoire de thèse de l'Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse. 208 p.
- [18] FRANCIS C.D., KLEIST N.J., ORTEGA C.P., CRUZ A. (2012): *Noise pollution alters ecological services: enhanced pollination and disrupted seed dispersal*. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 279, n°1739, pp. 2727-2735.
- [19] FRANCIS C.D., ORTEGA C.P., CRUZ A. (2009): *Noise pollution changes avian communities and species interactions*. *Current biology*, vol. 19, n°16, pp. 1415-1419.
- [20] HUBERT P., JULLIARD R., BIAGIANTI S., POULLE M.L. (2011): *Ecological factors driving the higher hedgehog (Erinaceus europaeus) density in an urban area compared to the adjacent rural area*. *Landscape and Urban Planning*, vol. 103, n°1, pp. 34-43.
- [21] JONES G. (2008): *Sensory ecology: noise annoys foraging bats*. *Current biology*, vol. 18, n°23, pp. R1098-R1100.
- [22] LAUGIER R. (2013) : *La biodiversité – Une synthèse documentaire*. Centre de Ressources Documentaires Aménagement, Logement et Nature / METL-MEEM. 40 p., 2013
- [23] LINTOTT P.R., BUNNEFELD N., PARK K.J. (2015): *Opportunities for improving the foraging potential of urban waterways for bats*. *Biological Conservation*, vol. 191, pp. 224-233.
- [24] LIZÉE M.H., MANEL S., MAUFFREY J.F., TATONI T., DESCHAMPS-COTTIN M. (2012): *Matrix configuration and patch isolation influences override the species–area relationship for urban butterfly communities*. *Landscape Ecology*, vol. 27, n°2, pp. 159-169.
- [25] LONGCORE T., RICH C. (2004): *Ecological light pollution*. *Reviews. Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 2, n°4, pp. 191-198.
- [26] MAAF (2015): *Utilisation du territoire - L'artificialisation des terres de 2006 à 2014 : pour deux tiers sur des espaces agricoles*. Agreste Primeur, n° 326. 6 p.

- [27] MADRE F., VERGNES A., MACHON N., CLERGEAU P. (2014): *Green roofs as habitats for wild plant species in urban landscapes: first insights from a large-scale sampling*. Landscape and urban Planning, vol. 122, pp. 100-107.
- [28] MADRE F., VERGNES A., MACHON N., CLERGEAU P. (2013): *A comparison of 3 types of green roof as habitats for arthropods*. Ecological Engineering, vol. 57, pp. 109-117.
- [29] MADRE F., CLERGEAU P., MACHON N., VERGNES A. (2015): *Building biodiversity: Vegetated façades as habitats for spider and beetle assemblages*. Global Ecology and Conservation, vol. 3, pp. 222-233.
- [30] MEEM (2016) : *Projet de loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages*. Brochure, 24 p.
- [31] MURATET A., FONTAINE B. (2015): *Contrasting impacts of pesticides on butterflies and bumblebees in private gardens in France*. Biological Conservation, vol. 182, pp. 148-154.
- [32] 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, n°4, pp. 661-671.
- [33] MURVANIDZE M., KVAVADZE E., MUMLADZE L., ARABULI T. (2011): *Comparison of earthworms (Lumbricidae) and oribatid mite (Acari, Oribatida) communities in natural and urban ecosystems*. Vestnik zoologii, vol. 45, n°4, pp. e-16-e-24.
- [34] OBERHOLZER A. et LÄSSER L. (2003): *Gärten für Kinder*. Stuttgart, Eugen Ulmer. 143 p.
- [35] 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, 12 p.
- [36] PEĆAREVIĆ M., DANOFF-BURG J., DUNN R.R. (2010): *Biodiversity on Broadway-enigmatic diversity of the societies of ants (Formicidae) on the streets of New York City*. PLoS One, vol. 5, n°10, e13222.
- [37] RAMIREZ K.S., LEFF J.W., BARBERÁN A., BATES S.T., BETLEY J., CROWTHER T.W., KELLY E.F., OLDFIELD E.E., SHAW E.A., STEENBOCK C., BRADFORD M.A., WALL D.H., FIERER N. (2014): *Biogeographic patterns in below-ground diversity in New York City's Central Park are similar to those observed globally*. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, vol. 281, n°1795, pp. 20141988.
- [38] RUSSO D., ANCILLOTTO L. (2015): *Sensitivity of bats to urbanization: a review*. Mammalian Biology-Zeitschrift für Säugetierkunde, vol. 80, n°3, pp. 205-212.
- [39] SAÏAH Y. (2013): *Étude des petits mammifères dans le tissu urbain de Lausanne*. Sous la direction de M.F. Estoppey. 75 p.
- [40] SCHINDLER B.Y., GRIFFITH A.B., JONES K.N. (2011): *Factors influencing arthropod diversity on green roofs*. Cities and the Environment (CATE), vol. 4, n°1, article 5, 20 p.
- [41] SCHRADER S., BÖNING M. (2006): *Soil formation on green roofs and its contribution to urban biodiversity with emphasis on Collembolans*. Pedobiologia, vol. 50, n°4, pp. 347-356.
- [42] SIROHI M.H., JACKSON J., EDWARDS M., OLLERTON J. (2015): *Diversity and abundance of solitary and primitively eusocial bees in an urban centre: a case study from Northampton (England)*. Journal of Insect Conservation, vol. 19, n°3, pp. 487-500.
- [43] SLABBEKOORN H., HALFWERK W. (2009): *Behavioural ecology: noise annoys at community level*. Current Biology, vol. 19, n°16, pp. R693-R695.
- [44] SMETAK K.M., JOHNSON-MAYNARD J.L., LLOYD J.E. (2007): *Earthworm population density and diversity in different-aged urban systems*. Applied Soil Ecology, vol. 37, n°1, p. 161-168.
- [45] TOMMASI D., MIRO A., HIGO H.A., WINSTON M. (2004): *Bee diversity and abundance in an urban setting*. The Canadian Entomologist, vol. 136, n°06, pp. 851-869.
- [46] VERGNES A., LE VIOL I., CLERGEAU P. (2012): *Green corridors in urban landscapes affect the arthropod communities of domestic gardens*. Biological Conservation, vol. 145, n°1, pp. 171-178.
- [47] WANIA A., KÜHN I., KLOTZ S. (2006): *Plant richness patterns in agricultural and urban landscapes in Central Germany - spatial gradients of species richness*. Landscape and Urban Planning, vol. 75, n°1, pp. 97-110.



2 NATURE EN VILLE ET BIOSURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'AIR ET DES SOLS


EN BREF

La nature en ville permet d'examiner les écosystèmes en intégrant l'ensemble des facteurs environnementaux

La nature en ville peut être un outil de surveillance de la qualité de l'air et des sols. Elle permet de mettre en évidence des impacts liés à la contamination, notamment liée à l'urbanisation, d'un milieu (air, sol, eau, sédiment) sur les organismes vivants. L'utilisation d'organismes vivants, observés ou collectés in situ (exemples : organismes sentinelles, bioindicateurs), présente l'intérêt d'examiner les écosystèmes avec une vision écologique intégrant l'ensemble des facteurs environnementaux. Cette biosurveillance végétale, bactérienne, fongique ou animale a atteint un degré de maturité pour l'air et les sols grâce à plusieurs méthodes normalisées, au niveau français et international. Cette surveillance et la diffusion des résultats peuvent être utilisées comme outil pédagogique et de sensibilisation.

Les enjeux de garantir la qualité de l'air et la qualité des sols

La qualité de l'air représente un enjeu sanitaire et environnemental majeur. Les polluants atmosphériques sont nombreux^(a) et ont des impacts divers. La pollution de l'air influence la prévalence des maladies respiratoires, cardio-vasculaires, cérébrales et des cancers.

 **On estime que l'exposition aux particules fines (PM_{2,5}) est à l'origine de 42 000 morts prématurées chaque année en France^[3]. Le coût de cette pollution pour la société a été évalué de 20 à 30 milliards d'euros, dont près d'un milliard d'euros directement supporté par le système de soins^[5].**

La pollution atmosphérique a également des effets négatifs sur les écosystèmes terrestres et aquatiques (acidification, eutrophisation et contamination des chaînes alimentaires), sur la productivité agricole et sur les matériaux (salissures et dégradation). Enfin, certains polluants atmosphériques participent au changement climatique ou ont un impact sur la couche d'ozone.


La qualité des sols garantit des services écosystémiques essentiels à l'homme. Elle permet notamment le développement de l'agriculture et de la sylviculture, influence la qualité de l'eau et régule les flux d'eau. Intervenant dans les cycles de l'eau, du carbone, du phosphore et de l'azote, et offrant des habitats pour les organismes vivants, les sols participent au bon fonctionnement et au maintien des écosystèmes naturels et urbains. Leur dégradation, notamment liée à l'urbanisation (perte de matière organique,

érosion, tassement, contamination^(b), acidification, eutrophisation, baisse de la biodiversité), entraîne la perte ou le déséquilibre de ces fonctions écologiques et de ces services écosystémiques.

 **Plus de 25% des espèces de la planète vivent dans les sols^[6].**

Biosurveillance : de quoi s'agit-il ?

La biosurveillance correspond à l'utilisation d'un organisme ou d'un ensemble d'organismes, à différents niveaux d'organisations biologiques, pour prévoir et/ou révéler une altération de l'environnement^[7]. La biosurveillance est une méthode biologique accessible, définie par des normes françaises et internationales pour l'air^(c) et les sols^(d). Elle est complémentaire des méthodes physico-chimiques, qui permettent une mesure précise des niveaux de concentration de polluants dans l'air et dans les sols, mais ne renseignent pas sur l'effet d'un ensemble de polluants.

 **7 normes franco-européennes (AFNOR/CEN) décrivent les protocoles d'échantillonnage et de mesures pour les bioindicateurs de qualité de l'air (tels que lichens, mousses, tabac, aiguilles de conifères). 3 normes sont en préparation avec d'autres bioindicateurs.**

(a) Pour aller plus loin, voir le chapitre 3 « Nature en ville et qualité de l'air [zoom sur la végétation et son substrat] ».

(b) Pour aller plus loin, voir le chapitre 4 « Nature en ville et lutte contre la pollution des sols urbains ».

(c) Série des normes NF X43-900 à 905 pour la mesure de la qualité de l'air

basées sur les lichens, les plants de tabacs, le ray-grass, les mousses, les dépôts particuliers sur les végétaux.

(d) Série des normes NF ISO 23611-1 à 23611-6 pour la mesure de la qualité des sols basées sur les lombriciens, les collembolles, les nématodes, la macrofaune.

LA BIOINDICATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR

La bioindication peut être utilisée pour la surveillance de la qualité de l'air à différentes échelles spatiales, en fonction du type de polluant visé et de son caractère (pollution de proximité, pollution diffuse). Par exemple, le développement des lichens exposés à un air pollué s'en trouve modifié (certains prolifèrent alors que d'autres disparaissent). L'évolution de la présence ou absence des lichens sur les arbres, les sols ou les roches permet de faire un relevé lichénique et de construire des indices pour estimer une bonne ou une mauvaise qualité de l'air, notamment relativement aux concentrations de dioxyde de soufre. Ce sont donc des outils biologiques opérationnels qui peuvent renseigner sur la qualité de l'air et sur le fonctionnement des écosystèmes en ville.



Dans le Val-de-Marne, depuis 2013, des campagnes de biosurveillance sont menées en milieu urbain avec 5 bio-stations^(e) ; chacune est composée de plants de haricot commun, avec une variété tolérante à l'ozone et une variété sensible.



Lichen sur un tronc d'arbre © Olivier Brosseau/Terra

Focus : Le dispositif BRAMM

Le dispositif BRAMM (Biosurveillance des Retombées Atmosphériques Métalliques par les Mousses), créé et développé par l'ADEME depuis 1996 et actuellement géré par le Muséum National d'Histoire Naturelle, est un dispositif français de bio-surveillance de la qualité de l'air qui utilise des mousses terrestres, prélevées sur 500 sites en moyenne par campagne, en milieu rural et forestier, pour caractériser et cartographier, à l'échelle nationale (en métropole), les niveaux de concentrations en contaminants (éléments métalliques et azote) accumulés dans les mousses. Ce dispositif permet également de définir des évolutions temporelles de dépôts atmosphériques grâce aux données acquises depuis une vingtaine d'années au cours de 5 campagnes nationales (la cinquième a démarré en 2016).

En savoir plus^(f) : <https://inpn.mnhn.fr/espece/jeudonnees/2567>

En savoir plus sur les retombées atmosphériques métalliques

La pollution de l'air est un enjeu environnemental majeur et une préoccupation sociétale importante. Les métaux dans l'air, s'accumulant dans la biosphère et n'étant pas biodégradables, peuvent être persistants, se retrouver transférés le long de la chaîne alimentaire et provoquer d'éventuels effets sur la santé humaine.

Le présent ouvrage expose de façon synthétique et méthodique les acquis obtenus par l'observatoire BRAMM, mis en place par l'ADEME dans le cadre de campagnes européennes.

Pollution atmosphérique par les métaux en France : 10 ans de biosurveillance des retombées. Co-édition ADEME – EDP sciences 2013, 178 p.



(e) Projet BIPA : <http://www.valdemarne.fr/vivre-en-val-de-marne/informations/des-haricots-pour-mesurer-la-pollution-de-lair>

(f) Voir aussi : [9]; <http://www.ademe.fr/pollution-atmospherique-metaux>; <http://www.ademe.fr/retombees-atmospheriques-metaux-france-estimation-dosage-mousses>



LA BIOINDICATION DE LA QUALITÉ DES SOLS

La bioindication peut renseigner sur l'état biologique du sol et fournir des informations permettant de comprendre et prévoir le fonctionnement d'un écosystème terrestre. L'altération de la biodiversité des sols peut aboutir à un dysfonctionnement de l'écosystème terrestre en modifiant par exemple la dégradation de la matière organique ou le comportement des polluants dans le sol, le recyclage des nutriments, les espèces animales présentes et le développement des plantes[1 ; 2]. L'information sur la diversité^(a) et l'activité^(b) des organismes du sol (vers de terre, bactéries, nématodes, collemboles, acariens notamment) 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 (ex : modification de pratiques culturales, mise en œuvre d'une phytotechnologie^(c)) [1 ; 2 ; 4 ; 8].



L'abondance moyenne des vers de terre est de 280 individus/m² dans les sols artificialisés (essentiellement jardins), 420 individus/m² dans les prairies et 260 individus/m² pour tous les types d'occupation des sols confondus^(d).

Focus : Le programme BIOindicateurs de la Qualité des Sols

Face au constat d'un manque d'indicateurs biologiques pour décrire la qualité du sol, le programme national de recherche BIOindicateurs a été mis en place par l'ADEME. Les objectifs : développer des méthodes pour mesurer la biodiversité et les fonctions des sols, utiliser les bioindicateurs des sols pour surveiller la qualité des sols et identifier des bioindicateurs pertinents pour l'évaluation des risques écologiques de la contamination des sols.

En savoir plus :

<https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/>

En savoir plus sur les bioindicateurs pour des sols durables

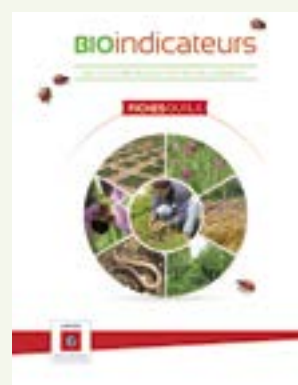
Ces fiches donnent un ensemble de détails scientifiques et techniques permettant de faciliter la mise en œuvre des bioindicateurs : description de l'indicateur, description de la méthode, interprétation des résultats, exemple d'application, intérêts et limites de l'indicateur.

Bioindicateurs : des outils biologiques pour des sols durables. Fiches outils. Ed. ADEME, 2012 - 17 p. <http://www.ademe.fr/bioindicateurs-outils-biologiques-sols-durables-fiches-outils>

En savoir plus sur les conditions d'utilisation des bioindicateurs

Basé sur les résultats du programme de recherche APPOLINE, ce document présente différents bioindicateurs et leurs applications afin de montrer leur intérêt dans la gestion de sites pollués ou la reconversion de friches. Il est destiné aux bureaux d'études en ingénierie environnementale, gestionnaires sites pollués, industriels de la dépollution, établissements publics d'état, aménageurs, promoteurs.

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



(a) Diversité en termes d'espèces ou de gènes, part relative de certains groupes d'organismes, etc.

(b) Activités enzymatiques des bactéries notamment.

(c) Pour en savoir plus, voir le chapitre 4 « Nature en ville et lutte contre la pollution des sols urbains ».

(d) OPVT : <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/la-recherche> D'après une étude menée sur la période 2005-2015 : 122 sites de territoires artificialisés ont été étudiés (sur un total de 731 sites) dans le cadre de l'Observatoire Participatif des Vers de Terre (voir focus OPVT) en France métropolitaine.

LA BIOSURVEILLANCE, COMMENT ÇA MARCHE ?

QUI SONT LES INDICATEURS ?



LES DIFFÉRENTS NIVEAUX D'INDICATION

1 Bio-indicateurs

Un bio-indicateur renseigne sur l'état et le fonctionnement d'un écosystème, par la présence ou l'absence d'espèces, leur densité, les modifications comportementales ou physiologiques observées à l'œil nu sur un organisme (ou une partie d'organisme ou une communauté d'organismes).

2 Bio-accumulateurs

Des espèces vivantes ont la propriété de concentrer dans leurs tissus les substances polluantes : l'élément toxique peut alors être dosé dans l'organisme qui fait office de « bio-accumulateur ».

3 Biomarqueurs

Certains polluants peuvent avoir des effets sur le métabolisme ou l'ADN des organismes, et faire apparaître des modifications (biomarqueurs) décelables seulement grâce à des analyses en laboratoire.

La biosurveillance. Source : ADEME

LA BIOINDICATION DES TRANSFERTS DE CONTAMINANTS ET DE LA BIOACCUMULATION

Il est également important de pouvoir caractériser le potentiel de transfert des contaminants des milieux (air et sol) vers un ou plusieurs maillons des chaînes alimentaires (producteurs primaires comme les végétaux, consommateurs primaires comme les escargots, consommateurs secondaires comme les hérissons ou détritivores-décomposeurs comme les vers de terre, les bactéries). Certains organismes comme les mousses, les plantes ou les escargots ont la particularité de concentrer dans leurs tissus des substances polluantes (comme les métaux lourds, les HAP, les dioxines ou les furanes) sans pour autant en subir les dommages (au moins jusqu'à un certain seuil de concentration de polluants). Ils se révèlent être de bons indicateurs de la contamination (air et sol) et de son aptitude à transférer vers les organismes supérieurs (aussi appelée biodisponibilité). Ainsi, la mesure des polluants accumulés dans leurs tissus permet une estimation du niveau de la contamination dans l'air (grâce aux mousses, aux lichens) et dans le sol (grâce aux escargots, aux plantes) et apporte une information sur le comportement des différents contaminants ainsi que sur leurs effets possibles sur le reste de la chaîne alimentaire terrestre^[1 ; 2 ; 9].



Il existe 21 normes franco-internationales (AFNOR/ISO) décrivant les protocoles d'échantillonnage et de mesures pour mettre en œuvre les bioindicateurs de la qualité des sols, de transferts de contaminants et de bioaccumulation du milieu sol.



UN INTÉRÊT PÉDAGOGIQUE

Les dispositifs de biosurveillance constituent un outil pédagogique et de sensibilisation à la pollution. La présence et/ou l'absence d'organismes sentinelles ou bioindicateurs donnent des indications sur l'impact des différents stress environnementaux. Les dispositifs de biosurveillance peuvent également être utiles pour surveiller la qualité de l'air et du sol. Dans les villes, les services des espaces verts peuvent contribuer au développement de la biosurveillance en favorisant l'installation de biostations, de sites de surveillance dans les espaces extérieurs ouverts aux publics ou encore en développant des programmes avec les écoles (cf. focus sur l'OPVT).



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

Focus : L'Observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT)

L'observatoire, mis en place par l'Observatoire de Rennes avec le Muséum National d'Histoire Naturelle, propose un protocole d'évaluation simplifiée de la biodiversité des vers de terre dans les sols naturels, agricoles, urbains, jardins. Cela rend possible des observations par divers publics (ex : agriculteurs, scolaires, naturalistes, chasseurs, jardiniers, gestionnaires de milieux naturels ou urbains) afin d'établir progressivement des référentiels sur ces organismes.

En savoir plus : https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php

Focus : Vigie-Nature, un réseau d'observatoires participatifs de la biodiversité

De nombreux observatoires de la biodiversité existent en France, tant au niveau national que régional ou local^(a). Certains sont regroupés au sein de Vigie-Nature^(b), fondé et porté par le Muséum national d'Histoire naturelle, animé par des associations et mis en œuvre grâce à des réseaux d'observateurs volontaires. En s'appuyant sur des protocoles, il propose à chacun de contribuer à la recherche en découvrant la biodiversité qui nous entoure (oiseaux, papillons, chauve-souris, escargots, insectes pollinisateurs, libellules, plantes sauvages des villes notamment). Vigie-Nature est un programme de sciences participatives ouvert à tous.

Deux observatoires sont dédiés aux gestionnaires d'espaces verts : Propage et Florilèges, qui permettent, à travers le suivi des papillons de jour et de la flore urbaine, d'évaluer la qualité d'un milieu, de la comparer à d'autres sites et de suivre l'évolution de l'impact des pratiques au cours des années.

En savoir plus : <http://vigienature.mnhn.fr/page/gestionnaires-despaces>

(a) Recensement : <http://www.naturefrance.fr/sciences-participatives>

(b) <http://vigienature.mnhn.fr/>

En savoir plus sur les enjeux environnementaux et économiques liés à la biodiversité du sol

Le sol abrite plus de 25 % des espèces animales et végétales actuellement décrites. L'activité de ces organismes assure la fertilité des sols, la qualité de notre alimentation, la pureté de l'air et la qualité de l'eau. L'accroissement de la pression exercée par les activités humaines et les changements climatiques, menacent la biodiversité et le bon fonctionnement des sols. La plaquette « La vie cachée des sols » a pour objet d'alerter de manière pédagogique le grand public sur les enjeux environnementaux et économiques liés à la biodiversité du sol.

La vie cachée des sols, Élément essentiel d'une gestion durable et écologique des milieux. éd. ADEME 2010, 19 p. Réf. 7021 <http://www.ademe.fr/vie-cachee-sols>



2



BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE 2

- [1] ADEME (2012a) : *Bioindicateurs : des outils biologiques pour des sols durables*. Fiches outils. 17 p. <http://www.ademe.fr/bioindicateurs-outils-biologiques-sols-durables-fiches-outils>
- [1'] 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.
- [2] ADEME (2012b) : *Bioindicateurs et phytotechnologies, des outils biologiques pour des sols durables*. Journées Techniques Nationales, Paris, 16 & 17 Octobre 2012. Recueil des interventions ; article « Le programme de recherche ADEME "Bioindicateurs de l'état biologique des sols" : Ses objectifs, sa mise en oeuvre et son déroulement » ; article « Quels bioindicateurs pour la gestion durable des sols agricoles et forestiers ? » ; article « Quels bioindicateurs, pour quels besoins en sites contaminés ? » ; recueil de la table ronde « Bioindicateurs, quelle appropriation ? quelle utilisation ? » : <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/jtech.php>
- [3] AEA Technology (2005) : *étude pour la Commission européenne dans le cadre du Programme Clean Air for Europe (CAFE), CAFE Cost-Benefit-Analysis, Baseline analysis 2000 to 2020*.
- [4] BURROW C. (2015) : *Influence des modalités de restauration de sols dégradés sur leur colonisation par une faune du sol fonctionnelle*. Thèse de l'Université de Lille 1. 309 p.
- [5] CGDD (2013) : *Pollution de l'air et santé : le coût pour la société* n° 175 http://www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/09_pollution%20de%20l%27air%20et%20sant%C3%A9%20co%C3%BBt%20soci%C3%A9t%C3%A9_0.pdf
- [6] ÉGLIN T., BLANCHART É., BERTHELIN J., DE CARA S., GROLLEAU G., LAVELLE P., RICHAUME-JOLION A., BARDY M., BISPO A. (2010) : *La vie cachée des sols*. MEDDTL. Éd. ADEME n°7021. 20p.
- [7] GARREC J.P., Van HALUWYN C. (2002) : *Biosurveillance végétale de la qualité de l'air. Concepts, méthodes et applications*. Ed. Tec et Doc – Lavoisier, 118 p.
- [8] JOIMEL S. (2015) : *Biodiversité et caractéristiques physicochimiques des sols de jardins associatifs urbains français*. Thèse de l'Université de Lorraine. 308 p.
- [9] 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-atmospherique-metaux>



3 NATURE EN VILLE ET QUALITÉ DE L'AIR [ZOOM SUR LA VÉGÉTATION ET SON SUBSTRAT]

EN BREF

La végétation contribue à la circulation de l'air voire à la filtration et à l'absorption de certaines particules atmosphériques et polluants, mais peut être une source de polluants et d'allergènes.

La végétation peut émettre des polluants précurseurs de la formation de certains gaz nocifs comme l'ozone (O_3) ou de celle des aérosols secondaires (particules). Elle peut aussi être une source d'allergènes via des pollens très allergisants qu'elle émet. Cependant, la nature en ville permet d'ouvrir les espaces urbanisés, d'espacer les bâtiments et d'améliorer la circulation de l'air, ce qui aide à diluer la pollution : les polluants se dispersent plus vite et leurs concentrations dans l'air ou leurs dépôts diminuent. De plus, la végétation filtre les particules atmosphériques et elle absorbe aussi certains polluants. Enfin, le substrat (support des végétaux) participe également à la filtration et à la transformation des polluants. La prise en compte de tous les effets de la végétation, favorables ou non à la qualité de l'air, est essentielle pour choisir les espèces végétales à introduire dans un espace public.

Les enjeux de garantir une bonne qualité de l'air

La qualité de l'air représente un enjeu sanitaire et environnemental majeur. Les polluants atmosphériques sont nombreux^(a) et ont des impacts divers. La pollution de l'air influence la prévalence des maladies respiratoires, cardio-vasculaires, cérébrales et des cancers.

La pollution atmosphérique a également des effets négatifs sur les écosystèmes terrestres et aquatiques (acidification, eutrophisation et contamination des

chaînes alimentaires), sur la productivité agricole et sur les matériaux (salissures et dégradation). Enfin, certains polluants atmosphériques participent au changement climatique ou ont un impact sur la couche d'ozone.



On estime que l'exposition aux particules fines (PM_{2,5}) est à l'origine de 42 000 morts prématurées chaque année en France^[2]. Le coût de cette pollution pour la société a été évalué de 20 à 30 milliards d'euros, dont près d'un milliard d'euros directement supporté par le système de soins^[5].

Les principaux polluants atmosphériques^[1]

Les polluants primaires

issus directement des sources de pollution atmosphérique telles que le trafic routier, l'industrie, le chauffage domestique, l'agriculture

- ▶ particules (PM₁₀ et PM_{2,5})
- ▶ monoxyde de carbone (CO)
- ▶ oxydes de soufre (SO_x)
- ▶ oxydes d'azote (NO_x)
- ▶ composés organiques volatils (COV)
- ▶ hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
- ▶ métaux (plomb, mercure, cadmium, etc.)
- ▶ pollens

Les polluants secondaires

provenant de réactions chimiques des polluants primaires gazeux ou particulaires entre eux

- ▶ l'ozone (O_3), formé à partir du dioxyde d'azote (NO₂) sous l'action du rayonnement solaire et en présence de composés organiques volatils (COV)
- ▶ particules secondaires, dues à la conversion essentiellement en particules (PM_{2,5}) des polluants primaires gazeux tels que le SO₂, les NO_x, et les COV
- ▶ dioxyde d'azote (NO₂)

Certains polluants comme le NO₂ et les particules sont à la fois polluants primaires et secondaires

(a) Pour aller plus loin, voir le chapitre 3 « Nature en ville et qualité de l'air, [zoom sur la végétation et son substrat] »

LA VÉGÉTATION PEUT CONTRIBUER À LA POLLUTION DE L'AIR

Si l'ozone présent dans la stratosphère est indispensable (car il nous protège des rayonnements ultra-violet), celui que l'on trouve dans la troposphère et que l'on respire est le principal polluant responsable des pics de pollution l'été en ville. Il est nocif pour la santé, car très irritant. Il peut pénétrer profondément dans l'appareil respiratoire, entraîner une inflammation des bronches, une toux sèche et une gêne respiratoire et avoir des effets cardiovasculaires. Il a aussi des impacts sur l'environnement, car il entraîne des nécroses sur les feuilles de certains végétaux, réduisant ainsi des rendements agricoles.

La végétation participe à la formation de ce gaz car certaines espèces^(b) [6 ; 10 ; 14] émettent certains composés organiques volatils (COVs) précurseurs de l'ozone (créé par réaction avec les NO_x de l'air). Les COVs émis par la végétation peuvent également, sous certaines conditions, participer à la formation secondaire de particules fines. La quantification de leur contribution à certains pics de pollution en particules est difficile, en raison de la multiplicité des sources d'émissions (naturelles ou issues de l'activité humaine).

De plus, certaines espèces végétales^(c) émettent des pollens à fort potentiel allergisant, responsables de nuisances sanitaires saisonnières (pollinoses, rhinites) chez les personnes sensibles et allergiques[19]. Le RNSA a publié un guide^(d) sur les plantes allergisantes à éviter dans les aménagements végétalisés.



À l'échelle mondiale, la végétation est responsable d'environ 90 % des émissions de COV[7].



Pour 10 à 20% de la population, les pollens sont responsables de réactions allergiques, en général saisonnières, appelées « rhumes des foins », ce type d'allergie aurait doublé en 10 ans^(e).

LA VÉGÉTATION ET SON SUBSTRAT (LE SOL) PARTICIPENT À LA PURIFICATION DE L'AIR

La végétation dans les villes permet de piéger certains polluants gazeux présents dans l'air grâce à deux mécanismes :

- capture (absorption) par les stomates^(f) des feuilles (ex. NO_x, SO₂, O₃, CO, sélénium, arsenic, mercure);
- stockage (dépôt) dans les cires de la cuticule des feuilles (COV, HAP).

Les sols peuvent piéger directement ces polluants gazeux (en solution). La végétation permet aussi de piéger les particules et les métaux (dont plomb, cuivre, cadmium, zinc) présents dans l'air grâce à ses feuilles (stockage dans les cires de la cuticule des feuilles ou absorption par les feuilles via les cuticules ou les stomates)[20]. Les particules et les métaux sont ensuite déposés au sol, où ils sont piégés, sous l'effet du lessivage des feuilles par la pluie ou lors de la chute des feuilles[19]. Les sols peuvent aussi piéger directement les particules et les métaux (par exemple par liaison avec ses constituants minéraux et/ou organiques ou par précipitation de nouveaux minéraux).



Un arbre mature peut piéger jusqu'à 20 kg/an de particules[9]. A l'échelle de la ville de Madrid (Espagne), les arbres d'alignement permettent de capter 16,8 kg de métal par an (molécules de métaux associées aux particules issues des pots d'échappement)[4].

(b) Par exemple Chêne vert, Chêne pubescent, Chêne rouvre, Chêne pédonculé, Chêne rouge d'Amérique, Sapin blanc, Sapin de Douglas, Pin noir, Genêt épineux, Hêtre commun, Eucalyptus commun, Peuplier tremble, Saule blanc, Saule fragile, Saule Marsault.

(c) Par exemple cyprès, bouleau, chêne, platane, noisetier, graminées, pariétaire, ambroisie, armoise.

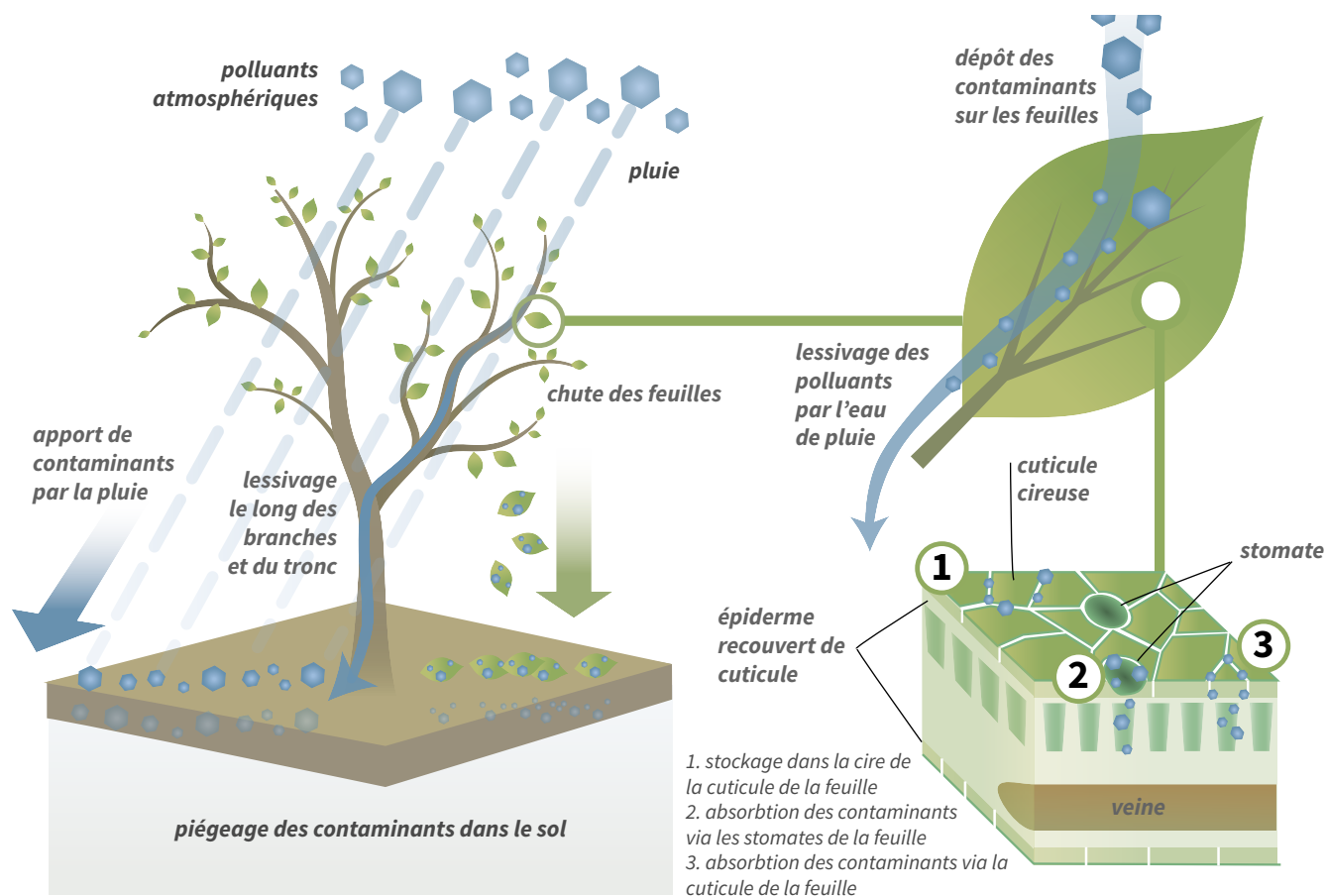
(d) <http://www.vegetation-en-ville.org>

Pour aller plus loin, voir <http://www.pollens.fr/accueil.php>

(e) RNSA (<http://www.pollens.fr/le-reseau/allergie.php>)

(f) Un stomate est constitué de deux cellules, ménageant entre elles une petite ouverture par laquelle s'effectuent les échanges gazeux entre la plante et son milieu (respiration, transpiration, photosynthèse). Il est présent sur l'épiderme des feuilles. Source : <http://www.larousse.fr/>





Le piégeage des polluants gazeux et des particules par la végétation et le sol © Isabelle Feix et Sarah Marquet, d'après Uzu, 2009 [19]

La végétation et les sols permettent ainsi de réduire les quantités de polluants présents dans l'air, avec un effet variable selon les polluants, les saisons, le climat et les espèces végétales^(a)[4].

L'amélioration de la qualité de l'air en ville par les arbres peut être assez élevée pour O_3 , SO_2 , NO_2 et les particules[19], uniquement à proximité immédiate des arbres. Les arbres en milieu urbain contribuent aussi à assainir l'air, agissant sur la fixation des métaux lourds (fixés aux particules émises dans l'air par exemple par les pots d'échappement des véhicules) [4 ; 11 ; 12 ; 13 ; 21].



Un arbre mature peut piéger jusqu'à 20 kg/an de particules[9].



A l'échelle de la ville de Madrid (Espagne), les arbres d'alignement permettent de capter 16,8 kg de métal par an (molécules de métaux associées aux particules issues des pots d'échappement)[4]^(b).

La végétation et son substrat, sur les toitures végétalisées, peuvent aussi piéger certains polluants atmosphériques (O_3 , NO_2 , PM_{10} , SO_2)[21].

Dans le cas particulier des rues en canyon, les murs végétalisés pourraient permettre une dépollution

importante de l'air (notamment pour NO_2 et PM_{10}), induisant un air « purifié » localement dans la rue ; tandis que les arbres ont des effets contrastés, pouvant même aller jusqu'à freiner la dispersion des polluants et donc dégrader la qualité de l'air dans ces rues.



Localement la végétalisation des murs des rues en canyon permettrait la réduction de la concentration en polluants dans l'air de la rue, pouvant atteindre 40% pour NO_2 et 60% pour PM_{10} (estimée grâce à la modélisation)[17].



Pin parasol, efficace pour piéger les métaux lourds fixés par les particules atmosphériques[4] © Isabelle Feix

(a) Par exemple sur 6 espèces d'arbres étudiées à Madrid (Espagne), les plus efficaces pour capturer les métaux lourds sur leurs feuilles sont le Cèdre, l'Orme et le Pin parasol et les moins efficaces sont le Marronnier

d'Inde, le Platane d'Orient et le Chêne vert

(b) Chiffres pour 6 espèces d'arbres. Métaux concernés : zinc, cuivre, baryum, plomb, chrome, nickel.

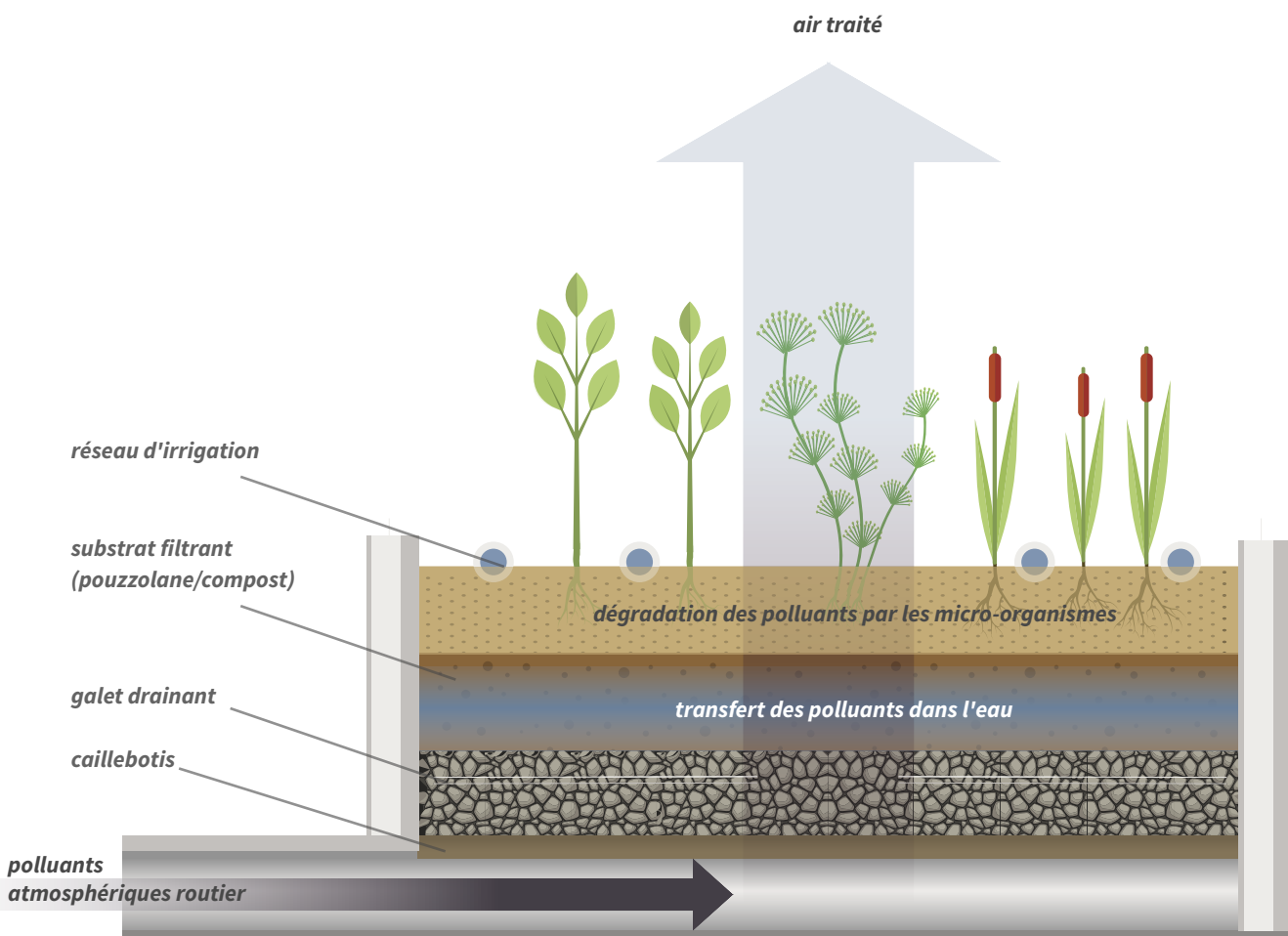
Focus sur des systèmes de biofiltration pour dépolluer l'air d'espaces confinés

Des expérimentations ont été conduites pour dépolluer l'air, notamment de l'air extérieur en ville et aussi de l'air vicié d'un tunnel routier.

À Lyon, un procédé de traitement de l'air a été mis en œuvre sur une surface végétalisée. Une structure est installée à la verticale d'une paroi et elle est composée de plantes avec son sol. L'air pollué est injecté de manière active dans le substrat (sol de la structure). Les bactéries (*pseudomonas* et *bacillus*) et les champignons qui se développent dans le substrat peuvent dégrader les polluants : c'est le principe de la **biofiltration**. Les racines des plantes vont ensuite pouvoir absorber les résidus formés. Certaines plantes peuvent fixer également les métaux lourds. Les oxydes d'azote (NO_x) peuvent être absorbés par la surface des feuilles et être ainsi rapidement éliminés dans les tissus des plantes, sans accumulation[16].

Par ailleurs, la technique de biofiltration de l'air, testée dans le cadre du projet BIOTAIR[15], est intéressante pour abattre les effluents atmosphériques issus du trafic

routier. Des pilotes de biofiltres de tailles différentes, entre 50 et 100 cm d'épaisseur, ont été installés au niveau d'un tunnel routier dans la région Île-de-France. Les niveaux d'abattelements des polluants ont été mesurés et l'analyse du cycle de vie d'un biofiltre (ACV) a également été étudiée. Les performances des biofiltres recevant l'air vicié du tunnel sont apparues satisfaisantes dans l'ensemble en comparaison de celle du dispositif témoin alimenté avec de l'air non pollué. En moyenne, on observe qu'excepté le NO qui est un polluant pour lequel la biofiltration n'est pas efficace, pour les autres polluants testés la biofiltration est efficace pour traiter l'air des tunnels routiers^(c). De plus, plus le biofiltre est épais, plus c'est efficace (sauf pour l'ammoniac). Cependant, en termes d'analyse de cycle de vie, le biofiltre le plus épais a un impact deux fois plus important que le biofiltre le moins épais, si l'on considère l'utilisation des ressources naturelles, la préservation de l'écosystème et la santé humaine. Il est nécessaire de viser un équilibre entre les objectifs de dépollution de l'air et de limitation des impacts.



Vue d'une coupe de biofiltre. Source : projet BIOTAIR

(c) Les rendements sont pour le dioxyde d'azote à 70 %, les particules entre 45 % et 85 % selon leur taille, l'ammoniac à 75 % et pour les BTEX à 60 % (Benzène, Ethylbenzène, Xylènes) et à 73% (Toluène).

En savoir plus sur les résultats du projet de recherche BIOTAIR

Le projet BIOTAIR évalue l'efficacité et la pérennité de la technique de biofiltration dans le traitement des effluents atmosphériques de tunnel routier. La biofiltration, telle que mise en oeuvre lors de cette étude, peut être considérée comme efficace pour réduire très sensiblement un grand nombre d'effluents atmosphériques. Trois dispositifs pilotes (BF50, BF100 et témoin) ont été testés à des échelles réduites pendant 18 mois pendant quatre campagnes de mesures.

Evaluation de la biofiltration pour le traitement des émissions atmosphériques de tunnels routiers, rapport CNRS Rhône-Auvergne et Phytorestore 2015 - 151 p. - 2 p.

<http://www.ademe.fr/evaluation-biofiltration-traitement-emissions-atmospheriques-tunnels-routiers>



UN EFFET POSITIF MAIS À RELATIVISER AU-DELÀ DES ZONES VÉGÉTALISÉES

Plusieurs travaux montrent que la végétation piège les particules atmosphériques (dont les PM_{2,5}) et les polluants (prouvé en particulier pour les dioxydes d'azote (NO₂) et le soufre (SO₂)). À Hong-Kong, une étude portant sur 70 parcs a montré que la qualité de l'air était meilleure dans les parcs qu'en bord de route, pour autant elle n'y est pas significativement différente du reste de l'espace urbain. La végétation urbaine semble avoir un effet global sur la qualité de l'air, et cela ne se limite pas aux zones fortement végétalisées[8].

Néanmoins, ramené aux quantités de polluants atmosphériques présents en ville, le potentiel de dépollution de la végétation est assez faible à l'échelle urbaine, le principal levier restant la réduction de la pollution à la source[3].



Le gain de qualité de l'air apporté par les arbres à l'échelle de la ville a été estimé dans 11 villes aux Etats-Unis. Les potentiels sont généralement plus élevés quand le taux de couverture arborée de la ville augmente (de 8,6 à 42%)(a)[13].

Polluant	PM10	O ₃	SO ₂	NO ₂	CO
Gain (%)	0,2 à 1	0,1 à 0,8	0,1 à 0,7	0,1 à 0,6	0,001 à 0,002

(a) 11 villes aux Etats-Unis: Atlanta GA, Boston MA, Dallas TX, Denver CO, Milwaukee WI, New York NY, Portland OR, San Diego CA, Tampa FL, Tucson AZ, Washington DC.



BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 3

- [1] ADEME (2016) : *Air et enjeux sanitaires*, Cahier technique de l'AEU2, réf 8611.
- [2] AEA Technology (2005) : *étude pour la Commission européenne dans le cadre du Programme Clean Air for Europe (CAFE)*, CAFE Cost-Benefit-Analysis, Baseline analysis 2000 to 2020.
- [3] BALEZ A., REUNKRILERK J. (2013) : *Ecosystèmes et territoires urbains: impossible conciliation ?*, Développement Durable et Territoires, juillet 2013 (Volume 4-n°2) <https://developpementdurable.revues.org/9853?lang=en>
- [4] CALDERÓN GUERRERO C. (2014): *Urban trees and atmospheric pollutants in big cities: Effects in Madrid*. Thèse de doctorat, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela técnica superior de ingenieros de montes, forestal y del medio natural, 212 p.
- [5] CGDD (2013) : *Pollution de l'air et santé : le coût pour la société* n° 175 http://www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/09_pollution%20de%20l%27air%20et%20sant%C3%A9%20co%C3%BBt%20soci%C3%A9t%C3%A9_0.pdf
- [6] DONOVAN R.G., STEWART H.E., OWEN S.M., MACKENZIE A.R., HEWITT C.N. (2005): *Development and application of an urban tree air quality score for photochemical pollution episodes using the Birmingham, United Kingdom, area as a case study*. Environmental science & technology, vol. 39, n°17, pp. 6730-6738.
- [7] FUENTES J.D., GU L., LERDAU M., ATKINSON R., BALDOCCHI D., BOTTENHEIM J.W., CICCIOLO P., LAMB B., GERON C., GUENTHER A., SHARKEY T.D., STOCKWELL W. (2000): *Biogenic hydrocarbons in the atmospheric boundary layer: A review*. Bulletin of the American Meteorological Society, 81 (7), pp. 1537-1575.
- [8] LAILLE, P., PROVENDIER, D., COLSON, F., SALANIE, J. (2013) : *Les bienfaits du végétal en ville : étude des travaux scientifiques et méthode d'analyse*. Plante & Cité, Angers, 31 p.
- [9] LESSARD G., BOULFROY E. (2008) : *Les rôles de l'arbre en ville*, Centre collégial de transfert de technologie en foresterie de Sainte-Foy (CERFO). Québec, 21 p.
- [10] LUCHETTA L., SIMON V., TORRES L. (2000) : *Émission des principaux composés organiques volatils biogéniques en France*. Pollution atmosphérique, vol. 42, n°167, pp. 387-412.
- [11] MANES F., INCERTI G., SALVATORI E., VITALE M., RICOTTA C., COSTANZA R. (2012): *Urban ecosystem services: tree diversity and stability of tropospheric ozone removal*. Ecological Applications, vol. 22, n°1, pp. 349-360.
- [12] MANES F., SILLI V. SALVATORI E., INCERTI G., GALANTE G., FUSARO L., PERRINO C. (2014): *Urban Ecosystem Services: tree diversity and stability of PM10 removal in the Metropolitan Area of Rome*. Annali di Botanica, vol. 4, pp. 19-26.
- [13] NOWAK D.J., CRANE D.E., STEVENS J.C. (2006): *Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States*. Urban forestry & urban greening, vol. 4, n°3, pp. 115-123.
- [14] OWEN S.M., BOISSARD C., HEWITT C. N. (2001): *Volatile organic compounds (VOCs) emitted from 40 Mediterranean plant species: VOC speciation and extrapolation to habitat scale*. Atmospheric Environment, vol. 35, n°32, pp. 5393-5409.
- [15] PETIT J-F., LE PRIOL T., BOUQUET M., BARBE P., BERNAGAUD C., VIDAL B., BOROT O., MULLER D., FAUGIER F. (2014) : *Évaluation de la BIOfiltration pour le Traitement des émissions atmosphériques de tunnel Routier, Projet BIOTAIR du programme CORTEA*. Rapport d'étude, convention ADEME n°1162C0010, 151 p. <http://www.ademe.fr/evaluation-biofiltration-traitement-emissions-atmospheriques-tunnels-routiers>
- [16] Plante&Cité (2008) : *Application d'un procédé de dépollution en ville sur une surface verticale végétalisée: le mur dépolluant*, Fiche Réalisations originales, 5 p. http://www.plante-et-cite.fr/Ressource/fiche/213/application_d_un_procede_de_depollution_en_ville_sur_une_surface_verticale_vegetalisee_le_mur_depolluant/n:24
- [17] PUGH T.A.M., MACKENZIE A.R., WHYATT J.D., HEWITT C.N. (2012): *Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons*. Environmental science & technology, vol. 46, n°14, pp. 7692-7699.
- [18] Réseau National de Surveillance Aérobiologique : *Guide d'information Végétation en ville*, 68 p. <http://www.vegetation-en-ville.org>
- [19] TIWARY A., SINNETT D., PEACHEY C., CHALABI Z., VARDOLAKIS S., FLETCHER T., LEONARDI G., GRUNDY C., AZAPAGIC A., HUTCHINGS T.R. (2009): *An integrated tool to assess the role of new planting in PM10 capture and the human health benefits: a case study in London*. Environmental pollution, 157(10), pp. 2645-2653.
- [20] UZU G. (2009) : *Spéciation, transferts vers les végétaux et approches toxicologiques des émissions atmosphériques d'une usine de recyclage de plomb*. Mémoire de thèse, Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 207 p.
- [21] YANG J., YU Q., GONG P. (2008): *Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago*. Atmospheric environment, vol. 42, n°31, pp. 7266-7273. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749109002255>





NATURE EN VILLE ET LUTTE CONTRE LA POLLUTION DES SOLS URBAINS

EN BREF

Les phytotechnologies contribuent à la gestion de certains sols pollués plutôt qu'à leur stricte dépollution.

Les phytotechnologies, qui visent à résoudre des problèmes environnementaux en utilisant des plantes, parfois en association avec des micro-organismes du sol, contribuent à la préservation des sols et de leur qualité, à la limitation des transferts des contaminants et des risques pour l'Homme et les écosystèmes, et au maintien ou la restauration de la biodiversité.

Elles fonctionnent sous certaines conditions de choix d'espèces, d'entretien, de fréquentation, de suivi, de durée, pas toujours adaptées au milieu urbain. Elles constituent rarement des techniques de dépollution stricto sensu. La plupart des phytotechnologies peut néanmoins constituer une alternative douce ou un complément aux techniques conventionnelles de gestion des sols pollués (fixation, extraction, dégradation de contaminants). Il s'agit de solutions partielles : seule une partie du volume de sol pollué et des contaminants est traitée, et seuls des sols faiblement ou moyennement pollués peuvent être traités ainsi.

Les sols urbains, souvent contaminés

Les sols urbains sont souvent contaminés, du fait de la forte concentration d'activités polluantes actuelles et passées (entreprises, chauffage, véhicules de transport), ainsi que de forts remaniements des terres (remblaiement par des matériaux contaminés par exemple) et des pratiques de jardinage intensives dans les espaces verts et les jardins. La contamination peut persister après l'arrêt des activités industrielles pendant des siècles et poser des problèmes de pollution des eaux et de santé. C'est pourquoi on trouve sur d'anciens sites industriels des contaminants organiques [hydrocarbures, solvants halogénés, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), polychlorobiphényles (PCB) et polychloroterphényles (PCT)], des éléments traces métalliques (ETM) et des cyanures. Les sols des espaces verts et des jardins sont aussi contaminés par des HAP et des ETM, ainsi que par différents pesticides et biocides. Enfin, les sols proches des voies de circulation passantes sont contaminés en ETM (notamment en plomb), en HAP et en PCB.

La bioremédiation : de quoi parle-t-on ?

La bioremédiation des sols pollués désigne les techniques biologiques visant à immobiliser, extraire ou dégrader les

contaminants des sols et mettant en jeu des plantes et/ou des micro-organismes. D'une manière générale, les ETM sont immobilisés ou extraits alors que les composés organiques sont dégradés^(a).

La **phytoextraction** (phytotechnologie) regroupe un ensemble de techniques qui utilisent des espèces végétales pour extraire et transférer dans les parties récoltables des plantes (phytoextraction), extraire et volatiliser par transpiration (phytovolatilisation), contenir (phytostabilisation) ou dégrader (phyto-rhizodégradation^(b)) des polluants.

La **biodégradation** met en jeu des micro-organismes du sol, principalement des bactéries, mais parfois aussi des champignons microscopiques, afin de dégrader totalement ou partiellement les polluants organiques contenus dans les sols.

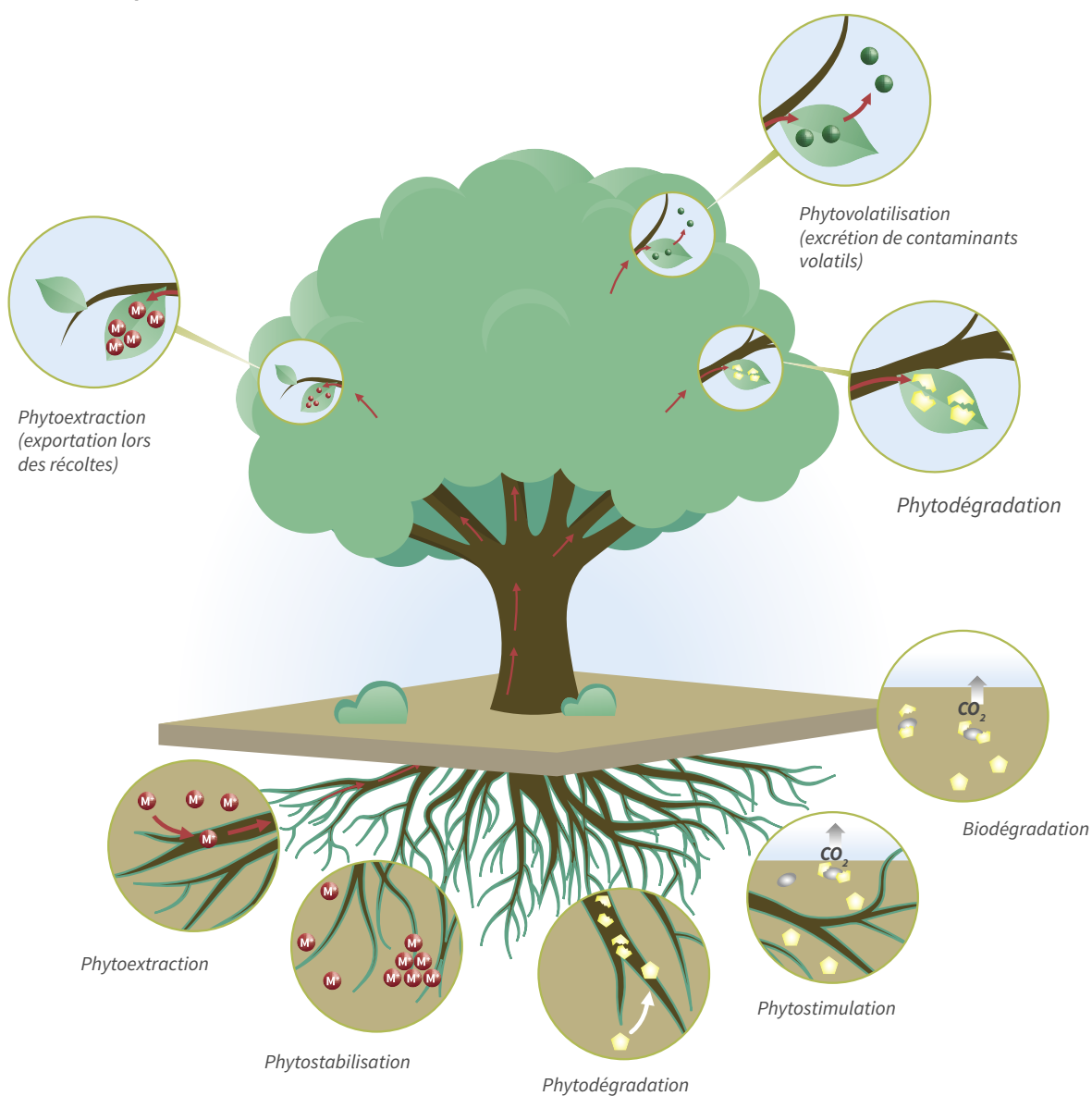
La **bioimmobilisation** consiste à stimuler l'activité des bactéries afin de faire évoluer les conditions du sol et d'engendrer la précipitation de certains ETM sous une forme stable et insoluble.

Des amendements chimiques, organiques ou biologiques (bactéries, champignons mycorhiziens) peuvent être utilisés sur site afin d'augmenter les performances des techniques de bioremédiation. Leur rôle vise par exemple à renforcer l'activité microbienne ou à créer les conditions agronomiques nécessaires^(c) pour permettre une bonne croissance des plantes.

(a) La mobilité et la biodisponibilité des contaminants et donc leurs effets sur l'homme et les écosystèmes, dépendent de leur degré de fixation aux constituants du sol et dans le cas des ETM de leur spéciation (forme chimique). Contrairement aux contaminants organiques, les ETM ne peuvent pas être dégradés, mais leur spéciation peut être modifiée par différentes techniques.

(b) Dans le cas de la rhizodégradation, les racines des plantes stimulent l'activité des microorganismes du sol dégradant les contaminants organiques

(c) C'est-à-dire améliorer les sols et/ou limiter la toxicité pour les plantes



LES PHYTOTECHNOLOGIES ET LES TECHNIQUES DE BIODÉGRADATION, PAS TOUJOURS ADAPTÉES EN MILIEU URBAIN

La bioremédiation bénéficie d'une image positive, on la pense souvent réalisée « naturellement », puisqu'elle s'appuie sur l'activité d'organismes vivants. Ce n'est pas toujours le cas. Les différentes techniques de **biodégradation** nécessitent des interventions lourdes et des équipements importants et ne sont souvent réservées qu'aux sites pollués industriels. Par ailleurs, certaines techniques de bioremédiation ne peuvent pas être utilisées en milieu urbain : la **phytovolatilisation**, qui utilise des plantes pour extraire du sol puis éliminer par transpiration certains polluants (tels que mercure, sélénium ou trichloréthylène), les transfère ainsi des sols vers l'atmosphère.

LES PHYTOTECHNOLOGIES, PERTINENTES POUR LA GESTION DES SOLS POLLUÉS EN MILIEU URBAIN

La plupart des phytotechnologies (phytostabilisation, phytoextraction, phyto-rhizodégradation^(a)) sont potentiellement utilisables sur des sols urbains, en complément ou comme alternative douce aux techniques conventionnelles de gestion des sols pollués (traitements physiques ou chimiques, mise en décharge, par exemple). Elles présentent l'avantage de préserver les sols par le maintien du sol en place, contrairement à l'une des techniques courantes consistant à excaver les sols, puis à les éliminer en décharge, et par la protection des sols contre l'érosion par les végétaux. Elles permettent aussi d'améliorer la qualité des sols (matière organique, fertilité, structure, activité biologique notamment).

Elles participent, grâce à la mise en place d'un couvert végétal, à la limitation des transferts de contaminants dans l'environnement (limitation de l'érosion du sol, des envols de poussières, du lessivage des éléments toxiques et de leur transfert vers les eaux souterraines et superficielles, de l'ingestion de terres par les herbivores) et donc à la limitation des risques pour la santé et les écosystèmes^(b) et au maintien ou restauration de la biodiversité (microflore et faune du sol, garants de la fonctionnalité des sols, insectes, oiseaux, mammifères notamment). Elles permettent enfin une valorisation foncière des espaces concernés (aménagement paysager pérenne).

LES PHYTOTECHNOLOGIES, SOLUTIONS PARTIELLES ET DE LONG TERME

Les phytotechnologies sont des solutions de gestion des sols pollués partielles, car la plante n'a accès qu'à une partie de la pollution :

- celle qui est biodisponible : c'est la seule partie des contaminants pouvant être traitée,
 - celle qui est présente dans le périmètre de sol colonisé par les racines (en moyenne, les 50 premiers centimètres de sol) : seule une partie du volume de sol pollué est traitée.
- De plus, la contamination doit rester dans des niveaux moyens à faibles pour permettre la croissance des plantes.



Couches supérieures du sol colonisées par les racines, pouvant être traitées par phytoremédiation © Isabelle Feix

La **phytostabilisation**, au stade de pré-commercialisation en France, permet d'immobiliser les contaminants. Cela limite ainsi leurs transferts dans l'environnement (eau, air, faune, flore, aliments) et réduit les risques pour l'Homme et les écosystèmes. A titre d'exemple, le peuplier, espèce tolérante à la contamination par les ETM, fixe les ETM dans - ou à la surface de - ses racines, fixe le sol (contribuant ainsi à limiter son érosion par l'eau et le vent et donc le transport des ETM) et prélève beaucoup d'eau (contribuant ainsi à diminuer les flux de contaminants vers la nappe phréatique). Cependant, la phytostabilisation ne permet ni d'extraire, ni de dégrader les contaminants du sol ; il ne s'agit donc pas de dépollution au sens strict.

La **phytoextraction** et la **phyto-rhizodégradation** font encore l'objet de travaux de recherche, leur application pratique n'étant qu'à ses débuts :

- La phytoextraction permet d'extraire des contaminants métalliques des sols (ETM). Elle utilise soit des plantes hyper-accumulatrices présentant le désavantage de produire peu de biomasse (par exemple, tabouret calaminaire), soit des plantes accumultrices qui produisent beaucoup de biomasse (par exemple, moutarde indienne, tournesol, saule et peuplier). Les parties aériennes, contenant les contaminants extraits par les plantes, sont récoltées, exportées et éliminées ou valorisées (pour la production d'énergie par exemple).

(a) La phyto-rhizodégradation associe la dégradation des polluants par les racines des plantes (phytodégradation) et par les microorganismes vivant dans le volume de sol proche des racines (phytostimulation).

(b) Il existe toutefois des cas où ces techniques augmentent les risques pour les animaux se nourrissant de végétaux (quand l'augmentation du transfert des contaminants vers les plantes est recherchée).

► La phyto-rhizodégradation ne concerne que des contaminants organiques (HAP notamment). Elle utilise la faculté qu'ont les plantes (graminées, légumineuses, par exemple) et leurs racines à créer un environnement dans le sol riche en activité microbienne qui change la biodisponibilité des polluants organiques et en augmente la dégradation.

Enfin, les phytotechnologies, pour être efficaces, nécessitent du temps (des années, voire des décennies). Elles sont donc intéressantes dans des contextes où la durée de traitement n'est pas une contrainte.

Q En Angleterre, *Thlasi caerulescens* permet d'extraire en moyenne 17,6 kg/ha/an en 1991 et 7,2 kg/ha/an en 1992 de zinc, avec un maximum de 55,1 kg/ha/an en 1991 et 33,2 kg/ha/an en 1992, des sols contaminés par du zinc (entre 124 et 444 mg/kg m.s.). Par extrapolation, le temps nécessaire pour abaisser les sols les plus pollués (440 mg/kg m.s.) à des teneurs acceptables (300 mg/kg m.s.) serait de 13 ans^[9 ; 10].

Q En Belgique, des expérimentations menées sur des sols contaminés (5 mg/kg m.s. cadmium) montrent que les saules et le tabac sont les techniques de phytoextraction les plus prometteuses. 58 ans à plus d'un siècle seraient nécessaires au tabac pour ramener la concentration du sol de 5 à 2 mg/kg m.s. et 12,5 ans seraient nécessaires au saule pour réduire la concentration du sol de 1 mg/kg m.s. [8].

Q Les quantités de nickel extraites de sols riches en nickel en Albanie, grâce à l'association de 3 plantes (*Alyssum murale*, petite plante hyper-accumulatrice, *Chrysopogon gryllus* et *Trifolium nigrescens*) sont de 3 kg Ni/ha/an pour les parcelles non fertilisées et de 25 kg Ni/ha/an pour les parcelles fertilisées^[4].

Q Les coûts des phytotechnologies sont très disparates et dépendent de la durée du suivi. Ils varient de 18 à 40 €/m² de surface de sols traités pour la phytoextraction et de 2 à 12 €/m² de surface de sols traités pour la phytostabilisation^(c) [6].

Pour en savoir plus sur les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués

Les phytotechnologies gagnent à être mieux connues pour être mieux et plus souvent utilisées par les maîtres d'ouvrage et bureaux d'études en situation de gestion de sites pollués. A l'échelle de la parcelle, elles constituent des alternatives pertinentes dans des contextes où la durée d'immobilisation du site n'est pas une contrainte. Elles permettent également de répondre à des attentes sociétales et participent au développement de la bioéconomie. Cet ouvrage présente les nouveaux résultats de recherche en la matière.

Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués. Ed. ADEME, réf 010191, 68 p. http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/phyto_010191.pdf



(c) Coûts calculés hors apport de terre végétale. L'analyse économique globale de ces techniques est encore à poursuivre en tenant compte des différents scénarios de valorisation de la biomasse et des coûts liés aux phases de mise en place sur le site, de suivi de la performance et de surveillance sur le long terme.



BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 4

- [1] ADEME (2012) : *Phytotechnologies appliquées aux sites pollués*. Journée technique nationale – Paris – 17 octobre 2012 - Recueil des interventions. 115 p.
- [2] ADEME (2017) : *Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués - nouveaux résultats de recherche et démonstration* (mise à jour de Bert. V et al 2012). éd. ADEME, réf 010191
- [3] ADEME, BRGM. *SelecDEPOL – Outil interactif de pré-sélection des techniques de dépollution*. <http://www.selecdepol.fr/>
- [4] BANI A., ECHEVARRIA G., SULÇE S., MOREL J.L., MULLAI A. (2007): *In-situ phytoextraction of Ni by a native population of Alyssum murale on an ultramaWc site* (Albania). Plant Soil, 293, pp.79–89.
- [5] BERT V., HADJ-SAHRAOUI A., LEYVAL C., FONTAINE J., OUVREARD S. (2012) : *Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués*. Etat de l'art et guide de mise en œuvre. ADEME, EDP sciences. 86 p. <http://laboutique.edpsciences.fr/produit/9782759808052> <http://www.ineris.fr/ressources/recherche/iddoc=2678>
- [6] COLOMBANO S., SAADA A., GUERIN V., BATAILLARD P., BELLENFANT G., BERANGER S., HUBE D., BLANC C., ZORNIG C., GIRARDEAU I. (juin 2010) : *Quelles techniques pour quels traitements – Analyse coûts – bénéfices*. Rapport Final BRGM/RP - 58609 – FR, 403 p.
- [7] DUBOURGUIER H.C., PETIT D., DERAM A., LOGEAY C. (2001) : *Le phytomanagement - Eléments de synthèse*. Les Cahiers Techniques - Pôle de Compétence Sites et Sédiments Pollués, 50 p.
- [8] HERZIG R., NEHNEVAJOVA E., VANGRONVELD J., RUTTENS A., MASTRETTA C. (2005) : *In: PHYTAC—development of systems to improve phytoremediation of metal contaminated soils through improved phytoremediation*. Final report of the 5th Framework Programme, Projects Nr QLRT-2001-00429 and QLRT-2001-02778 (NAS), December 2005, pp. 160–190.
- [9] MCGRATH S.P., SIDOLI C.M.D., BAKER A.J.M., REEVES R.D. (1993): *The potential for the use of metal-accumulating plants for the in situ decontamination of metal-polluted soils*. In: Integrated soil and sediment research: a basis for proper protection. Eijsackers H. and Hamers T. (eds), Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 673–676.
- [10] MCGRATH S.P., DUNHAM S.J., CORRELL R.L. (2000): *Potential for phytoextraction of zinc and cadmium from soils using hyperaccumulator plants*. In: Phytoremediation of contaminated soil and water. Terry N. and Bañuelos G. (eds.), CRC Press LLC, pp. 117-136.
- [11] UNEP, AGÉBIO, FFP, AITF, HORTIS (février 2015) : Règles professionnelles. Travaux d'aménagement et d'entretien des zones naturelles. Travaux de génie végétal N° C.1-R0. <http://www.lesentreprisesdupaysage.fr/tout-savoir/r%25C3%25A8gles-professionnelles#les-règles-parues>
- [12] UNEP, AITF, FFP, HORTIS (décembre 2012) : Règles professionnelles. Travaux de mise en œuvre et d'entretien des plantes. Travaux des sols, support de paysage. Caractérisation, amélioration, valorisation et reconstitution N° P.C.1-R0. <http://www.lesentreprisesdupaysage.fr/tout-savoir/r%25C3%25A8gles-professionnelles#les-règles-parues>
- [13] UNEP, AITF, FFP, HORTIS (octobre 2013) : Règles professionnelles. Travaux d'aménagement et d'entretien des constructions paysagères. Travaux de terrassement des aménagements paysagers N° C.C.1-R0. <http://www.lesentreprisesdupaysage.fr/tout-savoir/r%25C3%25A8gles-professionnelles#les-règles-parues>
- [14] US-EPA (july 2001): Brownfields technology primer: selecting and using phytoremediation for site cleanup. 45 p.
- [15] US-EPA (september 2010): Phytotechnologies for site cleanup. Fact sheet. 11 p.

5 NATURE EN VILLE ET AMBIANCES SONORES

EN BREF

L'effet de la nature en ville pour limiter les niveaux sonores est à relativiser par rapport à l'effet d'autres dispositifs (écrans acoustiques, isolation acoustique des bâtiments) mais l'intégration d'éléments de nature en ville a un impact positif sur le ressenti et l'appréciation de l'ambiance sonore.

La diminution de la propagation sonore par les végétaux et le sol, comprise entre 1 et 5 dB(A), est due à leur effet d'écran et surtout à la distance que l'écran végétal induit entre la source et le récepteur. Cette diminution, non perceptible par l'oreille humaine, doit être relativisée par rapport à celle procurée par l'installation d'écrans acoustiques (8 à 12 dB(A)) dans l'espace public. De plus, ces diminutions viennent compléter l'effet des fenêtres isolantes (30 à 35 dB(A)) dans les espaces privés. Par ailleurs, la nature en ville peut influencer les ressentis : la végétalisation d'un espace influe le jugement porté sur la qualité de l'ambiance sonore, la présence d'eau en mouvement génère un son qui peut être jugé agréable et/ou permettre de masquer un autre son. La nature en ville doit donc être intégrée dans une approche globale des ambiances sonores.

5

Caractérisation de l'environnement sonore

L'environnement sonore est formé d'une combinaison de sons et sa perception varie en fonction de paramètres individuels, environnementaux, temporels, etc.

Il se caractérise par un **niveau sonore** qui se mesure en décibels (dB(A))^(a). Le Lden est un indicateur européen utilisé pour la cartographie de l'environnement sonore et pour fixer des seuils d'action, il permet de mesurer l'environnement sonore sur 24 heures avec une pondération concernant les niveaux moyens de soirée et de nuit (respectivement pondérés de +5 et +10 dB(A)) pour représenter la gêne ressentie.

Cadre réglementaire

► La directive européenne 2002/49 CE du Parlement européen et du Conseil du 25 juin 2002 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement impose aux établissements publics de coopération intercommunale recensant plus de 100 000 habitants 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).

► La transposition de la directive européenne dans le droit

français a été établie par la loi n° 2005-1319 du 26 octobre 2005 qui a été traduite dans le Code de l'Environnement par les articles L. 572-1 à L. 572-11.



Environ 40% de la population de l'Union Européenne est exposée au bruit du trafic routier à des niveaux dépassant 55 dB(A) le jour et 30% à des niveaux dépassant 55 dB(A) la nuit^[15].



200 000 logements sont fortement exposés au bruit routier (+ 70 dB(A) en façade le jour)^[9].

Les effets du bruit de l'environnement sur la santé^[5]

Le bruit de l'environnement agit sur la santé. A long terme, quand il est répété, le bruit a des effets liés au stress, comme la fatigue physique et nerveuse, l'insomnie, l'hypertension artérielle chronique, l'anxiété, le comportement dépressif ou agressif, l'altération de la fonction immunitaire et le diabète.

(a) dB(A) : unité de mesure du bruit. L'unité physique qui exprime les niveaux de bruit est le décibel (dB). Le décibel(A), ou dB(A), est quant à lui plus représentatif de la sensation perçue par l'oreille humaine car il

intègre la sensibilité de l'oreille humaine en fonction de la fréquence d'un son (grave, aigu). C'est l'unité qui est classiquement utilisée en acoustique environnementale.





1 européen sur 5 est régulièrement exposé la nuit à des niveaux sonores pouvant être nocifs pour la santé [15]



Le coût social annuel induit par les nuisances sonores des transports en France s'élève à 20,6 milliards d'euros. Sur ce coût total, 11,5 milliards d'euros correspond au coût sur la santé. Parmi ces derniers, 5,5 milliards d'euros sont dus aux troubles du sommeil induit par le trafic routier[1].

La propagation du bruit

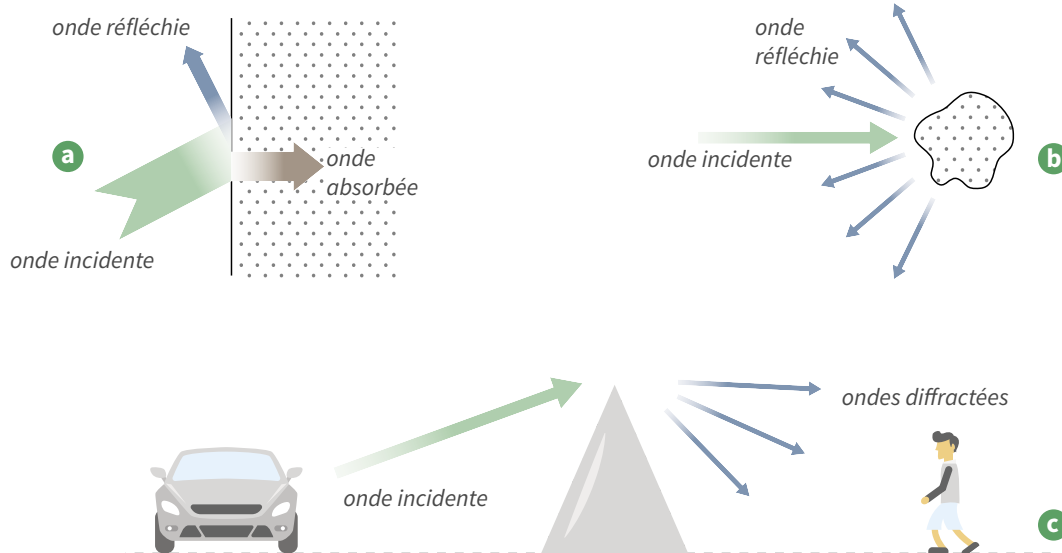
Les ondes acoustiques se propagent dans l'air et dans la plupart des matériaux. Au cours de la propagation, plusieurs phénomènes physiques sont possibles selon la nature des obstacles rencontrés : **l'absorption, la réflexion, la diffraction.**

Lorsqu'une onde sonore incidente rencontre une

surface dure (façade en béton d'un bâtiment ou surface minéralisée d'une place par exemple), la majeure partie de son énergie est réfléchi (elle se comporte comme une balle rebondissant sur un mur). Confrontée à certains types de matériaux dit absorbants (matériaux poreux ou comportant des cavités), une bonne partie de son énergie est absorbée et l'énergie résiduelle est réfléchi (schéma a).

L'onde acoustique réfléchi peut l'être dans une direction particulière (réflexion spéculaire), notamment lorsque la surface est dure, plane et lisse, ou réfléchi dans de multiples directions (réflexion diffuse) lorsque l'obstacle présente des irrégularités (schéma b).

L'onde acoustique est diffractée lorsqu'en rencontrant un obstacle, sa direction change, par exemple, si elle rencontre une arête de mur. Elle peut alors atteindre la zone située derrière le mur en raison de la diffraction (dans de multiples directions) sur l'arête du mur (schéma c).



L'IMPACT ACOUSTIQUE LIMITÉ DE LA VÉGÉTATION SUR LE NIVEAU SONORE

L'utilisation de la végétation en tant que filtre acoustique a été envisagée sans succès dans des travaux de recherche. Une étude portant sur sept espaces végétalisés de 15 à 40 mètres d'épaisseur constitués de buissons et d'arbres de haute tige aboutit au constat de l'absence ou la quasi-absence d'atténuation sonore aux moyennes fréquences (composant majoritairement le bruit de trafic) liée à la végétation[12]. D'autres travaux montrent une très faible réduction du niveau sonore liée à la végétation[11].

La végétation contribue en revanche à une appréciation positive de l'ambiance sonore. Certains bureaux d'études travaillent à créer des écrans végétaux dont les troncs seraient soudés afin d'associer les avantages perceptifs de la végétation à ceux d'un écran anti-bruit standard. Ces innovations traduisent une demande de nature mais l'incapacité de celle-ci à créer un véritable écran sonore naturel.

D'un point de vue strictement acoustique, l'impact de la végétation, compris entre 1 et 5 dB(A), n'est pas perceptible et ne peut être comparé à celui procuré par l'installation d'écrans acoustiques (8 à 12 dB(A)) dans l'espace public. Par ailleurs, ces diminutions viennent compléter l'effet des fenêtres isolantes (30 à 35 dB(A)) dans les espaces privés.

L'EFFET ACOUSTIQUE RELATIF DE DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS PAYSAGERS

Les surfaces au sol végétalisées

On trouve traditionnellement ce type de surface dans les parcs, les jardins, les aires de jeux pour enfants, les terrains de sport. Dans certaines configurations (cours ou places urbaines), elles permettent d'apporter une diminution de 2 à 4 dB(A) par rapport aux mêmes surfaces mais revêtues de matériaux réfléchissants (comme par exemple des dalles ou de l'asphalte).



Un gain de 4dB(A) peut être obtenu sur le bruit du tramway avec une plateforme de tramway engazonnée par rapport à une plateforme minéralisée[8].

Les façades végétalisées

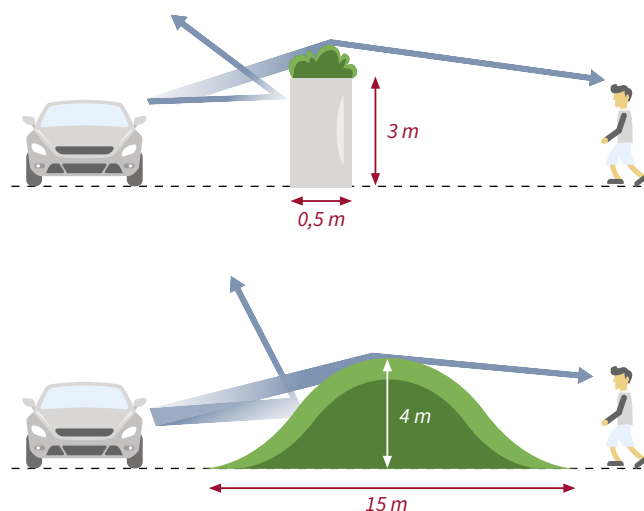
La végétalisation des bâtiments (surtout dans le cas des murs végétalisés où le substrat couvre toute la façade) permet de réduire les niveaux de bruit en particulier dans les rues canyons (ou rues en 'U'), mais aussi dans les cours ou places urbaines.

Dans certaines configurations, on peut atteindre des gains de 2 à 4 dB(A) pour les murs végétalisés selon les matériaux utilisés pour le substrat (pouzzolane et autres granules de roches volcaniques à base de silice, fibre de coco, laine à base de fibres végétales de chanvre, etc.).

Les écrans acoustiques végétalisés

Les écrans inférieurs à 1 mètre de haut et végétalisés présentent un intérêt sur l'ambiance sonore en milieu urbain. Des expérimentations acoustiques sont menées sur ce type de mobilier[7].

Par rapport aux écrans acoustiques, les merlons (ou buttes de terre) présentent des avantages sur les plans acoustique et paysager : absence de réflexion vers les zones bâties, surface relativement absorbante (grâce au sol), possibilité de les végétaliser (apportant ainsi des gains acoustiques supplémentaires) ; mais pour une même efficacité, ils doivent en général être légèrement plus hauts que les écrans, puisque l'arête est plus éloignée de la voie. De plus, nécessitant une emprise importante pour leur implantation (la largeur représente 3 à 4 fois la hauteur du merlon), ils sont moins utilisés en zone urbaine qu'en zone périurbaine ou rurale (voir schéma ci-dessous).



Écran et merlon à efficacité égale

Les toitures végétalisées

Les toitures végétalisées et notamment engazonnées (substrat à partir de 10cm d'épaisseur) apportent un petit gain acoustique (1 dB(A) environ) dans certaines configurations spécifiques de rue en « U »[10]. Des gains notables s'observent également dans les cours intérieures des îlots de bâtiments, améliorant ainsi la protection de la bande de bâtiments faisant écran aux bruits de la rue.

Néanmoins, une toiture végétalisée n'apporte généralement pas de gain d'isolation acoustique supplémentaire à l'intérieur d'un bâtiment, surtout si la structure porteuse est en béton. Le principal effet isolant provient en effet de la structure du bâtiment. On ne peut donc pas compter sur la végétalisation d'une toiture pour améliorer l'isolation d'un bâtiment contre le bruit extérieur.



Les arbustes ou buissons et les arbres

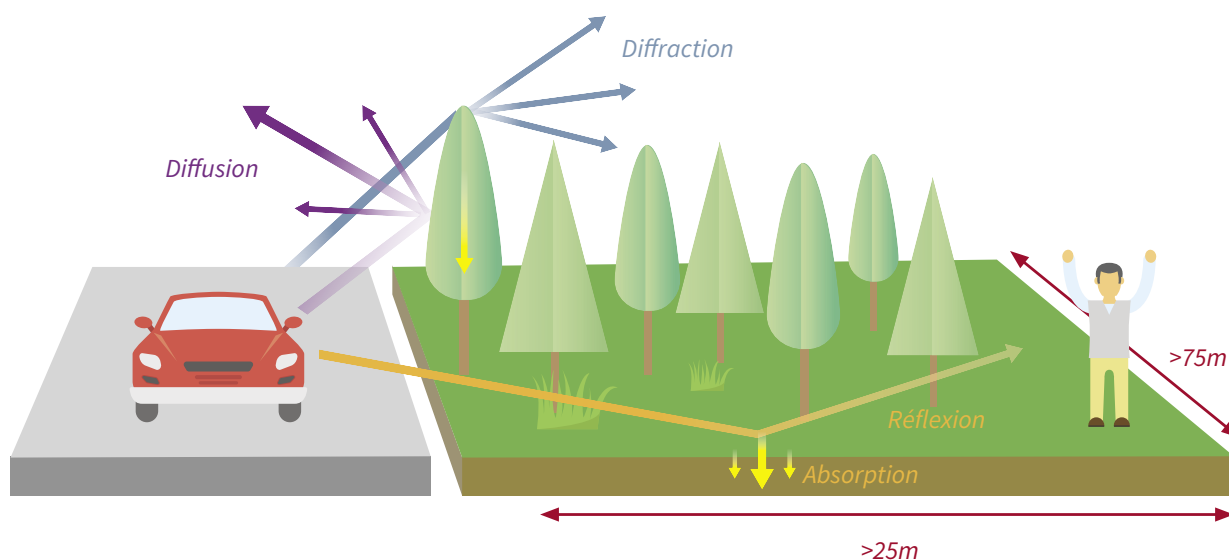
Le sol (ou le substrat) contenant les racines constitue le principal matériau d'atténuation acoustique, alors que les tiges, les feuilles ou les troncs ont une moindre contribution. Une simple haie d'arbustes, de buisson ou d'arbres n'apporte quasiment aucune atténuation du niveau sonore. Un écran végétal (composé d'arbustes ou de buissons) d'une largeur inférieure à 1 mètre est transparent aux ondes sonores. Un tel écran végétal ne peut pas être comparé à un écran acoustique (ou mur anti-bruit) qui apporte une diminution de 8 à 12 dB(A) du niveau sonore routier. Toutefois, masquer la vue d'une route passante peut provoquer une perception de mieux-être et une diminution de la gêne associée (selon des études de psychoacoustique), même si les niveaux sonores restent élevés.

L'atténuation du niveau sonore de la circulation par une bande de terrain de 25m de largeur ou plus plantée d'arbres est possible[3]. Ce type d'aménagement, nécessitant une emprise importante au sol, est plutôt réservé au milieu périurbain et rarement applicable en milieu urbain dense.

Le sol (racines des plantes, litière et couche d'humus) reste le principal absorbant acoustique. La présence d'arbres (diamètre des troncs de 16cm, espacés d'un à deux mètres) apporte une atténuation supplémentaire par rapport à la bande de terrain simplement engazonnée grâce aux tiges, branches, brindilles et feuilles des arbres qui diffusent (par réflexion et diffraction), voire absorbent, les ondes sonores. Un gain de 7 dB(A) peut ainsi être apporté (voir schéma ci-dessous).

Ainsi, les niveaux sonores sont réduits par interaction avec le matériel végétal de deux manières principales : le bruit peut être redirigé par réflexion, diffraction, ou diffusion, ou le son peut être absorbé par la matière végétale aérienne (vibrations acoustiques amorties par les feuilles) et par le sol.

De plus, la canopée d'une telle bande de terrain plantée d'arbres permet de garder une température plus élevée au sol, notamment la nuit. Une partie des ondes acoustiques est alors déviée vers le haut (plus froid), ce qui réduit les niveaux sonores de 1 à 2 dB(A).



L'atténuation du bruit par la présence d'une bande boisée (largeur 25m et longueur 75m minimum)

Ces effets commencent à être sensiblement perçus à partir de 25m. Plus la distance augmente, plus le gain est élevé, grâce à l'éloignement de la source. Cela ne concerne donc pas directement le milieu urbain.

La présence d'eau

Les masses d'eau, sous forme de plans d'eau, de bassins, d'étangs, de petits lacs par exemple sont des surfaces non absorbantes (tout comme les surfaces minéralisées) qui réfléchissent les ondes sonores. Elles n'apportent donc pas d'amélioration acoustique.

La présence d'eau en mouvement (fontaines, chutes d'eau, jets d'eau) génère un son qui peut être jugé agréable par un passant, ou au contraire gênant par un résident. Ce type de son peut permettre de masquer un autre son. On parle alors de masque acoustique.

Focus sur le projet de recherche HOSANNA

Le projet HOSANNA (Holistic and sustainable abatement of noise by optimized combinations of natural and artificial means, atténuation du bruit environnemental au moyen de matériaux naturels, artificiels et recyclés) s'inscrit dans la thématique sur les transports terrestres durables ouverte en 2008 dans le 7ème Programme-Cadre de Recherche et Développement de l'Union européenne. Douze partenaires européens (universités et centres de recherche, collectivités territoriales, syndicats de transports et entreprises) ont participé à ce projet coordonné par l'école d'ingénierie civile de Chalmers en Suède, dont le CSTB, Canevaflor, Acoucity. Le projet HOSANNA a permis de développer une boîte à outils pour réduire les bruits routiers ou ferroviaires

par l'utilisation optimale de la végétation, du sol, et de matériaux naturels ou recyclés.

Le projet a étudié un certain nombre de solutions de réduction du bruit qui pourraient permettre d'atteindre des améliorations acoustiques notamment par la végétalisation des façades et des toits des bâtiments, par la plantation d'arbres, d'arbustes ou de buissons, par l'utilisation d'écrans acoustiques végétalisés. La réduction du bruit a été évaluée en termes de niveaux sonores, mais également en termes de perception et d'analyse coûts-bénéfices. Plusieurs combinaisons de solutions ont été étudiées, les gains ne sont pas nécessairement cumulatifs selon les diverses configurations urbaines.

5

LA NATURE EN VILLE, PARAMÈTRE INFLUANT LE RESSENTI DE L'AMBIANCE SONORE

La présence de végétation peut influencer de manière positive l'appréciation de l'ambiance sonore dans un espace donné[13], en particulier lorsque le niveau sonore ambiant est faible. Des plantations peuvent donc être envisagées en complément de protections acoustiques, pour la végétalisation des merlons de terre, la réalisation d'écrans acoustiques végétalisés (ou de murs plantés), ou encore la végétalisation de voies de tramway ou de l'espace situé entre une voie de circulation et l'écran acoustique.

La présence d'eau influe également sur l'appréciation de l'ambiance sonore. Bien que les masses d'eau (plans d'eau, bassins, étangs, petits lacs par exemple) n'apportent pas d'amélioration acoustique, les sons naturels, et particulièrement les sons d'eau, génèrent un sentiment positif vis-à-vis de l'environnement[4], en particulier grâce au masque acoustique qu'ils créent.

En savoir plus sur le coût des pollutions sonores

La mesure du coût social du bruit permet d'apporter des valeurs économiques de référence en vue de nourrir une analyse plus globale des coûts et des bénéfices de politiques et de projets de réductions des nuisances sonores (exemples : revêtements routiers, murs anti-bruit, isolations de façades, capotage de matériel, sensibilisation des citoyens aux comportements vertueux, etc.). Cette étude a pour objectif de consolider les connaissances des décideurs publics et privés sur les conséquences financières directes et indirectes de l'exposition au bruit.

Analyse bibliographique des travaux français et européens : le coût social des pollutions sonores, rapport ADEME et Conseil National de Bruit (2016), 59 p. <http://www.ademe.fr/analyse-bibliographique-travaux-francais-europeens-cout-social-pollutions-sonores>





BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 5

- [1] ADEME et Conseil National du Bruit (2016) : Analyse bibliographique des travaux français et européens : le coût social des pollutions sonores 59 p.
- [2] BARLES C. ROLAND J. (2012) : TARZAN - Jungle Art - Rapport d'étude ADEME 53 p.
- [3] BARRIÈRE N. (2000) : *Etude théorique et expérimentale de la propagation du bruit de trafic en forêt*. Thèse de doctorat. CSTB, 120 p.
- [4] CARLES J.-L., LOPEZ BARRIO I. ET VICENTE DE LUCIO L. (1999): *Sound influence on landscape values*. Landscape and Urban Planning, (43), p. 191-200.
- [5] Centre d'Information et de documentation sur le bruit (2013) : *Bruit et santé*. 24 p. <http://www.bruit.fr/images/stories/pdf/guide-bruit-sante-cidb-2013.pdf>
- [6] CHOBEAU P. (2014): *Modelling of sound propagation in forests using the transmission line matrix method: study of multiple scattering and ground effects related to forests*. Thèse de doctorat, Université du Maine - Le Mans, IFFSTAR, CEREMA. 146 p.
- [7] FORSSEN J. (coord.), DEFANCE J., VINCENT B. et al. (2013): *Holistic and sustainable abatement of noise by optimized combinations of natural and artificial means* – Projet HOSANNA financé par l'Union Européenne (FP7/2007-2013) Summary Brochure, 50p.
- [8] GOLAY F. (2008) : *Bibliographie sur l'émission acoustique des tramways: modélisation des véhicules étendus par des sources sonores ponctuelles*. Edition CEREMA (ex-CERTU), 117 p.
- [9] Grenelle de l'Environnement (2008) : *Pour une approche globale*. Rapport du comité opérationnel « Bruit », n°18, 89 p.
- [10] GUILLAUME G. (2012): *Numerical predictions for sustainable development of cities : acoustic propagation in presence of urban vegetation* – Internoise
- [11] HUDDART L. (1990): *The use of vegetation for traffic noise screening*. Transport and Road Research Laboratory, 238 p.
- [12] KRAGH J. (1982): *Road traffic noise attenuation by belts of trees and bushes*. Danish Acoustical Laboratory, 128 p.
- [13] MARRY S. (2013) : *L'espace sonore en milieu urbain*, Presses Universitaires de Rennes, Collection Espace et Territoires, 202 p., <http://www.pur-editions.fr/detail.php?idOuv=3253>
- [14] MUSY M. et al. (mai 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, 117p.
- [15] OMS – Organisation mondiale de la santé (2009) : *Valeurs guides concernant le bruit nocturne en Europe*. 162 p.
- [16] ORS IdF - Observatoire régional de la santé en Ile-de-France (2009) : *Les perceptions du bruit en Ile-de-France*. 158 p.
- [17] PHILLIPS-BERTIN C., CHAMPELOVIER P., TRINDADE C., LAMBERT J. (2006) : *Caractérisation des sources et évaluation de la perception du bruit et des vibrations des tramways. Enquête auprès de riverains : méthodologie et premiers résultats*. Rapport technique ADEME / IFSTTAR (ex-INRETS), n° convention ADEME 04 03 C0053. 54 p.



6 NATURE EN VILLE ET GESTION DES EAUX PLUVIALES ET DES INONDATIONS

EN BREF

La contribution de la nature en ville à la gestion des eaux pluviales et à la limitation des inondations dépend de plusieurs paramètres et vient en complément d'autres mesures.

La nature en ville, en particulier les arbres et les solutions végétalisées alternatives à la gestion « tout tuyau » des eaux pluviales, contribue à réduire le volume des eaux de ruissellement urbaines, en favorisant l'infiltration sur place des eaux pluviales, en ralentissant l'écoulement et en augmentant la part évapotranspirée. La nature en ville participe ainsi à la limitation de certains types d'inondations et leurs conséquences. Néanmoins, son efficacité est variable selon le système utilisé (végétaux, sol), le profil de distribution des pluies et sa position dans le bassin versant. De plus, la nature en ville ne suffit pas à limiter les inondations, elle est complémentaire à la limitation de l'étalement urbain et au maintien ou la restauration de la nature en amont des villes, voire à des ouvrages pour la prévention et la protection contre les crues.

6

Les inondations : des phénomènes naturels, souvent aggravés par l'homme

Les volumes d'eau produits par les pluies s'évacuent de trois façons :

- une première partie reste stockée en surface ou dans les couches de sol superficielles pendant quelques heures ou quelques jours, puis retourne à l'atmosphère par évaporation ou évapotranspiration ;
- une deuxième partie s'infiltré en profondeur et rejoint une nappe phréatique ;
- enfin, une troisième partie ruisselle en surface et rejoint les eaux de surface (rivières, étangs par exemple) en quelques minutes ou quelques heures.

Une inondation est une submersion temporaire de terres. On en distingue cinq types :

- de plaine (lente et durant plusieurs semaines, due au débordement d'un cours d'eau ou à la remontée de la nappe phréatique),
- torrentielle (rapide et brutale, liée à de violentes précipitations sur un bassin resserré, comme en montagne),
- urbaine (ultra-rapide, où les eaux de pluies ruissellent sur les surfaces imperméabilisées et envahissent les points bas, les rues devenant des torrents et le volume

de matériaux charriés pouvant détruire bâtiments et infrastructures),

- par rupture ou défaillance d'ouvrages hydrauliques (barrages ou digues),
- par submersion marine dans les estuaires ou sur les côtes (lié à un tsunami ou à la conjonction de la crue de fleuves et/ou de tempêtes, de fortes marées et de situation météorologique dépressionnaire).

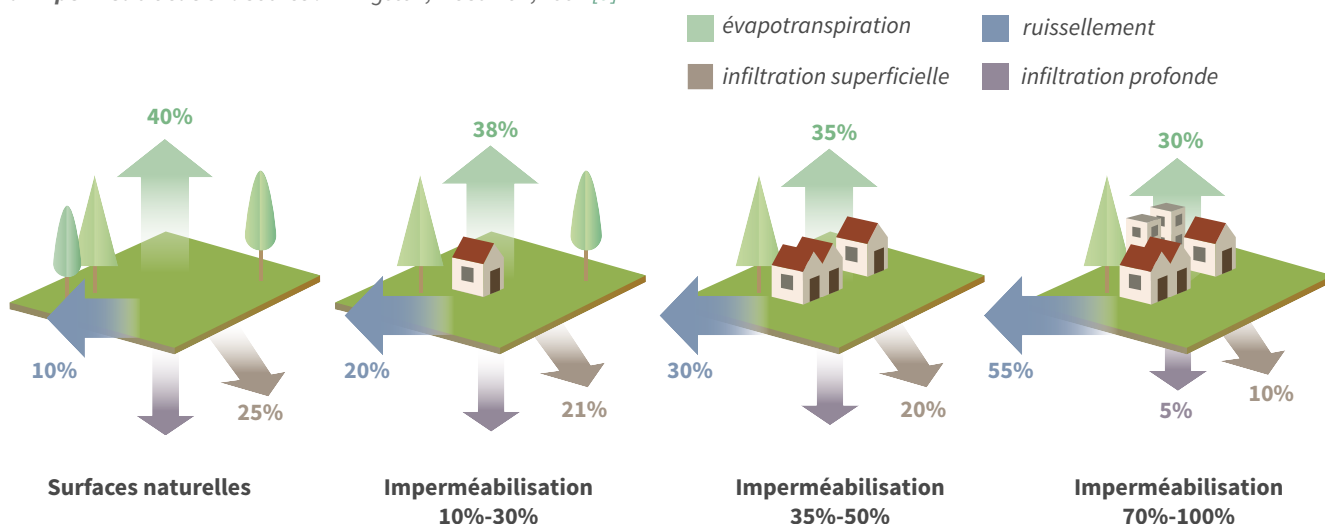
Les causes des inondations des 3 premiers types dépendent de nombreux facteurs naturels (type de sol et de sous-sol, recouvrement par la végétation, caractéristiques des pluies, du réseau hydrographique et morphologie du bassin versant notamment), mais elles sont aggravées par l'activité humaine. En milieu urbain, l'imperméabilisation des sols augmente le ruissellement et diminue fortement les possibilités d'infiltration et la part évaporée et/ou évapotranspirée. En amont des villes, le déboisement, la suppression des haies, la mise en culture des prairies, le drainage des terres agricoles, la suppression des champs naturels d'expansion des crues (tels que les zones humides) en sont des causes importantes.



Près des 2/3 des zones humides (au moins 2,5 Mha) ont disparu en France depuis un siècle^[1].



Importance relative de l'infiltration, du ruissellement et de l'évapotranspiration selon l'occupation du sol et le taux d'imperméabilisation. Source : Livingston, McCarron, 1992 [9]



Les conséquences des inondations sont liées à la présence humaine (constructions, équipements et activités) en zone inondable. La gravité dépend des enjeux (population, enjeux économiques, patrimoine culturel et environnemental) du territoire. Les conséquences sont variables : pertes de vie humaines, détérioration ou destruction de bâtiments, de biens et de matériels (véhicules, marchandises) et d'infrastructures (routes, voies de chemin de fer, ponts, réseau électrique, équipements d'eau et d'assainissement), déstabilisation d'activités économiques (commerces, industries), destruction ou diminution des récoltes.

En France, les inondations constituent le premier risque naturel. 16 000 communes sont concernées et les dégâts causés représentent 250M€/an[4 ; 10].

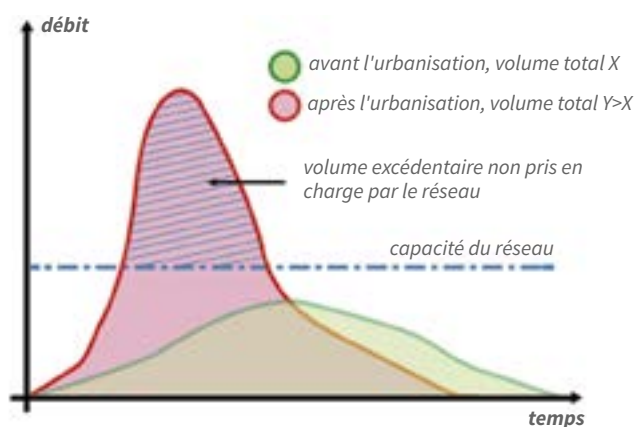
LES PHÉNOMÈNES EN JEU EN AMONT ET À L'INTÉRIEUR DES ESPACES URBANISÉS

En amont et à l'intérieur des villes, les sols et la végétation contribuent à limiter les inondations des villes et leurs conséquences, grâce à leur action sur les eaux ruisselées :

- ils réduisent les volumes ruisselés (par infiltration ou évapotranspiration de l'eau) ;
- ils retardent l'arrivée des eaux ruisselées dans le cours d'eau (par rétention temporaire de l'eau ruisselée et en freinant l'écoulement des eaux ruisselées),
- ils réduisent le débit de rejet des eaux ruisselées (ratio « volume d'eau / unité de temps »), ce qui a pour effet d'écarter la crue (abaisser le débit de pointe de la crue).

L'efficacité des différentes composantes de la nature en ville dépend de la surface du sol, des caractéristiques du sol et de la végétation, des profils de distribution des pluies (intensité et période de retour) et de leur position dans le bassin versant.

Influence de l'urbanisation sur l'évolution des débits arrivant à l'exutoire d'un bassin versant, suite au ruissellement des eaux après un événement pluvieux. Source : CEPRI, 2014



En vert, l'occupation des sols (agriculture, forêt, nature) a un effet tampon sur l'écoulement des eaux : les débits progressent lentement. Le réseau d'assainissement ne sature pas.

En rouge, les volumes d'eau ruisselée sont supérieurs du fait de l'imperméabilisation des surfaces et l'écoulement de l'eau est accéléré. Les capacités d'insertion dans le réseau sont dépassées et les eaux ruissellent dans la ville située en aval du bassin versant, pouvant provoquer une inondation urbaine

LA NATURE EN VILLE POUR GÉRER LES EAUX DE RUISSELLEMENT URBAINES, DONC LIMITER LES INONDATIONS

L'apport des différents éléments végétalisés

► Les surfaces plantées d'arbres en ville contribuent, dans le cas d'événements pluvieux modestes, à limiter la part des eaux pluviales qui ruissellent, car les arbres interceptent la pluie, transpirent de l'eau, augmentent la part évapotranspirée dans leur environnement immédiat et augmentent l'infiltration dans le sol à proximité des racines.

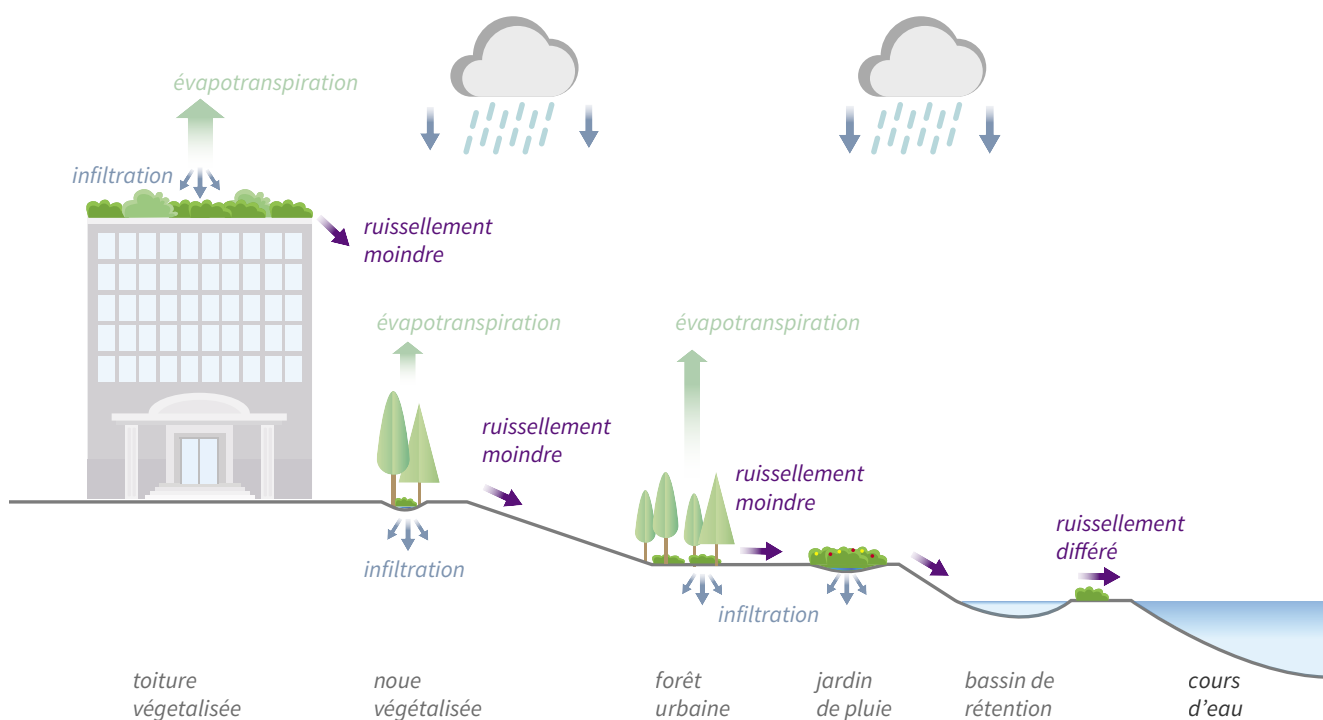
► Les toitures végétalisées contribuent à réduire le ruissellement avec une efficacité variable en fonction de la saison (performances réduites en hiver) et du type d'événement pluvieux (performance significative pour des événements de faible intensité et espacés dans le temps). L'épaisseur et la nature du sol (substrat) sont des facteurs influents, plus que le type de végétation.

► Des ouvrages végétalisés permettent d'infiltrer les eaux de ruissellement et/ou de les stocker temporairement : fossés, noues, tranchées d'infiltration (au ras des murs d'un bâtiment ou le long des voies circulées), bassins d'infiltration (bassin perméable sec ou humide, dans lequel les eaux pluviales sont déversées et d'où elles percolent dans le sol), bassins de rétention (bassin, sec ou humide, de stockage de l'eau de pluie avant son rejet vers le milieu naturel ou le réseau d'assainissement), jardins de pluie (appelés aussi jardins bio-filtrants, installés dans des dépressions du sol et plantés, ils recueillent les eaux pluviales de surfaces imperméabilisées privatives et infiltrent la totalité du ruissellement produit par des événements pluvieux d'une période de retour mensuelle^(a)).

Les toitures végétalisées réduisent les volumes d'eau ruisselés : la réduction se situe entre 40 et 80% sur l'année et entre 60 et 80% pour les pics de débit (débits extrêmes)[11].

Un jardin de pluie permet l'infiltration de 30% d'eau supplémentaire par rapport à une pelouse traditionnelle[7].

À Burnsville (États-Unis, MN), des jardins de pluie expérimentaux ont été aménagés dans un quartier résidentiel afin de comparer l'impact du ruissellement avec un quartier similaire sans jardin pluvial. Le volume des eaux de ruissellement du quartier qui abritait les jardins de pluie s'est avéré de 90 % inférieur à celui de l'autre quartier[2].



L'apport des différents éléments végétalisés urbains à la gestion des eaux de ruissellement urbaines. Source : Isabelle Feix

(a) Période de retour : moyenne de la durée de l'intervalle séparant deux occurrences consécutives de l'évènement considéré (<http://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICTEMPS.HTM>) L'évènement peut être un évènement pluvieux, une crue (on parle aussi de « pointe de crue »), etc.

Des solutions alternatives à la gestion « tout tuyau » des eaux pluviales

La solution la plus courante (et coûteuse en infrastructures) pour gérer les eaux pluviales urbaines qui ruissellent consiste à les canaliser dans des caniveaux puis dans des conduites souterraines, de façon à les évacuer de la ville. Plutôt que cette gestion « tout tuyau », qui peut aggraver les inondations, il est préférable de favoriser l'infiltration sur place et/ou ralentir les écoulements (stockage et rétention de l'eau), notamment grâce aux solutions végétalisées précitées.



À l'échelle de bassins versants d'un quartier de Noisy-le-Grand (France, 93) combinant diverses techniques alternatives de gestion des eaux pluviales, il est observé un abattement de 40 à 50% du volume de ruissellement en comparaison avec une conception classique par réseau d'assainissement séparatif^[3].

LA NÉCESSITÉ D'UN ENSEMBLE D' ACTIONS COORDONNÉES

La limitation des inondations en ville passe par un ensemble d'actions coordonnées :

► à l'extérieur des villes, grâce à une gestion avisée des surfaces agricoles et forestières et des zones humides (maintien des haies, des prairies et des zones humides, mise en place de bandes enherbées, limitation du drainage, du labour ou des plantations dans le sens de la pente, couverture hivernale des sols cultivés, augmentation de la proportion de cultures hivernales dans les rotations ou à l'échelle du bassin versant, évitement des grandes coupes rases en forte pente, limitation de la compaction des sols en adaptant la pression des pneus et en gérant les itinéraires des véhicules dans les parcelles agricoles ou forestières) ;

► en zone urbaine et périurbaine, grâce à la limitation de l'imperméabilisation des sols agricoles, au maintien ou à la restauration des ripisylves (végétation abondante et variée qui borde les rivières), au maintien ou à la restauration des champs d'expansion des crues (comme les prairies inondables) qui freinent la vitesse du courant lors de crues, à la lutte contre le remblaiement des zones humides et la déconnexion des annexes fluviales (via le maintien ou la création de prairies humides et de marais avec des roselières) qui diminuent l'intensité des crues. De plus, les zones humides retournent une partie des précipitations dans l'atmosphère par évapotranspiration et facilitent la recharge des nappes souterraines par infiltration.

Des ouvrages complémentaires de prévention et de protection contre les crues peuvent aussi s'avérer nécessaires.



La zone inondable de la Bassée entre Nogent-sur-Seine et Bray-sur-Seine joue le rôle de zone d'expansion des crues de la Seine en amont de Paris. Remplacer cette infrastructure naturelle par un barrage d'écêtement des crues coûterait entre 100 et 300 M€^[8].



BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 6

- [1] Agences de l'Eau, MEEM (ex-MEDD) (2002) : *Les zones humides et la ressource en eau*. Etudes sur l'eau n°89. – Guide technique inter-agences. 297 p. http://www.eau-loire-bretagne.fr/espace_documentaire/documents_en_ligne/guides_zones_humides
- [2] BOUCHER I. (2010) : *La gestion durable des eaux de pluie, Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable*. Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, coll. « Planification territoriale et développement durable », 118 p.
- [3] BRESSY A. (2010) : *Flux de micropolluants dans les eaux de ruissellement urbaines. Effets de différents modes de gestion des eaux pluviales*. 332 p.
- [4] CAISSE D'ÉPARGNE / Fédération Nationale des Travaux Publics, (2004) : *Guide Environnement 2004-2005 – Prévenir les inondations : quels équipements, quels travaux ?* 34 p.
- [5] CEPRI (2014) : *Gérer les inondations par ruissellement pluvial*. Guide de sensibilisation. 92 p.
- [6] CHOCAT B. (2015) : *Faut-il infiltrer les eaux pluviales en villes ? Méli Mélo Démêlons les fils de l'eau*. GRAIE. 17 p.
- [7] DUNNETT N., CLAYDEN A. (2007) : *Les jardins et la pluie : gestion durable de l'eau de pluie dans les jardins et les espaces verts*, Éditions du Rouergue, 185 p.
- [8] EAUFRANCE. *Les zones humides – services de régulation*. Page mise à jour le 12/06/2014. <http://www.zones-humides.eaufrance.fr/interets/services-rendus/services-de-regulation>
- [9] LIVINGSTON E.H., McCARRON E. (1992): *Stormwater management : a guide for Floridians*. Florida Department of Environmental regulation, Tallahassee.
- [10] MEEM (ex-MEDD) (2004) : *Les inondations – Dossier d'information – Risques naturels majeurs*. 22 p.
- [11] MUSY M. (coord.) (2014) : *Une ville verte, les rôles du végétal en ville*. Ed. Quae. 196 p.
- [12] SAUVE A., GLATARD F., FAUCON P., DAMAS O. (2014) : *Aménagement et choix des végétaux des ouvrages de gestion des eaux pluviales de proximité. Rapport final*. ONEMA, Plante&Cité, ARRDHOR, GENIPLANT. 48 p.
- [13] Site de l'Association pour le Développement Opérationnel et la Promotion des Techniques Alternatives en matière d'eaux pluviales (ADOPTA). <http://www.adopta.fr>
- [14] Site du Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (GRAIE). <http://www.graie.org/graie/index.htm>





7 NATURE EN VILLE ET LUTTE CONTRE LA POLLUTION DE L'EAU

EN BREF

Les rendements sont variables selon les systèmes et la pollution est en partie déplacée.

Les sols, ainsi que les microorganismes et les plantes aquatiques ou terrestres, peuvent participer à limiter la contamination des eaux superficielles et souterraines par les villes (matières organiques, matières en suspension, azote, phosphore, éléments traces métalliques, hydrocarbures). Le procédé d'épuration des eaux usées domestiques utilise majoritairement le sol et les microorganismes qu'il renferme pour filtrer les eaux usées, éliminer les polluants puis évacuer les eaux usées traitées, et dans une moindre mesure les plantes aquatiques et les microorganismes associés pour consommer et éliminer les polluants. De plus, le procédé de traitement des eaux de ruissellement utilise le sol pour infiltrer les eaux (donc limiter le volume d'eaux ruisselées polluées parvenant au cours d'eau), le sol et les plantes pour décanter et filtrer ou piéger les particules chargées en polluants, et les microorganismes du sol pour dégrader les matières organiques. Ces dispositifs pouvant accumuler des polluants pour les sols, il convient de considérer les risques de transferts de contaminants des eaux vers les sols (notamment éléments traces métalliques, hydrocarbures). A l'inverse, la gestion des sols urbains pollués est essentielle pour prévenir une contamination de l'eau.

La ville est en partie responsable de la pollution des eaux

Les principaux polluants dans les eaux superficielles et souterraines

Ce sont les matières en suspension (MES), les matières organiques (dont les indicateurs sont la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biochimique en oxygène (DBO ou DBO5)), les composés azotés (N) et phosphorés (P), les sels, les éléments traces métalliques (ETM) et radioéléments, les polluants organiques, les microorganismes pathogènes et la pollution physico-chimique (pH, température...). Ces pollutions peuvent avoir des effets directs ou indirects sur la santé humaine et sur les écosystèmes aquatiques.

La contamination des eaux par les espaces urbanisés

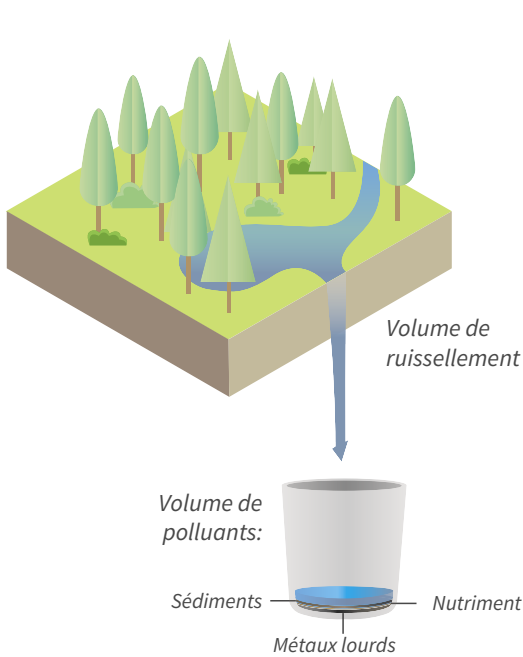
Dans un bassin versant urbanisé, les eaux souterraines et superficielles sont souvent contaminées. Les principaux mécanismes à l'origine de la contamination en milieu urbain sont :

- Le lessivage des surfaces imperméabilisées par les eaux de pluie, les eaux de ruissellement urbaines se chargeant le long de leur parcours au contact des toitures, caniveaux, chaussées, parkings, cours et canalisations.
- Les dysfonctionnements ou l'absence de collecte et/ou de traitement des eaux usées urbaines provoquant la contamination des eaux par des matières organiques, des micro-organismes pathogènes et divers composés chimiques (notamment N, P).
- L'infiltration d'eau dans les sols et le ruissellement d'eau à la surface, sur des terrains pollués (décharges, sites pollués...^(a)) ou des chantiers de construction, entraînant les polluants vers les eaux souterraines (sous forme dissoute essentiellement) et les eaux superficielles (sous formes particulaire et dissoute).
- L'utilisation de produits phytosanitaires, de biocides et de matières fertilisantes pour la gestion et l'entretien des voiries, espaces verts et jardins.

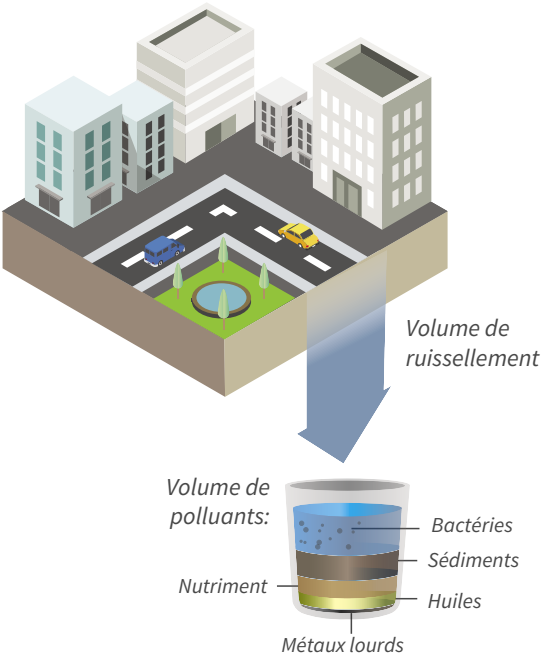
(a) Voir le chapitre 4 « Nature en ville et lutte contre la pollution des sols urbains ».

Volumes d'eau et volumes de polluants à l'exutoire des bassins versants selon l'occupation des sols et le taux d'imperméabilisation.
 Source : Boucher, 2010.

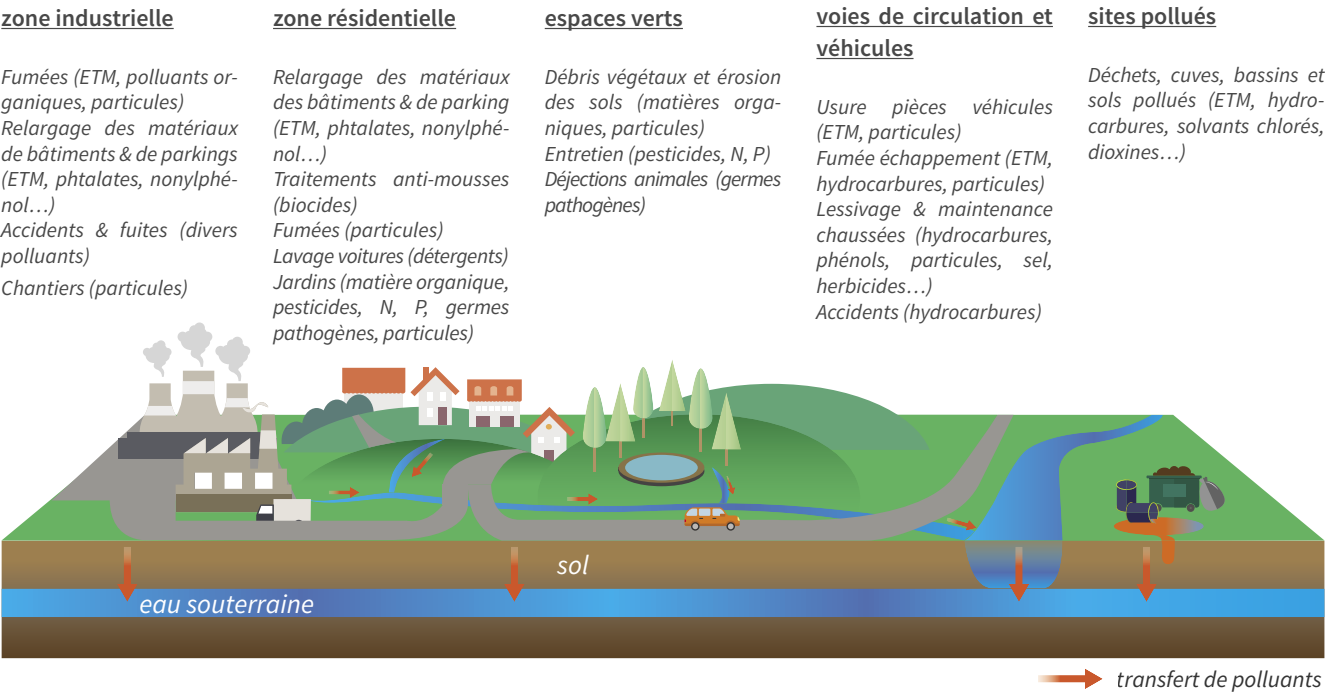
Milieu naturel



Milieu dense (10% de sols perméables)



Sources et voies de transferts de la contamination des eaux superficielles et souterraines dans un bassin versant urbanisé. Source : Isabelle Feix

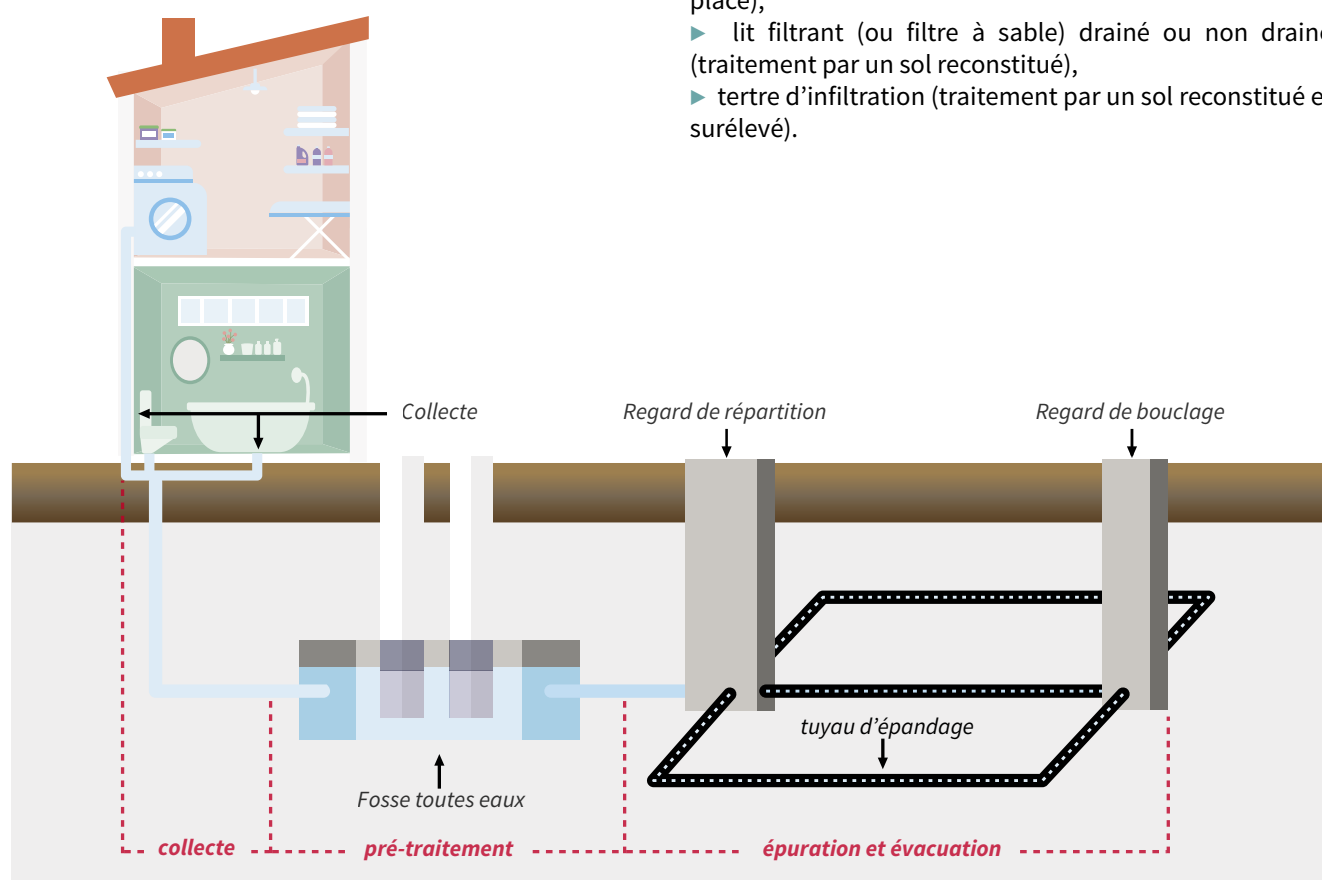


LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES DOMESTIQUES

Les systèmes d'assainissement non collectif (ANC) utilisent souvent le sol, voire les plantes, dans le traitement des eaux usées domestiques, surtout polluées en matières organiques, matières en suspension et en nutriments (azote et phosphore).

Dans les systèmes d'ANC classiques, les eaux usées sont collectées, puis dirigées vers l'installation où elles sont prétraitées pour éliminer les graisses et les particules solides, puis traitées (par infiltration des eaux usées dans le sol en place ou un sol reconstitué) pour éliminer la pollution (matières organiques, matières en suspension, nutriments), et enfin évacuées (généralement dans le sol). L'épuration résulte de la filtration physique qui s'opère en surface du sol et de l'action des microorganismes qui se développent au sein du sol (on parle du pouvoir épurateur du sol). Trois techniques sont fréquemment utilisées :

- ▶ tranchées ou lit d'épandage (traitement par le sol en place),
- ▶ lit filtrant (ou filtre à sable) drainé ou non drainé (traitement par un sol reconstitué),
- ▶ terre d'infiltration (traitement par un sol reconstitué et surélevé).

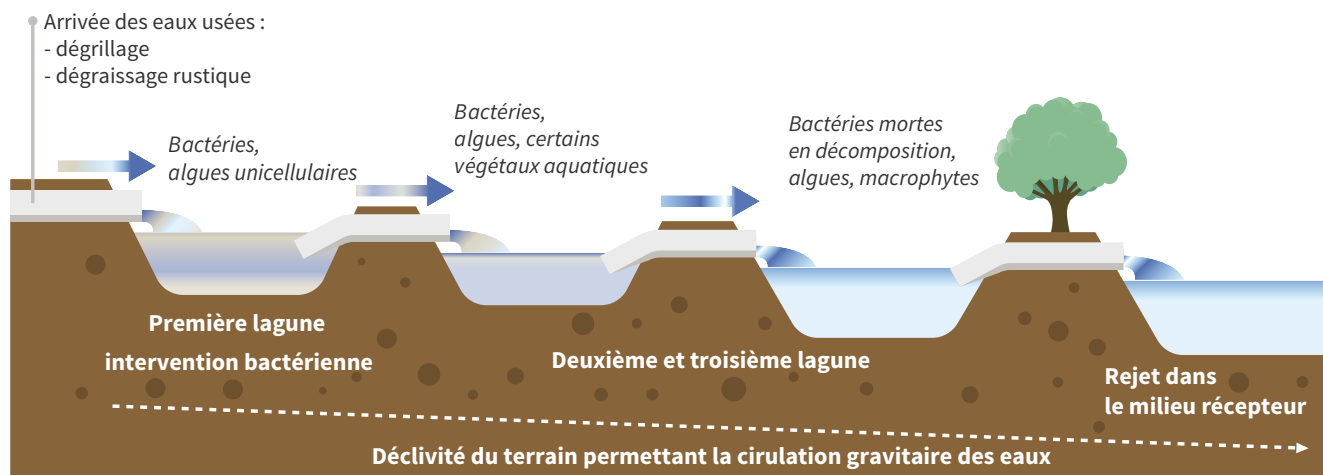


Système d'épuration à tranchée d'épandage. Source : <http://www.septiemecontinent.com/pedagogie/lesson/les-stations-depuration/>

Le lagunage, moins fréquent en France, est une technique de phytoépuration et utilise les plantes aquatiques et les microorganismes pour traiter les eaux usées des particuliers ou des petites collectivités. Les eaux usées circulent dans une série de bassins à ciel ouvert, peu profonds et peuplés de végétaux (joncs, roseaux, bambous, iris d'eau, massettes) avant d'être rejetées dans le milieu naturel. Les plantes consomment l'azote et le phosphore (qui sont pour elles des éléments nutritifs) et servent de support à de nombreux microorganismes (algues, bactéries) qui participent à

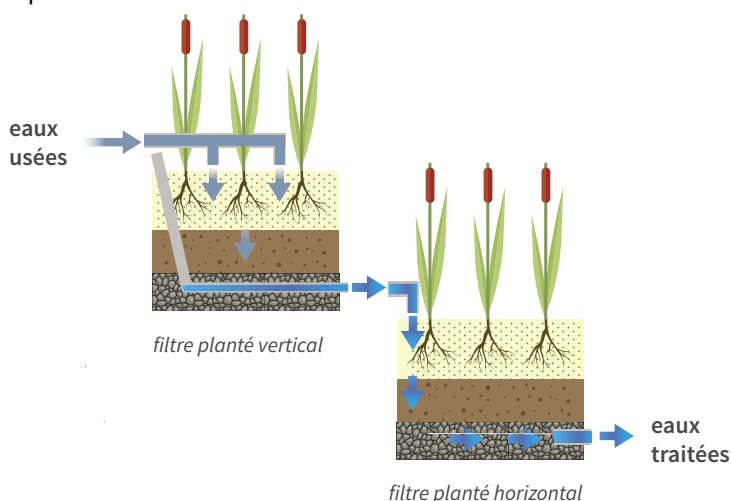
l'épuration en minéralisant la matière organique. Il existe plusieurs systèmes qui peuvent être associés pour de meilleures performances :

- ▶ lagune à microphytes (algues unicellulaires),
- ▶ lagune à macrophytes (roseaux ou autres plantes aquatiques vigoureuses)
- ▶ bassin de finition à hydrophytes (plantes poussant sous l'eau).



Les étapes de la phytoépuration par lagunage. Source : <http://www.septiemecontinent.com/pedagogie/lesson/les-stations-depuration/>

Le filtre planté de roseaux (ou lit à macrophytes) est une autre technique de phytoépuration et fonctionne de la même manière que la lagune à macrophytes. Il est composé d'un ou plusieurs étages contenant un massif filtrant (graviers et/ou sable en général) sur lequel les roseaux sont plantés.



Dispositif de phytoépuration par un filtre planté de roseaux. Sources : d'après [Cabrit-Leclerc S., Fosse septique, roseaux, bambous, traiter écologiquement ses eaux usées?] & [<http://wikiwater.fr/a17-les-divers-moyens-de.html>]

LE TRAITEMENT DES EAUX DE RUISSELLEMENT

Les eaux de ruissellement urbain sont chargées essentiellement en matières en suspension, en éléments traces métalliques et dans une moindre mesure en hydrocarbures et en matières organiques. La nature en ville permet non seulement de réguler les flux d'eau^(a), mais aussi de limiter la pollution des milieux aquatiques récepteurs. Les alternatives végétalisées à la gestion « tout tuyau » des eaux de ruissellement permettent en effet une décantation des particules chargées en polluants, la filtration et le piégeage des polluants au travers de massifs filtrants, voire la précipitation de certains ETM et la volatilisation ou la dégradation de certains polluants organiques.

Les toitures végétalisées retiennent les ETM, mais comme les eaux reçues sont généralement peu polluées (la charge polluante résulte essentiellement de la pollution atmosphérique), l'impact de cette

Le rendement épuratoire des traitements d'eaux usées domestiques est au maximum de 95% (MES et matière organique) dans le cas des lits plantés de roseaux et il est supérieur à 95% pour les procédés d'ANC à tranchée d'épandage.

Le rendement épuratoire des lits plantés de roseaux va de 65 à 98% pour l'azote et de 15 à 65% pour le phosphore.

Selon les techniques de traitement d'eaux pluviales (bande filtrante, noue végétalisée, fossé enherbé, filtre à roseaux, bassin de rétention ou d'infiltration), le rendement épuratoire varie de 50% à 95% pour les MES, de 40% à 91% pour les matières organiques, de 25% à 85% pour les nutriments (N et P), de 21% à 90% pour les ETM et de 50% à plus de 88% pour les hydrocarbures.

(a) Voir le chapitre 6 « Nature en ville et gestion des eaux pluviales et des inondations ».



solution sur la limitation de la pollution des eaux pluviales ruisselées à l'échelle de la ville est négligeable. Par ailleurs, les toitures végétalisées peuvent aussi être sources de polluants (matières organiques, phosphore, bactéries) dans l'eau ruisselée.

Les arbres urbains interceptent les polluants atmosphériques et accroissent l'infiltration de l'eau des sols environnants, ces derniers retenant les ETM.

Les jardins de pluie peuvent avoir un effet bénéfique pour la rétention des polluants présents dans les eaux de ruissellement, soit par simple phénomène de filtration de l'eau par le sol ou la plante, soit par phytoremédiation.

Les autres ouvrages d'infiltration (bassins, tranchées, noues) sont efficaces vis-à-vis de la rétention des ETM et des hydrocarbures (le sol^(a) jouant un rôle significatif dans la rétention), et préviennent la pollution des eaux souterraines et superficielles. Par contre, les contaminants s'accumulent progressivement dans les sols sous les ouvrages et pourraient être remobilisés, par exemple en présence de sels de déverglaçage en hiver^(b). Cela interroge le devenir des ouvrages quand le sol est pollué et pose la question du transfert de pollution entre compartiments de l'environnement. De plus, les sols s'enrichissent en matières organiques et en phosphore.

Les plantes à fort chevelu racinaire (arbres, plantes herbacées) peuvent être utilisées pour traiter les particules (MES) et certains contaminants chimiques (notamment ETM) des eaux de ruissellement. Il s'agit de la rhizofiltration. Les contaminants sont retenus à la surface des racines ou pénètrent dans les racines où ils sont stockés. Les plantes d'abord cultivées dans de l'eau non polluée sont transplantées dans des eaux polluées ; lorsque les racines deviennent saturées de polluants, on les récolte pour les remplacer par de nouvelles plantes. Cette solution est peu utilisée.


LES RISQUES DE TRANSFERT DE POLLUTION ENTRE COMPARTIMENTS DE L'ENVIRONNEMENT


Nombre d'ouvrages de traitement des eaux de ruissellement, pourtant efficaces, accumulent des polluants (éléments traces métalliques, polluants organiques persistants), dont une partie peut être remobilisée et relarguée dans les eaux lors d'événements particuliers. Il est probable également que les systèmes d'assainissement des eaux usées domestiques transfèrent, dans les sols, certains contaminants contenus dans les eaux domestiques (contaminants issus des résidus médicamenteux, des détergents, des produits de soin, etc.). Ceci interroge donc le devenir de ces systèmes et pose la question du transfert de pollution entre compartiments de l'environnement : en limitant la pollution des eaux, on pollue des sols.

D'autre part, si les sols contribuent à limiter la contamination de l'eau par les villes, les sols pollués peuvent au contraire contaminer l'eau. La gestion des sols urbains pollués et en particulier la remédiation, qui consiste à restaurer un sol pollué, est donc essentielle. La bioremédiation s'appuie sur l'activité d'organismes vivants. La phytoremédiation est une forme de bioremédiation qui utilise les plantes. En immobilisant, extrayant ou dégradant les contaminants des sols, la bioremédiation prévient ou limite le transfert des contaminants des sols vers les eaux superficielles ou souterraines^(c). En limitant la pollution des sols, on évite la pollution des eaux.

(a) Jusqu'à une profondeur de 1 m.

(b) L'utilisation de sel de déverglaçage (NaCl et CaCl₂, notamment) sur les chaussées engendre une augmentation de la force ionique des eaux, ce qui a pour effet de favoriser la mobilité des ETM contenus dans les sols lorsque les eaux s'y infiltrent.

 **Le suivi de 13 bassins d'infiltration (Est Lyonnais) montre que les ETM et les hydrocarbures ne sont quasiment jamais détectés dans les eaux souterraines à l'aplomb des bassins, quelle que soit la profondeur de la nappe (2 à 20 m).**

 **À l'échelle de bassins versants d'un quartier de Noisy-le-Grand (France, 93) combinant diverses techniques alternatives de gestion des eaux pluviales, il est observé une réduction de 20 à 80% de la masse polluante rejetée à l'exutoire (essentiellement liée à la réduction des volumes d'eaux arrivant à l'exutoire) en comparaison avec une conception classique par réseau d'assainissement séparatif.**

(c) Pour plus d'information sur la bioremédiation, voir le chapitre 4 « Nature en ville et lutte contre la pollution des sols urbains ».

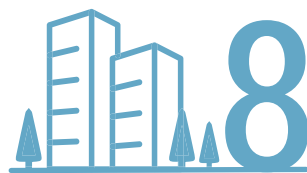


BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 7

- [1] AGENCE DE L'EAU SEINE-NORMANDIE (2013) : Outils de bonne gestion des eaux de ruissellement en zones urbaines. Document d'orientation pour une meilleure maîtrise des pollutions dès l'origine du ruissellement. Auteurs : Gromaire M.C., Veiga L., Grimaldi M., Aires N. 63 p.
- [2] AGENCE REGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT DE HAUTE-NORMANDIE (AREHN) (2002) : L'épuration des eaux usées par les plantes. Collection « connaître pour agir » n°26. 4 p.
- [3] ASSOCIATION REGIONALE DES SATESE DU BASSIN LOIRE-BRETAGNE, OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU (2008) : Étude 2008 - Filtres plantés de roseaux - Réalisation et fonctionnement dans le Morbihan.
- [4] BOUCHER I. (2010) : La gestion durable des eaux de pluie, Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable. Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, coll. « Planification territoriale et développement durable », 118 p.
- [5] BRESSY A. (2010) : Flux de micropolluants dans les eaux de ruissellement urbaines. Effets de différents modes de gestion des eaux pluviales.
- [6] BROWN W., SCHUELER T.R. (1997): Comparative pollutant removal capability of urban BMPs: a reanalysis. Watershed Protection Techniques, vol. 2, n°4, pp. 515-520.
- [7] DATRY T. (2003) : Urbanisation et qualité des nappes phréatiques- réponses des écosystèmes aquatiques souterrains aux pratiques d'infiltration d'eau pluviale. Thèse de doctorat, Université Lyon 1, 220 p.
- [8] DATRY T., MALARD F., GIBERT J. (2005): Response of invertebrate assemblages to increased groundwater recharge rates in a phreatic aquifer. Journal of The North Benthological Society, vol. 24, no 3, pp. 461-477.
- [9] GIROUD V., ESSER D., FOURNET L., DAVOLI F. (2007) : Les filtres plantés de roseaux pour le traitement des eaux pluviales : Notion d'efficacité, Congrès Novatech.
- [10] KARA KHALED M. (2011) : Etude d'un dispositif de dépollution des eaux pluviales en amont des réseaux d'assainissement : expérimentations et modélisation. Thèse de l'Université de Lille 1. 285 p.
- [11] LEROUX J., BALADÈS J.D. (1993) : La maîtrise des eaux pluviales. Des solutions « sans tuyau » dans l'agglomération de Bordeaux. Paris, les éditions du STU (service technique de l'urbanisme).
- [12] MOURA P. (2008) : Méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain. Thèse de l'INSA de Lyon.
- [13] RÉSEAU ASNC « Réseau Rhône Alpes des acteurs de l'ANC » – GRAIE (septembre 2011) : Retours d'expériences sur les filières de traitement d'assainissement non collectif – Version 1 – Document de travail évolutif. 57 p.
- [14] SIMPSON T., WEAMMERT S. (2009): Developing best management practice definitions and effectiveness estimates for nitrogen, phosphorus and sediment in the Chesapeake Bay watershed. BMP assessment: final report. University of Maryland/Mid-Atlantic Water Program.
- [15] VILLE DE CHICAGO (2003): A guide to stormwater best management practices, 32 pages. http://cityofchicago.org/dam/city/depts/doe/general/NaturalResourcesAndWaterConservation_PDFs/Water/guideToStormwaterBMP.pdf





NATURE EN VILLE ET CONFORT THERMIQUE ESTIVAL EN VILLE

[ZOOM SUR LES VÉGÉTAUX ET LES SOLS]

EN BREF

L'effet de la nature en ville repose sur la présence d'eau et dépend de plusieurs paramètres.

Les espaces de nature en ville contribuent à réduire la chaleur estivale par l'ombrage et l'augmentation de l'humidité relative de l'air, grâce au sol (évaporation) et aux plantes (transpiration), et dans une moindre mesure par la réflexion des rayons du soleil. Ces mécanismes contribuent à réduire les températures de surface et l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU).

Cependant, l'évapotranspiration repose sur un sol dont le volume et les propriétés permettent de stocker de l'eau, voire sur un apport en eau. L'efficacité dépend aussi des espèces végétales présentes, car certaines espèces, résistantes à la sécheresse, transpirent peu. La modification de l'écoulement de l'air par les végétaux peut contrecarrer ces effets positifs.

La contribution des espaces végétalisés au rafraîchissement des villes dépend de nombreux paramètres (climat, vents, morphologie urbaine, bâtiments, taux d'imperméabilisation, végétation, sol, type de dispositif, taille et emplacement des dispositifs végétalisés).

Les flux de chaleur

La chaleur provient de plusieurs sources : du rayonnement solaire, de différentes surfaces (sol, végétation, toits et murs) et des activités humaines.

Les surfaces absorbent la chaleur provenant d'une partie du [rayonnement solaire](#) (une autre partie est réfléchie) et la chaleur du [rayonnement infrarouge](#) (IR, chaleur en provenance de l'atmosphère). Ces surfaces émettent à leur tour une partie de la chaleur qu'elles ont absorbée (sous forme de rayonnement IR). Les activités humaines (circulation routière, climatisation en été et chauffage en hiver, certaines industries) émettent aussi de la chaleur.

La chaleur émise par [rayonnement solaire](#) est évacuée grâce à l'évaporation de l'eau et la transpiration des végétaux, mais aussi par les mouvements d'air.

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain

Un îlot de chaleur urbain désigne une différence de température de l'air entre une zone urbaine et les zones rurales voisines.

Il est notamment dû :

► à la forme urbaine : dimension, espacement des bâtiments (les rues canyons, étroites et bordées de hauts

immeubles, favorisent le piégeage du [rayonnement solaire](#) et du [rayonnement infrarouge](#) par réflexion entre les immeubles et limitent l'évacuation de la chaleur par les vents),

► à l'imperméabilisation des sols (voiries et bâtiments notamment), qui implique des matériaux (goudrons, béton, etc.) reflétant et absorbant les rayons du soleil et stockant la chaleur différemment d'un milieu naturel et qui diminue le stockage d'eau dans les sols et la présence de végétation, limitant donc les possibilités d'évapotranspiration,

► à la concentration de l'activité humaine source d'émission de chaleur.



Les températures en ville peuvent augmenter de 2°C à 12°C selon la densité de population[20].

L'effet d'îlot de chaleur urbain se marque surtout en fin d'après-midi et la nuit, lorsque les matériaux de construction et de revêtement de sol (béton, asphalte) relâchent la chaleur accumulée pendant la journée et que l'évapotranspiration des espaces végétalisés cesse. L'îlot de chaleur s'observe en particulier dans les centres villes, imperméabilisés et où les façades des immeubles participent aux échanges de rayonnement, et dans les rues canyons. Ce phénomène aggrave les épisodes de

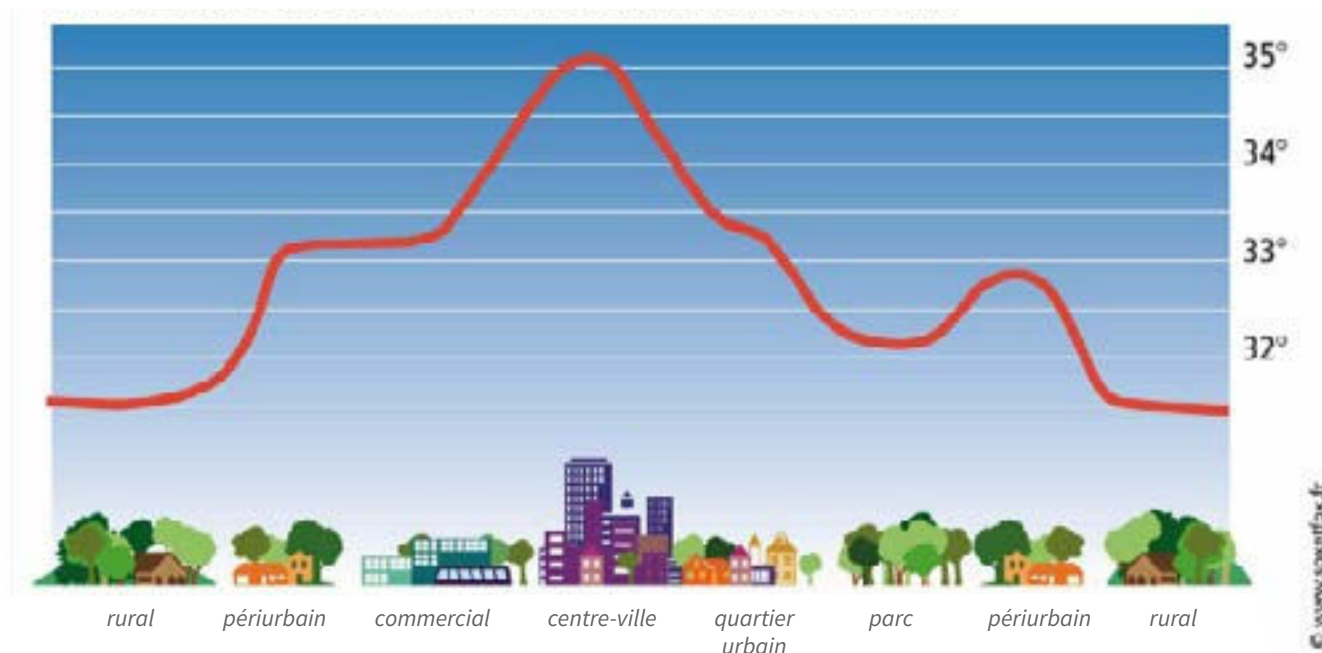
canicule. L'effet d'îlot de chaleur urbain diminue quand la vitesse du vent ou la couverture nuageuse augmentent ou en période pluvieuse.



Durant la canicule de 2003, un ICU apparaît en fin de nuit entre le centre de Paris et les zones rurales alentour, de l'ordre de 4 à 7°C et, dans Paris intra-muros, de 2 à 4°C.

Les projections climatiques prévoient une amplification du réchauffement climatique et une recrudescence d'événements extrêmes comme les canicules, potentiellement exacerbées en milieu urbain du fait du phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Profil thermique d'un îlot de chaleur urbain en fin d'après midi [1]



Les impacts des îlots de chaleur urbains sur la santé et l'environnement

Les îlots de chaleur ont des impacts avérés sur la santé humaine, soit directement (symptômes : inconfort, faiblesse, troubles de conscience, crampes et syncopes), soit via des maladies chroniques dont les effets sont exacerbés par la chaleur (diabète, insuffisance respiratoire, maladies cardio-vasculaires, neurologiques, cérébro-vasculaires ou rénales). De plus, la chaleur associée à la pollution atmosphérique a un effet délétère sur la santé (augmentation de la morbidité et de la mortalité associées aux maladies cardio-vasculaires et respiratoires, inflammation des voies respiratoires, diminution de la fonction respiratoire, retard de croissance intra-utérin, etc.). Des températures élevées (supérieures à 30°C) accroissent la formation d'ozone et de particules, nuisibles pour la santé. La présence simultanée de forts ICU et de pics de pollution atmosphérique présentera donc des impacts sanitaires d'autant plus importants. Concernant l'environnement, on peut noter que l'ozone

est aussi nuisible pour les plantes. Outre la dégradation de la qualité de l'air urbain, les îlots de chaleur ont également des impacts sur l'eau[14]. Les eaux de ruissellement s'échauffent sur les surfaces de sol imperméabilisées chaudes, augmentant *in fine* la température des rivières, des étangs et des lacs qu'elles rejoignent et entraînent donc des effets négatifs sur les écosystèmes aquatiques. Cette modification du microclimat peut donc affecter la biodiversité [2] aquatique et terrestre. Enfin, en entraînant des dépenses énergétiques supplémentaires pour la climatisation, les canicules provoquent une hausse des émissions de gaz à effet de serre.



**La canicule de l'été 2003 a entraîné en France :
► la mort supplémentaire de 20 000 personnes environ [21].**

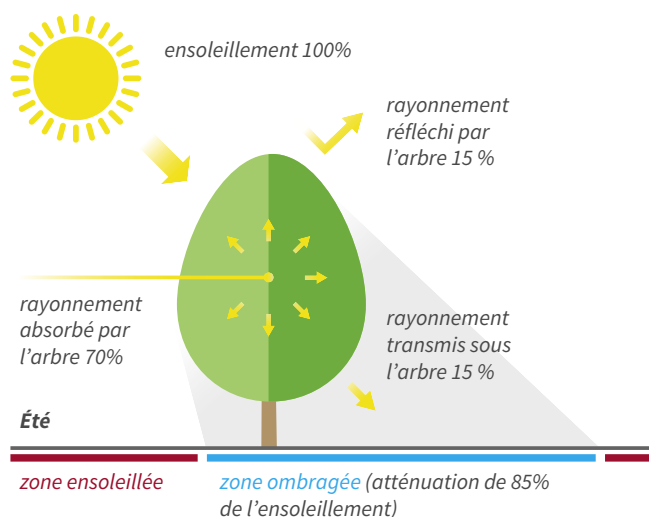
► la surconsommation d'énergie de 5 à 10 % (demande de froid pour réfrigérateurs, congélateurs, climatiseurs, ventilateurs et instruments industriels de refroidissement) [23].



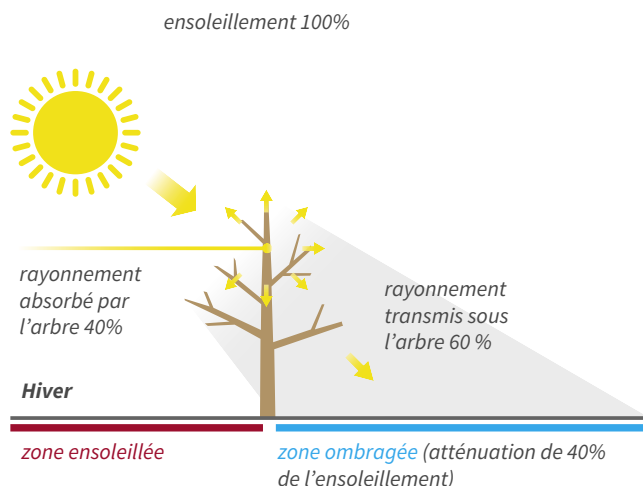
LE PHÉNOMÈNE DE RAFRAÎCHISSEMENT GRÂCE AUX ESPACES DE NATURE EN VILLE

En milieu urbain, les espaces verts (végétaux et sol ou substrat) contribuent à rafraîchir l'air ambiant par trois phénomènes : principalement l'interception du rayonnement solaire (ombrage) et l'évapotranspiration, et dans une moindre mesure, la réflexion des rayons solaires.

Effet d'ombrage par un arbre à feuillage caduc (Inspiré d'Akbari et al., 1992[4])



Dans les zones de stationnement, une voiture ombragée par la végétation a une température d'environ 7°C inférieure par rapport à une voiture exposée au soleil, tandis qu'un pavé asphalté est de 2 à 4°C plus frais à l'ombre qu'au soleil [18].



L'absorption et la réflexion des rayons solaires, l'ombrage

Les surfaces présentes en ville, composées de différents matériaux, n'ont pas les mêmes capacités d'absorption ou de réflexion des rayons solaires^(a). Une surface végétalisée (pelouse notamment) est plus réfléchissante que beaucoup de surfaces minéralisées (briques, pierres, goudron, asphalte et graviers), sauf si elles sont blanches.

La végétation absorbe et réfléchit une partie des rayons solaires et produit de l'ombre. Elle limite les rayons solaires reçus par le sol et le bâti et leur température de surface (évitant l'accumulation de chaleur et sa réémission nocturne). L'ombrage est important pour le confort thermique humain, d'autant plus dans une zone fortement ensoleillée et où les surfaces à protéger sont sombres. La fourniture d'eau aux arbres peut s'avérer nécessaire pour fournir de l'ombre, lorsque le stress hydrique réduit la densité du feuillage.

L'évaporation et la transpiration

Le rafraîchissement s'effectue par émission de vapeur d'eau qui résulte de deux mécanismes, dont la combinaison s'appelle l'évapotranspiration :

- l'évaporation (avec la chaleur, l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux)
- la transpiration (l'eau est éliminée par les feuilles sous forme de vapeur, les végétaux transpirant pour maintenir

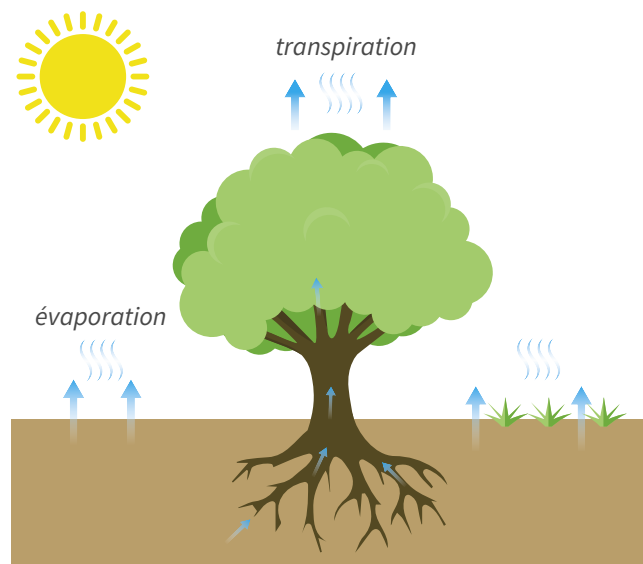
(a) La capacité de réflexion des rayonnements solaires correspond à l'albédo.

la température de leurs feuilles à des valeurs proches de la température de l'air).

L'eau retire la chaleur à l'air (chaleur sensible) pour passer à l'état gazeux (chaleur latente), elle réduit ainsi la température ambiante.

L'évaporation concerne l'eau contenue à la fois dans les sols et les points d'eau dans une ville (cours d'eau, lacs, étangs, bassins de rétention, grands jets d'eau, etc.).

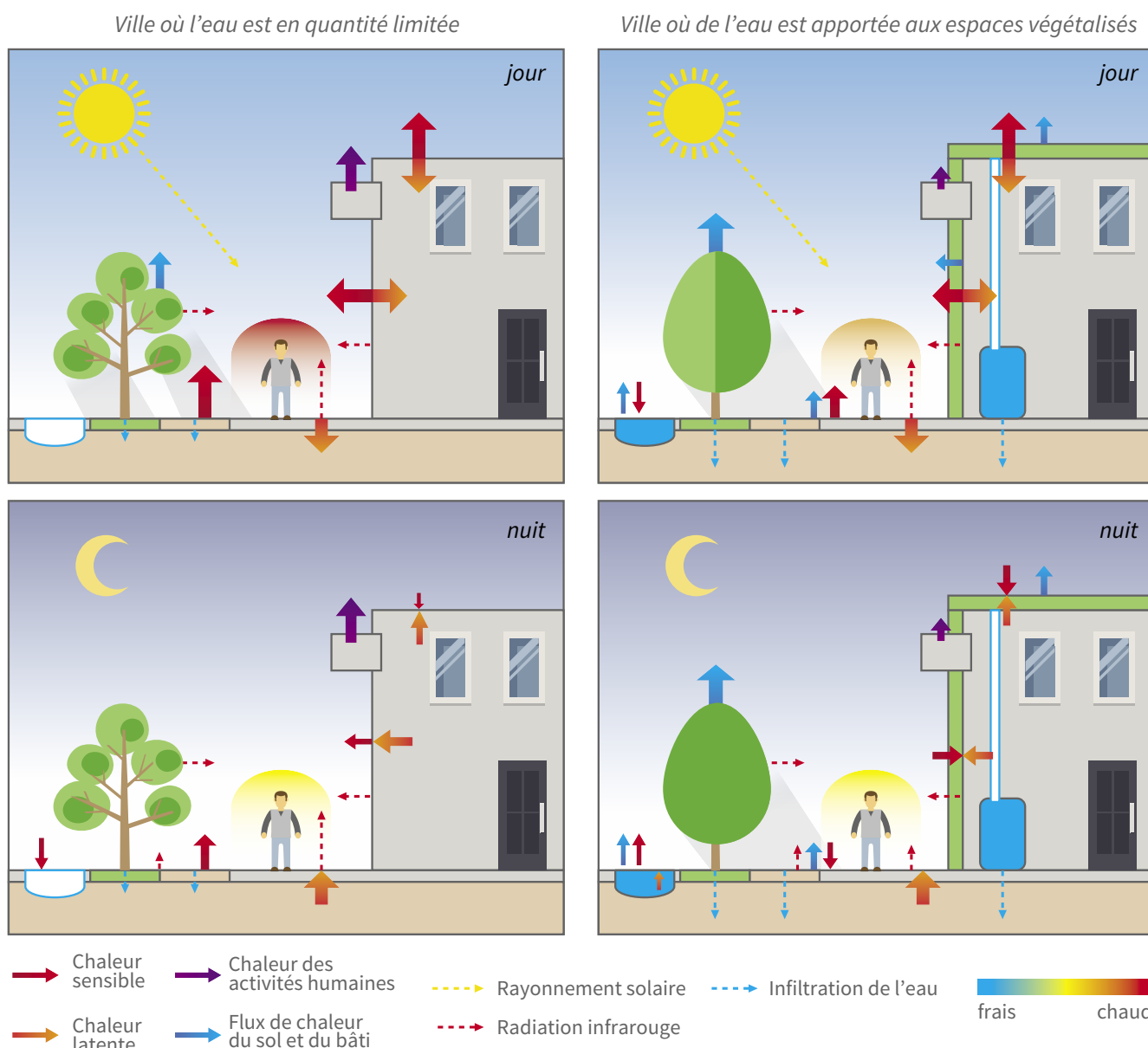
La transpiration est opérée par la végétation, surtout les arbres relativement aux plantes herbacées ou aux arbustes. Les toits végétalisés intensifs et les façades végétalisées irriguées peuvent aussi y contribuer. Les sols fournissent l'eau aux végétaux qui transpirent.



L'évapotranspiration

Le rafraîchissement par évapotranspiration n'est possible qu'en présence d'eau en quantité suffisante, ce qui peut être problématique dans des climats aux étés chauds et

secs. En complément, un apport d'eau aux végétaux et aux sols peut être nécessaire.



Les processus locaux du rafraîchissement urbain en été dans des villes. Source : Coutts et al., 2014 [9]

Le rafraîchissement apporté par la nature en ville dépend de nombreux facteurs :

- caractéristiques des végétaux (hauteur, densité de la végétation et du feuillage, feuilles caduques ou persistantes, âge),
- caractéristiques des sols, fosses de plantation des arbres, substrats des toitures végétalisées (surface, profondeur, capacité à retenir l'eau liée au taux d'imperméabilisation et au mode de gestion des eaux pluviales^(b)),
- position (distance par rapport aux zones à rafraîchir, emplacement par rapport aux écoulements de l'air ou par

rapport à l'ensoleillement),

- taille et densité des espaces verts et des étendues ou points d'eau,
- climat (températures, pluviométrie, etc. : plus le climat est chaud et sec, plus l'effet rafraîchissant est important, en climat humide le rafraîchissement par évapotranspiration est peu marqué), saison, force et direction des vents dominants,
- morphologie urbaine et caractéristiques des surfaces urbaines adjacentes (écoulement de l'air, albédo, porosité).

(b) Pour en savoir plus, voir le chapitre 6 « Nature en ville et gestion des eaux pluviales et des inondations ».



LES EFFETS DE DIFFÉRENTS TYPES D'ÉLÉMENTS PAYSAGERS VÉGÉTALISÉS

Les arbres et leur sol contribuent au rafraîchissement par évapotranspiration et ombrage.

Une limitation du rôle de l'arbre dans le rafraîchissement estival est le manque d'eau quand les étés sont chauds et secs (ex. en climat méditerranéen). Dans une telle situation, les arbres résistants à la sécheresse transpirent peu, afin de limiter leur perte d'eau et ne participent donc plus (ou faiblement) à l'évapotranspiration (sauf en cas d'apport d'eau). Ils pourront néanmoins continuer à contribuer au rafraîchissement via l'ombrage, essentiel pour le confort thermique de l'homme^(a) en climat ensoleillé.



L'écart de température de l'air à 1,20 m au-dessus de trottoirs recouverts d'asphalte, entre les rues sans et avec arbres, est de 0,7°C en moyenne, avec un maximum à 2°C, apportant un réel confort aux piétons [24].



Un arbre mature au sein d'une plantation d'arbres peut évaporer jusqu'à 450 L d'eau par jour, ce qui rafraîchit autant que 5 climatiseurs fonctionnant 20 h/j [16].



À l'intérieur de petits espaces arborés^(b), la différence de température avec les zones construites varie de 1,3°C à 4°C. Cet effet rafraîchissant (ombrage) est plus important dans les jardins arborés et plus faible dans les rues à fort trafic. Il se fait ressentir jusqu'à 100 m de distance (en moyenne 0,67°C à 60 m)^(c)[22].

L'emplacement des arbres est essentiel. La plantation de feuillus à proximité des espaces publics (à l'ouest, au sud ou au sud-ouest) permet de créer en été de l'air rafraîchi à travers la végétation (grâce à l'évapotranspiration), tout en protégeant des rayons du soleil (par ombrage), tandis qu'en hiver l'ensoleillement sera maximal après la tombée des feuilles.

Enfin, un arbre peut avoir deux effets opposés sur la chaleur urbaine : d'une part il baisse la température sous son couvert de plusieurs degrés dans la journée grâce à son ombrage, d'autre part il retient la chaleur au niveau du sol, en coupant le rayonnement IR vers le ciel, ce qui peut ralentir le rafraîchissement nocturne. L'effet de brise-vent des arbres peut aussi contrecarrer son effet rafraîchissant, en réduisant l'extraction de la chaleur des surfaces chauffées par le soleil[19]. Ces effets diffèrent selon la densité des arbres et de leur feuillage notamment.

Les sols et pelouses ont un effet difficile à évaluer sur la température de l'air, mais la température de ces surfaces est plus faible que celle des surfaces minérales, car les surfaces engazonnées reflètent plus la lumière et absorbent moins

de rayons solaires que la plupart des surfaces minéralisées urbaines. Les végétaux herbacés composant la pelouse évaporent peu d'eau, c'est essentiellement le sol (via l'évaporation de son eau) qui participe au rafraîchissement. Plus le sol est humide, plus il rafraîchit l'air en journée, mais plus il se refroidit lentement la nuit.



La température de l'air (à 1,20 m de la surface du sol) au-dessus d'une surface engazonnée dans un parc est de 2°C plus fraîche que la température au-dessus d'une surface en asphalte ou en béton située dans des zones commerciales ou de parking à proximité[6].

Les parcs ou zones vertes ont un effet sur le microclimat urbain qui varie fortement en fonction de nombreux paramètres (taille, position, stock d'eau des sols, densité de la végétation). L'intensité du rafraîchissement augmente avec la taille du parc. Un parc très arboré est plus frais l'après-midi (grâce à l'ombrage), tandis qu'un parc plus engazonné est plus frais la nuit. La circulation de l'air frais dégagé par les espaces verts est facilitée par la diversité de la végétation (pelouses, arbustes et arbres) et sa disposition. Les parcs rafraîchissent les rues avoisinantes placées à l'abri du vent[12]. De grands espaces végétalisés en amont des vents dominants rafraîchissent l'air en période estivale avant qu'il ne pénètre au sein de l'espace urbain. Cet effet est ressenti à une distance égale à la largeur du parc, et diminue rapidement lorsque la distance augmente. Il est influencé par la vitesse et la direction du vent, la hauteur et la largeur des bâtiments et la surface du feuillage du parc. Il est difficile de transposer les résultats de l'étude d'un parc dans une ville (forme urbaine et climat spécifiques) à un autre contexte[19].



À l'intérieur d'un parc, la différence de température par rapport aux zones construites est significative et varie notamment avec sa superficie : 2,5°C dans un parc de 20 ha à Valence (Espagne)[13] et 1°C dans un parc de 10 ha, 2°C dans un parc de 50 ha, 3°C dans un parc de 200 ha à Berlin (Allemagne)[25].

Les étendues et les points d'eau permettent de créer des microclimats et d'atténuer les variations de température. Par évaporation, ces dispositifs permettent de rafraîchir l'air ambiant, dans un périmètre proche.


Les toitures et les façades végétalisées, notamment la végétation grimpante, les façades végétalisées irriguées et les toitures végétalisées (surtout si le substrat est épais et que les végétaux sont grands) participent au rafraîchissement de l'air extérieur par évapotranspiration. Une condition essentielle est leur implantation sur de grandes surfaces.


(a) Le confort thermique dépend de l'exposition directe aux rayons du soleil (surtout), de l'humidité de l'air et du vent.

(b) Jardins, avenues, square, rues canyon, cours, dont la largeur varie de 20 à 60 m.


(c) En été en milieu de journée, à Tel-Aviv, Israël.

Les murs végétaux ont un effet rafraîchissant pour les piétons plus important que les toits végétalisés (surtout s'ils sont situés sur des immeubles hauts) dans les rues encaissées. Les toits végétalisés ont un impact au-delà des rues, et limitent l'îlot de chaleur, car ils permettent de réduire d'emblée la température de l'air qui entre dans les rues [5].

 **Les résultats de simulations de l'impact de différents scénarios d'adaptation de l'agglomération parisienne aux changements climatiques montrent que les toitures végétalisées n'ont soit aucun effet sur la température dans les rues au niveau des piétons, soit un effet faible (au mieux -0,5°C) quand elles sont arrosées[1].**


 **La végétalisation de 6% des toits de Toronto (Canada) entraînerait une baisse des températures en centre-ville de 1 à 2°C, réduisant de fait le phénomène l'ICU[7].**


Le rafraîchissement maximal de l'air est obtenu en végétalisant toits et murs [5].

 **La température dans des rues canyon, pendant le mois le plus chaud dans 9 villes dans le monde aux climats contrastés, peut être diminuée de 3,6°C à 11,3°C à l'heure la plus chaude et de 3°C à 9,1°C en moyenne sur la journée, grâce aux murs et toits végétalisés^(d) [5].**

LES EFFETS DES ESPACES DE NATURE EN VILLE À DIFFÉRENTES ÉCHELLES ET DANS DIFFÉRENTS CONTEXTES

L'effet rafraîchissant d'un élément végétalisé sur ses environs est localisé et du même ordre de grandeur que sa largeur.

 **Une bande de végétation d'une largeur de 50 à 100 m peut réduire de 3,5°C la température d'un quartier voisin, cet effet de fraîcheur pouvant être ressenti dans un rayon de 100 m[17].**

 **Un parc de 60 ha permet de réduire de 1,5°C la température de l'air dans une zone construite située à 1 km sous le vent^(e)[6].**


Des études à l'échelle de rues montrent que l'effet de rafraîchissement est d'autant plus important :

- que le taux de couverture végétale est important,
- que le verdissement est réalisé en pleine terre et que la proportion d'arbres est élevée[10 ; 11].

Les arbres sont efficaces dans les rues canyons orientées est-ouest et les rues larges et peu profondes ; les murs végétalisés le sont dans des rues canyons.

A l'échelle d'un quartier, la température de l'air est liée à la présence d'arbres. A l'échelle d'une ville, la végétation au sol (y compris les arbres) permet une diminution importante de températures dans les rues, sensible pour les piétons. Cependant, la présence d'eau dans le sol est indispensable à cette diminution des températures.

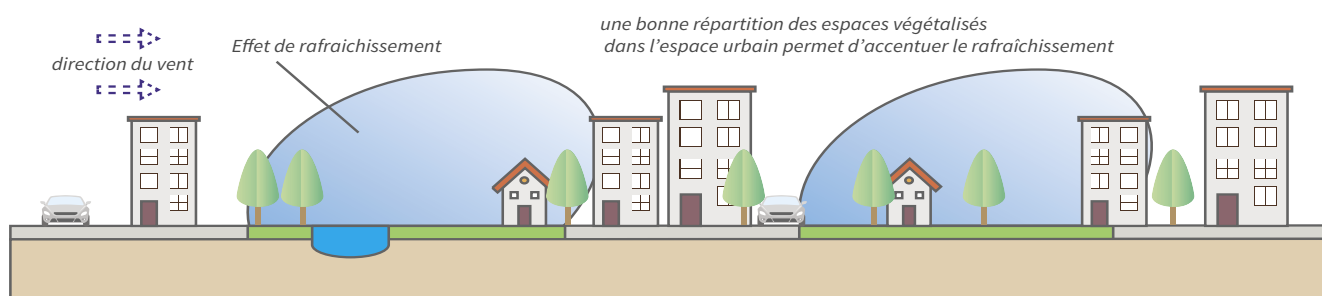
La végétalisation de grandes zones permet de rafraîchir les quartiers densément construits, à l'abri du vent, où la possibilité de végétaliser est limitée. De petits espaces végétalisés régulièrement répartis sont au moins aussi efficaces à l'échelle de la ville [15].

 **De petits espaces verts (0,1 ha), séparés d'intervalles suffisants (200 m) pourraient avoir une action rafraîchissante au moins aussi efficace que des grands parcs[15].**

(d) D'après les résultats d'une étude nord-américaine.

(e) Agglomération de Tokyo, Japon.





Rafraîchissement en lien avec la répartition des espaces végétalisés à l'échelle de la ville (d'après Coutts et al., 2014 [9])

Il ne s'agit pas de généraliser les résultats d'une étude ayant porté sur une ville particulière et d'appliquer des « recettes » simples. Les simulations grâce à des modèles scientifiques permettent néanmoins d'intégrer l'ensemble des facteurs et de simuler différents scénarios de rafraîchissement.

En savoir plus sur les pistes d'action des collectivités

► pour l'adaptation au changement climatique

La lutte contre le changement climatique suppose une stratégie coordonnée s'appuyant sur des mesures de réduction ou de compensation des émissions de gaz à effet de serre et des dispositions pour se préparer aux évolutions à venir. Les collectivités ont un rôle important à jouer, notamment au travers de la mise en œuvre de plans climat air énergie territoriaux. Ce recueil de 12 fiches a pour ambition de sensibiliser et accompagner les collectivités dans la construction d'une démarche d'adaptation au changement climatique.

Adaptation au changement climatique. 12 fiches pour agir dans les collectivités locales. ADEME 2012, 41p. <http://www.languedocroussillon.ademe.fr/sites/default/files/files/Mediatheque/Publications/fiches-adaptation-changement-climatique.pdf>



► pour lutter contre l'ICU

Le présent guide, à destination des collectivités locales et aménageurs, fait l'inventaire des mesures disponibles et recommandées pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain. Il a vocation à être approfondi grâce à un programme d'études et de recherches complémentaires sur le territoire afin d'améliorer la connaissance et la prise de décision dans ce domaine.

Guide de recommandation pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain à destination des collectivités territoriales, ADEME et Région Ile-de-France 2012 <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/dossiers/786-guide-lutte-icu.pdf>





BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 8

- [1] ADEME (2012) : *Adaptation au changement climatique. 12 fiches pour agir dans les collectivités locales*. 41p.
- [2] ADEME (2015) : *Ecosystèmes dans les territoires. Cahier technique de l'AEU2*, réf.7592.
- [3] 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. 69 p.
- [4] AKBARI H., DAVIS S., DORSANO S., HUANG J., WINNETT S. (ed.) (1992): *Cooling our communities. A guidebook on tree planting and light-colored surfacing*. EPA, Lawrence Berkeley National Laboratory. 246 p.
- [5] ALEXANDRI E., JONES P. (2008): *Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates*. Building and Environment, 43(4), pp. 480-493.
- [6] CA V.T., ASAEDA T., ABU E.M. (1998): *Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park*. Energy and Buildings, vol. 29, n° 1, pp. 83-92.
- [7] CNRC (Conseil National de recherches du Canada) en collaboration avec Environnement Canada (2002) : *Un projet pour quantifier les avantages des terrasses-jardins*. 7(1).
- [8] COLOMBERT M. (2008) : *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est. 538 p.
- [9] COUTTS A.M., TAPPER N.J., BERINGER J., LOUGHNAN M., DEMUZERE M. (2012): *Watering our cities: the capacity for water sensitive urban design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context*. Progress in Physical Geography (P), 37(1), pp. 2-28.
- [10] 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. 119 p.
- [11] DESPLAT J., KOUNKOU-ARNAUD R., LEMONSU A., MASSON V., SALAGNAC J. (2012) : *Étude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne* (projet EPICEA 2008-2012). Rapport final du projet. Octobre 2012.
- [12] DIMOUDI A., NIKOLOPOULOU M. (2003): *Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits*. Energy and buildings, 35(1), 69-76.
- [13] GOMEZ F., GAJA E., REIG A. (1998): *Vegetation and climatic changes in a city*. Ecological Engineering, vol. 10, n°4, pp. 355-360.
- [14] 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, pp. 163-172.
- [15] HONJO T., TAKAKURA T. (1990): *Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas*. Energy and Buildings, vol. 15, n°3-4, pp. 443-446.
- [16] JOHNSTON J., NEWTON J. (2004): *Building Green, a guide to using plants on roofs*. Walls and Pavements. Greater London Authority, vol. 121, 124 p.
- [17] LIÉBARD A., DEHERDE A. (2005) : *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Paris, Le Moniteur, 776 p.
- [18] McPHERSON E.G. (2001) : *Sacramento's parking lot shading ordinance: environmental and economic costs of compliance*. Landscape and Urban Planning, vol. 57, n° 2, pp. 105-123.
- [19] MUSY M. (coord.) (2014) : *Une ville verte. Les rôles du végétal en ville*. Éd. Quae, 200 p.
- [20] ONERC : FEVRIER E., VIGUIE V., HALLEGATTE S., GARNAUD B. (2010) : *Villes et adaptation au changement climatique*. 158 p.
- [21] ROBINE J.M., CHEUNG S.L.K., LE ROY S., VAN OYEN H., GRIFFITHS C., MICHEL J. P., HERRMANN F. R. (2008): *Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003*. Comptes rendus biologies, vol. 331, n°2, pp. 171-178.
- [22] 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, pp. 221-235.
- [23] SÉNAT (2004) : *La France et les Français face à la canicule : les leçons d'une crise*. Rapport d'information n° 195 (2003-2004) de Mme Valérie LÉTARD, MM. Hilaire FLANDRE et Serge LEPELTIER, fait au nom de la mission commune d'information, déposé le 3 février 2004. <http://www.senat.fr/rap/r03-195/r03-195.html>
- [24] VINET J. (2000) : *Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 250 p.
- [25] VON STÜLPNAGEL A. (1987): *Klimatische Veränderungen in Ballungsgebieten unter besonderer Berücksichtigung der Ausgleichswirkung von Grünflächen, dargestellt am Beispiel von Berlin-West*. PhD thesis, TU Berlin, Berlin, 173 p.





9 NATURE EN VILLE ET CONFORT THERMIQUE DANS LES BÂTIMENTS

EN BREF

L'effet repose sur la présence d'eau, des dispositifs et une végétation adaptée, et vient en complément d'une conception ou rénovation performante du bâti et adaptée à sa localisation.

Les toitures et façades végétalisées, les arbres, voire les pelouses, peuvent contribuer à rafraîchir des bâtiments en été, grâce à l'ombrage procuré par les façades végétalisées et par les arbres, à la présence d'eau dans le substrat des toitures voire de certaines façades végétalisées, et à l'évapotranspiration à proximité des bâtiments (arbres, pelouses, plantes grimpantes). En hiver, des arbres positionnés pour abriter des vents dominants et des toits et des murs végétalisés peuvent contribuer à réduire la vitesse du vent et ainsi limiter les pertes de chaleur de maisons individuelles exposées. Cependant, l'effet de rafraîchissement nécessite la présence d'eau, ce qui peut être problématique lors d'étés chauds et secs. En hiver, la végétalisation (sauf en cas de feuillage caduc) peut réduire les apports solaires.

L'effet de ces dispositifs se mesure par les consommations d'énergie nécessaires à assurer le confort thermique et visuel (rafraîchissement, chauffage, éclairage), à considérer dans un bilan énergétique annuel. Ces dispositifs viennent en complément des principes de construction et de rénovation (notamment isolation) et d'emplacement des bâtiments.

Les déterminants du confort thermique dans les bâtiments

Le confort thermique est déterminé par plusieurs paramètres, liés à la personne et à son environnement. L'environnement dépend particulièrement du climat : température des parois, rayonnement solaire, température ambiante, humidité de l'air (hygrométrie) et vitesse de l'air.

Le confort thermique à l'intérieur d'un bâtiment dépend de la manière dont le bâtiment est conçu et protégé de la chaleur ou du froid, des modes de ventilation, des systèmes énergétiques installés (rafraîchissement, chauffage, etc.), de l'utilisation du bâtiment (gestion des ouvrants), de sa forme et de son orientation et son emplacement (par rapport aux vents, à d'autres bâtiments...).

Les enjeux du maintien du confort thermique des bâtiments

Le maintien du confort thermique des bâtiments fait partie des postes les plus importants de consommation d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre en France. L'enjeu est donc d'assurer un confort thermique avec des solutions peu consommatrices de ressources et peu émettrices.



Pour le confort d'été, une température d'air entre 24°C et 27°C, un écart maximum de 7°C avec l'extérieur, et une humidité relative de 30 % à 70 % sont des valeurs satisfaisantes[1].



Quartier du Trapèze à Boulogne-Billancourt
© Arnaud Bouissou/MEEM-MLHD



Le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) est le plus gros consommateur d'énergie, tous secteurs économiques confondus en France (43 % de l'énergie finale).

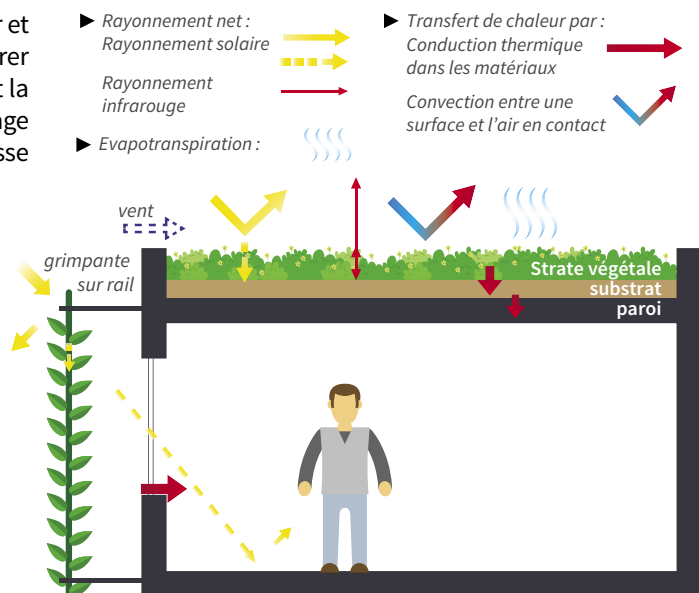
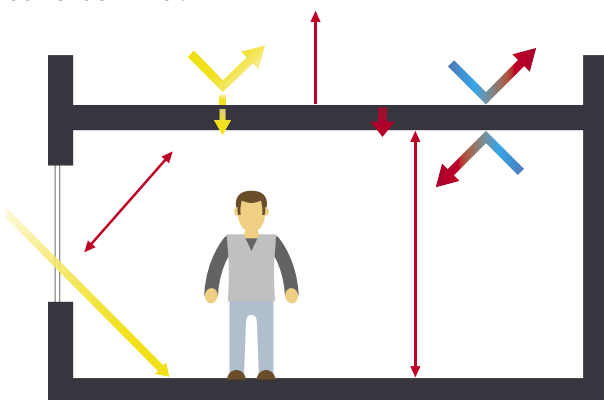
Les échanges de chaleur du bâtiment

Des échanges thermiques se produisent entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment, la chaleur se propageant du milieu chaud vers le milieu froid. En été, le bâtiment capte plus d'énergie qu'il n'en libère (augmentation de la température intérieure). En hiver, il libère plus d'énergie qu'il n'en capte (baisse de la température intérieure). Une partie des rayonnements solaires est réfléchi^(a) et une partie est absorbée par les surfaces du bâtiment (mur, toit), provoquant leur échauffement. Ces surfaces transmettent ensuite la chaleur par **conduction**^(b) vers l'intérieur et en émettent la nuit par **rayonnement infrarouge** (IR). Les vitrages laissent passer les rayons du

soleil mais limitent les échanges par rayonnement IR vers l'extérieur, entraînant un plus grand échauffement de l'intérieur^(c). Les surfaces bâties échangent la chaleur avec l'air extérieur par **convection**, le vent accélère cet échange (généralement il rafraîchit les surfaces échauffées). En hiver, l'infiltration d'air froid^(d) provoque des déperditions de chaleur et les surfaces du bâti (murs, toits), chauffés sur leur côté interne, perdent une partie de leur chaleur vers l'extérieur (déperditions conductives). En été, l'infiltration d'air chaud provoque le réchauffement de l'intérieur des bâtiments. L'isolation thermique^(e) et aux vents^(f) et l'inertie thermique^(g) permettent de maintenir une température à l'intérieur favorable au confort thermique des occupants, en y apportant le moins d'énergie^(h) possible.

LES PHÉNOMÈNES IMPLIQUANT LA VÉGÉTATION POUR L'AMÉLIORATION DU CONFORT THERMIQUE

Les **principaux phénomènes** impliquant la végétation sur et autour du bâti, le sol ou le substrat contribuant à améliorer le confort thermique des bâtiments sont : l'absorption et la réflexion d'une partie des rayonnements solaires, l'ombrage et l'évapotranspiration en été et la réduction de la vitesse du vent en hiver.



Effet de la végétalisation d'un bâtiment sur les échanges de chaleur (d'après Pommier et al., 2014[34])

Focus sur les façades et les toitures végétalisées

On distingue trois types de façades végétalisées:

- la façade recouverte de plantes grimpantes^(j) fixées directement sur le mur ou poussant sur un support (une treille par exemple) proche de celui-ci est la plus courante,
- le brise-soleil végétalisé où le support de la plante est écarté de la paroi ou de la fenêtre (exemple : pergola végétalisée, dispositifs verticaux avec pots),

- le mur végétal (mur vivant) qui consiste à créer un sol artificiel vertical comportant un substrat humide pour la végétation⁽ⁱ⁾, intégrant un arrosage et une distribution de nutriments automatiques.

On distingue deux types de toitures végétalisées :

- la toiture extensive est un tapis végétal (substrat de 4 à 15 cm d'épaisseur) demandant peu d'entretien, avec lequel seules certaines plantes sont compatibles,
- la toiture intensive dispose d'un substrat de plus de 30 cm d'épaisseur, son fonctionnement est similaire à celui d'un jardin, elle nécessite de l'entretien.

(a) Le pouvoir réfléchissant est appelé albédo.

(b) La conduction est le moyen par lequel la chaleur circule de proche en proche dans un matériau ou passe d'un corps à un autre en contact physique direct, par simple interaction moléculaire. Les molécules du secteur le plus chaud se heurtent vivement entre elles et transmettent leur énergie de vibration aux molécules voisines.

(c) Principe de l'effet de serre.

(d) Par les portes, les fenêtres ou les toits notamment.

(e) L'isolation thermique d'un bâtiment permet de diminuer les échanges

de chaleur entre l'intérieur du bâtiment et l'environnement extérieur, et ainsi diminuer les besoins de chauffage ou de climatisation.

(f) Étanchéité à l'air.

(g) L'inertie thermique est la capacité d'un matériau à stocker l'énergie thermique. Plus l'inertie est élevée et plus le matériau restitue des quantités de chaleur (ou de fraîcheur) en décalage par rapport aux variations thermiques extérieures.

(h) Climatisation, chauffage.

(i) Lierre, vigne vierge, glycine, clématite par exemple.

(j) Plantes herbacées et buissons.



Absorption et réflexion de rayonnements solaires, ombrage

Une surface végétalisée est plus réfléchissante que les surfaces minéralisées (briques, pierres, goudron, asphalte et graviers), sauf si elles sont blanches. Le feuillage (arbres, plantes grimpantes, brise-soleil et dans une moindre mesure plantes des toits et murs vivants) et le tronc des arbres, voire le substrat des murs vivants, absorbent^(a) et réfléchissent une partie des rayons solaires incidents et produisent de l'ombre^(b). Ils réduisent les rayons solaires qui entrent à l'intérieur des bâtiments par les fenêtres, ce qui limite l'échauffement direct de l'intérieur, dans le cas des arbres et des brise-soleil végétalisés. Ils réduisent aussi les rayons solaires reçus par les toits et murs du bâtiment d'une part, et par le sol autour du bâti (rue, cour) d'autre part, limitant l'échauffement de ces surfaces et de l'air au contact de ces surfaces, et par conséquent la quantité de chaleur susceptible de pénétrer dans les bâtiments, dans le cas des façades et toits végétalisés et des arbres. Les arbres interceptent aussi les rayons réémis par les surfaces au sol et les surfaces des bâtiments. En été, ces processus améliorent le confort thermique du bâtiment.



La température maximale des murs végétalisés est de 30 °C, alors que les murs classiques peuvent atteindre 60 °C en fonction du type de revêtement^[23]. Pour une journée ensoleillée, un toit de couleur foncée peut atteindre une température de 80°C, un toit blanc 45°C et un toit végétalisé 29°C (température proche de celle de l'air)^[14 ; 26].

Evapotranspiration

L'évapotranspiration est une émission de vapeur d'eau qui résulte de deux mécanismes :

- l'évaporation (avec la chaleur, l'eau contenue dans le sol ou le substrat^(c) passe de l'état liquide à l'état gazeux),
- la transpiration (l'eau est éliminée par les feuilles sous forme de vapeur, les végétaux – les arbres plus que les plantes herbacées et arbustes – transpirant pour maintenir la température de leurs feuilles à des valeurs proches de la température de l'air).

L'eau transformée en vapeur rafraîchit l'air ambiant^(d) aux abords et/ou à la surface des bâtiments en été (effet indirect) [2 ; 3], ce qui limite la quantité de chaleur susceptible de pénétrer dans les bâtiments^(e).

Abaissement de la vitesse du vent

En hiver, la végétation à feuillage persistant contribue à limiter les déperditions de chaleur à l'intérieur des bâtiments mal isolés : les arbres autour du bâti et les plantes grimpantes réduisent le taux d'infiltration de l'air extérieur froid et les échanges pertes de chaleur par convection du bâtiment vers l'air extérieur^(f).

(a) La végétation absorbe le rayonnement solaire incident pour sa croissance et son fonctionnement biologique.

(b) On parle de rôle d'écran solaire ou de protection solaire.

(c) Surtout dans le cas des toitures intensives et des murs vivants.

(d) L'eau, par son inertie thermique élevée, atténue les fluctuations de

D'autres phénomènes contribuent, dans une moindre mesure, à améliorer le confort thermique des bâtiments.

Ralentissement des écoulements d'air (en été)

Les arbres réduisent les infiltrations d'air chaud extérieur et les entrées de chaleur par convection dans le bâtiment aux heures les plus chaudes de la journée^[15].

Les façades constituées de plantes grimpant directement sur la paroi et les murs vivants limitent les échanges thermiques entre les parois du bâtiment et l'air extérieur, limitant ainsi le réchauffement des murs et de l'intérieur du bâtiment ^[33].

Inertie thermique, effet d'isolant thermique

Le mur vivant et le toit végétalisé intensif peuvent, grâce à l'eau contenue dans leur substrat, augmenter l'inertie thermique des parois et ainsi atténuer l'effet des canicules en été ^[31].

Le toit végétalisé peut, dans une moindre mesure, avoir un effet isolant thermique via la plaque de drainage et le substrat^[21 ; 31]. En créant une couche d'air entre la paroi et la végétation où l'écoulement de l'air est ralenti et où la température^[34] est intermédiaire^(g), les plantes grimpantes protègent la paroi des variations de température (en hiver le feuillage doit être persistant). Un substrat épais de murs vivants, de même que les cavités d'air entre la structure et la paroi du bâtiment de certains murs vivants modulaires, possèdent des propriétés isolantes^[10].

Le feuillage (arbres, toits ou façades végétalisés) réduit les pertes de chaleur par rayonnement IR, ce qui constitue un avantage en hiver^[31 ; 34]. La végétalisation des surfaces situées dans le voisinage d'un bâtiment (gazons au sol, végétalisation des bâtiments voisins) permet de limiter les flux de rayonnements IR émis vers le bâtiment en été^[28].

LES PHÉNOMÈNES IMPLIQUANT LA VÉGÉTATION DÉGRADANT LE CONFORT THERMIQUE

La végétation peut engendrer des effets négatifs sur le confort thermique et la consommation énergétique.

Réduction d'apport solaire en hiver

En réduisant l'apport solaire par ombrage, les arbres et les façades végétalisées peuvent accroître les besoins de chauffage et de lumière artificielle en hiver. Cela peut néanmoins être en partie évité en choisissant des plantes à feuillage caduc.

température en retirant la chaleur à l'air (chaleur sensible) pour passer à l'état gazeux (chaleur latente), elle réduit ainsi la température ambiante.

(e) Par convection.

(f) Effet brise-vent.

(g) Entre celle de la paroi et celle de l'air ambiant.

Blocage des rayonnements infra-rouge, abaissement de la vitesse du vent, inertie thermique, humidification de l'air en été

La végétation limite l'évacuation de la chaleur l'été (notamment la nuit) et augmente les besoins de ventilation artificielle :

- les arbres, façades ou toits végétalisés bloquent les rayonnements IR des surfaces du bâtiment,
- les arbres[15] et les façades végétalisées abaissent la vitesse du vent, ce qui réduit la ventilation naturelle du bâtiment et les transferts convectifs.

Les murs vivants diminuent le rafraîchissement nocturne en été, à cause de leur inertie thermique.

En augmentant l'humidité de l'air par évapotranspiration, la végétation augmente le besoin de climatisation pour déshumidifier l'air^(h).

Ces inconvénients sont à mettre en regard de la capacité de la végétation à améliorer le confort thermique, pour dresser un bilan global. Outre les écarts de température, le niveau de consommations énergétiques nécessaires à ce confort thermique (économies et surconsommations d'énergie engendrées) sont des indicateurs de l'impact des dispositifs végétalisés, à considérer dans le cadre plus large d'un bilan énergétique annuel.

DES FACTEURS MULTIPLES

La végétation (façades et toitures végétalisées, arbres, pelouse) et les sols (ou substrats) urbains peuvent avoir un effet sur le confort thermique dans les bâtiments. Il est cependant difficile de quantifier simplement et de façon généralisable les impacts des différents dispositifs. L'intensité de ces effets dépend de nombreux facteurs.

Certains facteurs sont liés à la végétation, aux sols, ou sont naturels :

- caractéristiques des végétaux (hauteur, densité de la végétation et du feuillage, taux de couverture de la végétation, feuilles caduques ou persistantes, couleur des feuilles, largeur de la couronne, physiologie, etc.),
- caractéristiques des sols ou substrats (surface, profondeur, capacité à retenir l'eau, densité, etc.),
- position des éléments végétalisés ou des végétaux (distance par rapport aux murs des bâtiments, emplacement entre le bâtiment et le soleil ou les vents dominants),
- climat, saison, direction des vents dominants.

A ces facteurs, il faut ajouter les facteurs liés à la gestion de l'eau (irrigation, arrosage).

L'environnement bâti et les bâtiments influent largement sur l'effet des dispositifs de végétalisation :

- construction (degré d'isolation, système de climatisation ou de rafraîchissement, surface de vitrage, forme, inclinaison des surfaces),
- utilisation (tertiaire, résidentiel),

(h) La consommation énergétique totale d'une installation de climatisation correspond à la somme de la consommation nécessaire pour abaisser la température de l'air (chaleur sensible) et celle nécessaire pour déshumidifier cet air (chaleur latente).

- insertion urbaine (densité, orientation des façades par rapport au soleil ou au vent) [31],
- morphologie urbaine et caractéristiques des surfaces urbaines adjacentes (albédo, porosité, etc.).

DIFFÉRENTES SOLUTIONS AUTOUR ET SUR LE BÂTI

Les effets des arbres urbains [2 ; 3]

En été, les arbres (situés au sud et/ou à l'ouest des bâtiments) offrent un ombrage aux bâtiments et au sol[13 ; 15 ; 16]. La taille, la forme de l'arbre, la densité de son feuillage et la densité de plantation sont déterminantes. L'effet est d'autant plus marqué que le bâtiment est bas (maison, immeuble bas) et mal isolé, qu'il offre une surface vitrée importante et que les étés sont longs et chauds. Lorsqu'un immeuble, dans une rue canyon, comporte beaucoup de vitrage, les arbres sont intéressants (plus que d'autres solutions végétalisées⁽ⁱ⁾ même quand il est bien isolé et autant qu'une enveloppe végétale sinon)[30].

En climat chaud, les arbres rafraîchissent les abords des bâtiments par l'évapotranspiration, à condition qu'ils disposent d'eau. Ils réduisent l'infiltration de l'air chaud (dans les bâtiments mal isolés) aux heures les plus chaudes, ce bénéfice étant minime en comparaison des autres phénomènes.

En climat tempéré ou froid, des arbres à feuillage persistant peuvent limiter la vitesse du vent aux abords des bâtiments en hiver et limiter les pertes de chaleur du bâtiment, s'ils sont bien positionnés. Cet effet est marqué pour un bâtiment mal isolé et exposé aux vents (dans un quartier peu densément construit par exemple)[15].

Cependant, en hiver en climat tempéré ou froid, ils masquent les rayons du soleil (plus rasants) et donc augmentent les besoins en chauffage[15], sauf en cas d'égagement, de houppier haut ou de feuillage caduc. De plus, lors d'étés chauds, les arbres peuvent freiner les brises rafraîchissantes (autour du bâtiment et par les fenêtres), si les arbres sont mal situés par rapport à ces brises[15], ou bloquer sous leur feuillage l'évacuation de la chaleur du bâtiment et/ou de ses environs vers le ciel plus frais la nuit. Enfin, l'évapotranspiration, en augmentant l'humidité de l'air, peut provoquer une légère augmentation du besoin de climatisation ou de ventilation artificielle.

En termes de facture énergétique annuelle (chauffage, climatisation, ventilation) pour des maisons ou des petits immeubles de bureaux, les dépenses supplémentaires sont généralement plus faibles que les économies ; la diminution de la facture annuelle étant plus marquée pour les bâtiments mal isolés et pour des climats chauds (désertique, méditerranéen, tropical ou subtropical) et peu marquée (dans certains cas la facture peut même augmenter) pour des climats tempérés ou continentaux[37]. Pour ces derniers climats, les économies d'énergie étant du même ordre de

(i) Murs et façades végétalisés, pelouse près du bâtiment.



grandeur que les surconsommations, le positionnement des arbres^(a) influencera beaucoup le bilan^[22]; et le type et le prix de l'énergie utilisée pour le chauffage^(b) et la climatisation^(c) influenceront la facture énergétique annuelle ^[4].

Q Dans le sud du Dakota (Etats-Unis), les maisons consomment 25% moins d'énergie lorsqu'elles sont situées sous des haies brise-vent que lorsqu'elles sont exposées en plein vent^[2].

Q En Ecosse, la simulation de l'effet brise-vent d'arbres autour d'un bâtiment de bureaux très vitré, ventilé naturellement et peu isolé au vent montre que les pertes de chaleur par infiltration sont réduites de 18% et que celles par convection sur les parois vitrées le sont de 8% ^[27].

Q La simulation d'une plantation de 4 arbres par bâtiment dans 3 villes des Etats-Unis^(d) (effets cumulés de l'ombrage et de l'évapotranspiration), réduit les factures énergétiques des habitations, bureaux et magasins (1,5 à 12,8 M\$ par an et par ville). Les effets négatifs des arbres (sur le chauffage en hiver) sont compensés par les effets positifs (sur la climatisation en été)^[24].



L'évapotranspiration d'après ^[25]

Les effets des façades végétalisées

En été, l'effet bénéfique direct de la végétalisation des façades des bâtiments est la réduction du rayonnement solaire sur ces façades^[28], cet effet étant marqué pour les façades densément végétalisées situées au sud et à l'ouest. L'effet indirect repose sur l'évapotranspiration du dispositif qui diminue la température ambiante et le rayonnement IR des surfaces exposées au soleil^[28].

L'intensité du rafraîchissement et les mécanismes impliqués varient avec les espèces végétales^[7] et le type de façade végétalisée. Les façades végétalisées sont particulièrement utiles sur de grands immeubles, car la surface des murs exposés au soleil est grande. Dans une rue canyon, la végétalisation d'une façade d'immeuble diminue les rayonnements vers le bâtiment en vis-à-vis^[34] et permet de limiter le recours à la climatisation^[30].

En hiver en climat froid et venté, la végétation améliore le confort thermique du bâtiment car elle fait obstacle au vent froid, et dans certains cas, crée une couche d'air isolante entre les feuilles et la façade (certaines plantes comme le lierre, en gardant les murs plus secs lors des périodes pluvieuses, renforce son caractère isolant^(e)). Ces effets sont d'autant plus marqués que le feuillage est dense et couvrant, et l'hiver froid, pluvieux et venteux^[8]. Lors des journées « chaudes » et ensoleillées

des intersaisons, l'effet de la végétation, tout en restant bénéfique, est moins marqué et variable (la végétation empêche les rayons solaires de réchauffer les murs mais évite en contrepartie un refroidissement important en début de soirée et la nuit^(f))^[8]. En climat méditerranéen, la végétalisation des façades peut améliorer le confort thermique du bâtiment et abaisser le besoin de chauffage pendant les périodes froides^(g)^[9]. Cet effet bénéfique est plus marqué quand le feuillage est peu dense et peu réfléchissant, le substrat peu humide (si mur vivant), les façades orientées au nord et dans une moindre mesure, à l'est et à l'ouest. La végétalisation de façades orientées au sud avec des végétaux au feuillage persistant ou avec murs vivants peut avoir l'effet inverse et engendrer des besoins supplémentaires de chauffage^[9].

Les effets bénéfiques des façades végétalisées sur le confort thermique des bâtiments en été sont parfois contrecarrés par des effets négatifs en hiver ou aux intersaisons. Les phénomènes sont complexes et de nombreux paramètres influencent ces effets. Des simulations grâce à des modèles scientifiques peuvent apporter des solutions en intégrant l'ensemble des facteurs pour optimiser le confort thermique sur l'année.

Q L'ombrage par des dispositifs brise-soleil végétalisés (vigne vierge, Angleterre) peut réduire de 4 à 6°C les températures à l'intérieur des bâtiments lors de pics de température estivaux^[17 ; 18].

(a) Par rapport au soleil et au vent.

(b) Électricité ou énergie fossile.

(c) Électricité provenant du nucléaire ou d'énergie fossile.

(d) Baton Rouge (LA), Sacramento (CA) et Salt Lake City (UT).

(e) Pour des bâtiments mal isolés et à condition que le système végétalisé permette la présence de poches d'air. L'eau étant un meilleur conducteur

que l'air, une couche d'air stagnante sous le feuillage sera moins isolante si elle est humide. Etude menée en Angleterre.

(f) Au moment des pics de demande d'énergie pour le chauffage des habitations.

(g) Périodes où il est nécessaire de chauffer le bâtiment (hiver, voire intersaisons). Etude menée au Portugal..



Pour des climats océanique et méditerranéen, en été, l'ajout d'un mur vivant à la paroi externe peut diminuer la température des pièces intérieures de 1,5 à 5°C et diminuer la consommation d'énergie pour la climatisation de 37 à 51%^(h)[12 ; 32].



Pour un climat tempéré, l'engazonnement des surfaces au sol et la végétalisation des murs d'un immeuble situé dans un grand ensemble réduisent de 50% la durée d'inconfort en été et la végétalisation de toutes les surfaces visibles depuis l'immeuble (engazonnement des surfaces au sol et végétalisation des murs des immeubles voisins) permet de la réduire de plus de 90%^(h)[28].

Les effets des toits végétalisés

L'effet des toitures végétalisées sur le confort thermique en été dépend largement de la quantité d'eau disponible dans le dispositif (évapotranspiration, inertie thermique), avec un avantage aux toitures intensives irriguées par rapport aux toitures extensives non irriguées. Les toits végétalisés offrent au bâtiment un écran au rayonnement solaire grâce à la végétation et au sol, et dans une moindre mesure un effet isolant grâce à la plaque de drainage de la toiture^[11]. Le substrat constitue aussi une couche isolante supplémentaire, l'effet augmentant avec son épaisseur^[34] et la présence de poches d'air^[35]. Cependant, ces effets, mis en évidence pour des maisons, semblent dans le cas d'immeubles localisés au dernier étage (ou deux derniers étages) et plus faibles aux étages inférieurs^[6 ; 28 ; 29]. Les toitures végétalisées ont un effet d'autant plus grand que les bâtiments sont peu isolés^[20].

L'avantage des toits végétalisés est qu'ils réduisent les besoins de climatisation en été sans modifier de façon notable les besoins de chauffage en hiver^[36].

LES DISPOSITIFS VÉGÉTALISÉS, INTÉRESSANTS MAIS PAS SUFFISANTS

Les dispositifs végétalisés montrent une bonne capacité à limiter l'inconfort thermique, en particulier dans les bâtiments peu isolés. Pour autant ils ne constituent qu'un complément à l'isolation thermique et à la conception bioclimatique des bâtiments.



Au nord du Portugal (climat supra-méditerranéen), la végétalisation des façades (de type brise soleil – dispositifs verticaux avec pots) permet de diminuer les besoins de chauffage de bâtiment sur la période d'octobre à mai, de 2 à 10% par rapport aux murs nus, selon le matériau utilisé pour les murs, le type de plante et l'humidité du substrat⁽ⁱ⁾[9].



La consommation annuelle de chauffage est peu affectée par la toiture végétalisée en climat tempéré, alors qu'en climat chaud elle augmente de 8 % et qu'en climat froid elle diminue de 8% ; inversement la consommation de climatisation diminue fortement en climat chaud (52%) et tempéré (98%)^[20].



À Paris, sur 10 ans de simulation (1999-2008), les toitures végétalisées permettraient d'économiser de l'énergie quelle que soit la saison (par rapport à la situation de référence)^[11] :

- 23 % (28 % si les toitures sont arrosées) en été,
- 4,5% en hiver.



Un toit végétalisé (sans irrigation) diminue la consommation d'énergie de maisons situées en climat méditerranéen par rapport à un toit non végétalisé : 2 à 7,8% pour des maisons bien isolées et 8,9 à 13,9% quand elles ne le sont pas^[38].



Un toit végétalisé extensif diminue de 38% et un toit végétalisé intensif de 47% la consommation d'énergie annuelle (climatisation et chauffage) nécessaire à la conservation de conditions de température constante d'un bâtiment situé au cœur de Montréal (Canada)^[19].



La charge de refroidissement^(j) (pendant le mois le plus chaud) de bâtiments situés dans des rues canyon et avec des climats contrastés peut être réduite de 64 à 100% grâce aux murs et toits végétalisés^(k)[5].

(h) Etudes menées en Grèce et France [12] ; et en Espagne [32].

(i) Résultats obtenus par simulation grâce à un modèle.

(j) La charge de refroidissement est la quantité de refroidissement qu'un climatiseur doit fournir pour maintenir des conditions de confort.

(k) Réduction pour Montréal (Canada), Athènes (Grèce), Pékin (Chine), Riyad (Arabie saoudite), Hong Kong (Chine), Bombay (Inde), Brasília (Brésil) ; mais aucun effet pour Londres (Royaume-Uni) et Moscou (Russie) car la climatisation n'était pas nécessaire.





BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 9

- [1] ADEME et Direction Générale de l'Action Sociale (DGAS) Sylviane ROGER (DGAS) et Michel Carré (ADEME) (dir.) (2009) : *Améliorer le confort d'été dans les établissements pour personnes âgées et handicapées*. Document rédigé par le cabinet d'études ALPHEEIS, accompagné de partenaires (RAEE, CETE Méditerranée, DRASS Rhône Alpes). réf. ADEME 6473. 60 p.
- [2] AKBARI H., DAVIS S., DORSANO S., HUANG J., WINNETT S. (ed.) (1992): *Cooling our communities. A guidebook on tree planting and light-colored surfacing*. EPA, Lawrence Berkeley National Laboratory. 246 p.
- [3] AKBARI H. (2002): *Shade trees reduce building energy use and CO2 emissions from power plants*. Environmental pollution, vol. 116, pp. S119-S126.
- [4] AKBARI H., KONOPACKI S. (2004): *Energy effects of heat-island reduction strategies in Toronto, Canada*. Energy, vol. 29, n°2, pp. 191-210.
- [5] ALEXANDRI E., JONES P. (2008): *Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates*. Building and Environment, 43(4), pp. 480-493.
- [6] BERARDI U. (2016): *The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits*. Energy and Buildings, 121, pp. 217-229.
- [7] CAMERON R.W., TAYLOR J.E., EMMETT M.R. (2014): *What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls*. Building and Environment, 73, pp. 198-207.
- [8] CAMERON R.W., TAYLOR J., EMMETT M. (2015): *A Hedera green façade - energy performance and saving under different maritime-temperate, winter weather conditions*. Building and Environment, 92, pp. 111-121.
- [9] CARLOS J.S. (2015): *Simulation assessment of living wall thermal performance in winter in the climate of Portugal*. Building Simulation, 8(1), pp. 3-11.
- [10] CHAROENKIT S., YIEMWATTANA S. (2016): *Living walls and their contribution to improved thermal comfort and carbon emission reduction: A review*. Building and Environment, 105, pp. 82-94.
- [11] 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. 119 p.
- [12] DJEDJIG R., BOZONNET E., BELARBI R. (2015): *Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program*. Energy and buildings, 86, pp. 93-103.
- [13] DONOVAN G.H., BUTRY D.T. (2009): *The value of shade: Estimating the effect of urban trees on summertime electricity use*. Energy and Buildings, 41(6), pp. 662-668.
- [14] FISCHETTI M. (2008): *Green roofs, living cover*. Scientific American, vol. 298, n° 5, pp. 104-105.
- [15] HUANG Y.J., AKBARI H., TAHA H. (1990): *The wind-shielding and shading effects of trees on residential heating and cooling requirements*. Applied Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of Calif., presented at the 1990 Winter ASHRAE meeting, Atlanta, GA, February 10-14, 1990, 9 p.
- [16] HUANG Y.J., AKBARI H., TAHA H., ROSENFELD A.H. (1987): *The potential of vegetation in reducing summer cooling loads in residential buildings*. Journal of climate and Applied Meteorology, 26(9), pp. 1103-1116.
- [17] IP K., LAM M., MILLER A. (2010): *Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy*. Building and Environment, vol. 45, n°1, pp. 81-88.
- [18] IP K., LAM M.H.Y., MILLER A. (2004): *Bioshaders for sustainable buildings*. In : CIB world building congress; May 2-7 2004. Toronto, Ontario, Canada. → Cité dans Ip et al., 2010
- [19] JACQUET S. (2011) : *Performance énergétique d'une toiture végétale au centre-ville de Montréal*. Résumé de mémoire, Centre d'Ecologie urbaine de Montréal. 48 p.
- [20] JAFFAL I., OULDBOUKHITINE S.E., BELARBI R. (2012): *A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance*. Renewable Energy, 43, pp. 157-164.
- [21] JIM C.Y., TSANG S.W. (2011): *Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of green roofs*. Energy and Buildings, 43(6), pp. 1341-1350.
- [22] JO H.K., MCPHERSON E.G. (2001): *Indirect carbon reduction by residential vegetation and planting strategies in Chicago, USA*. Journal of Environmental Management, vol. 61, n°2, pp. 165-177.
- [23] KINGSBURY N., DUNNETT N. (2008): *Planting green roofs and living walls*. 2nd Ed., Tim Press, 336 p.
- [24] KONOPACKI S., AKBARI H. (2000): *Energy savings calculations for urban heat island reduction strategies in Baton Rouge, Sacramento and Salt Lake City*. Proceedings of the 2000 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, vol. 9, Pacific Grove (CA), p. 215.
- [25] LESSARD G., BOULFROY E. (2008) : *Les rôles de l'arbre en ville*. Centre collégial de transfert de technologie en foresterie de Sainte-Foy (CERFO). Québec, 21 p.
- [26] LIU K.K.Y., BASS B. (2005): *Performance of green roof systems*. National Research Council Canada, Ottawa, NRCC-47705, 18 p.
- [27] LIU Y., HARRIS D.J. (2008): *Effects of shelterbelt trees on reducing heating-energy consumption of office buildings in Scotland*. Applied Energy, 85(2), pp. 115-127.
- [28] MALYS L., MUSY M., INARD C. (2016): *Direct and Indirect Impacts of Vegetation on Building Comfort: A Comparative Study of Lawns, Green Walls and Green Roofs*. Energies, 9(32), 20 p.
- [29] MARTENS R., BASS B., ALCAZAR S.S. (2008): *Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance*. Urban Ecosystems, 11(4), 399-408.

- [30] MORILLE B., MUSY M., MALYS L. (2016): *Preliminary study of the impact of urban greenery types on energy consumption of building at a district scale: Academic study on a canyon street in Nantes (France) weather conditions*. Energy and Buildings, 114, pp. 275-282.
- [31] MUSY M. (coord.) (2014) : *Une ville verte. Les rôles du végétal en ville*, éd. Quae, 200 p.
- [32] OLIVIERI F., OLIVIERI L., NEILA J. (2014): *Experimental study of the thermal-energy performance of an insulated vegetal façade under summer conditions in a continental mediterranean climate*. Building and Environment, 77, pp. 61-76.
- [33] PERINI K., OTTELÉ M., FRAAIJ A.L.A., HAAS E.M., RAITERI R. (2011): *Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope*. Building and Environment, vol. 46, n°11, pp. 2287-2294.
- [34] POMMIER G., PROVENDIER D., GUTLEBEN C., MUSY M. (2014) : *Impacts du végétal en ville. Fiches de synthèse. Programme de recherche VegDUD – Rôle du végétal dans le développement urbain durable*. Plante & Cité. 61 p.
- [35] SAADATIAN O., SOPIAN K., LIM C.H., RIFFAT S., SAADATIAN E., TOUDESCHI A., SULAIMAN M.Y. (2013): *A review of energy aspects of green roofs*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, pp. 155-168.
- [36] SANTAMOURIS M., PAVLOU C., DOUKAS P., MIHALAKAKOU G., SYNNEFA A., HATZIBIROU A., PATARGIAS P. (2007): *Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece*. Energy, 32(9), pp. 1781-1788.
- [37] TAHA H., KONOPACKI S., GABERSEK S. (1996): *Modeling the meteorological and energy effects of urban heat islands and their mitigation : a 10-region study* (report n° LBNL-38667). Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA. → Cité dans Akbari (2002)
- [38] ZINZI M., AGNOLI S. (2012): *Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region*. Energy and Buildings, vol. 55, pp. 66-76.



10 NATURE EN VILLE ET LIMITATION DE LA CONCENTRATION EN GAZ À EFFET DE SERRE [ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE]

EN BREF

Le stockage de carbone par la nature en ville ne suffit pas à compenser l'ensemble des émissions de GES d'une ville ; au-delà du stockage de carbone, il faut considérer le bilan de l'ensemble des GES, y compris les émissions évitées.

Les végétaux (en particulier les arbres) et les sols en ville participent à la limitation de la concentration en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, car ils permettent de réduire la consommation d'énergie pour le confort thermique dans les bâtiments^(a) et stockent du carbone. Néanmoins, le stockage atteint un maximum en quelques décennies et il est variable en fonction du climat, des végétaux, des sols et des pratiques d'entretien. Les choix d'urbanisation et le changement d'occupation des sols à l'échelle du territoire modifient les capacités de stockage de carbone. Les gains représentés par le stockage de carbone par les espaces végétalisés, bien que non négligeables, ne permettent pas toujours de compenser les émissions de GES liées aux activités humaines, depuis les pratiques de jardinage à l'échelle de la parcelle et jusqu'au transport, au chauffage et à la climatisation à l'échelle d'une ville ou d'une agglomération. Pour une vision globale, un bilan sur l'ensemble des GES est nécessaire : la limitation de la concentration en GES dans l'atmosphère par les espaces végétalisés est due à la fois au stockage de carbone et aux émissions de GES évitées.

Les gaz à effet de serre : les enjeux^[13]

L'effet de serre est un phénomène naturel important. Il permet d'avoir une température moyenne sur Terre de 15°C contre -18°C si cet effet n'existait pas. Les gaz à effet de serre (GES) sont naturellement peu abondants dans l'atmosphère. Toutefois, du fait de l'activité humaine, la concentration de ces gaz a sensiblement augmenté (les concentrations atmosphériques en CO₂ ont augmenté de 40% et celles de CH₄ de plus de 150% depuis le XIX^{ème} siècle^(b)), contribuant au réchauffement de la surface terrestre et plus généralement aux changements climatiques :

- Augmentation de la température moyenne planétaire pouvant aller jusqu'à 5,3 °C au cours du XXI^{ème} siècle si nous ne maîtrisons pas nos émissions de GES.
- Événements météorologiques extrêmes plus nombreux : vagues de chaleur, submersions marines, sécheresses des sols.
- Écosystèmes perturbés : 20 à 30 % des espèces animales et végétales menacées d'extinction.
- Productions agricoles en baisse dans de nombreuses parties du globe.
- Risques sanitaires accrus, notamment en raison de l'avancée d'insectes vecteurs de maladies.
- Montée du niveau des océans, réchauffement et acidification des eaux.

Stocks, réservoirs, séquestration : définitions

Le **stock** de carbone désigne la quantité de carbone contenue dans un réservoir à un moment donné. Par exemple, pour la forêt, il s'agit de la quantité de carbone stockée dans l'écosystème forestier mondial, principalement dans les arbres vivants et le sol, et dans une moindre mesure, dans le bois mort et la litière^(c).

Le **réservoir** de carbone désigne tout système ayant la capacité d'accumuler ou de libérer du carbone. Un réservoir est un contenant, le stock est le contenu. Un réservoir peut être un puits ou une source de carbone.

La **séquestration** (ou stockage) de carbone désigne les processus extrayant le carbone (ou le CO₂) de l'atmosphère ou de l'eau et le fixant (sous forme de matière organique ou de carbonates) dans un réservoir terrestre ou marin. Les processus peuvent être naturels (par exemple : photosynthèse, précipitation) ou artificiels.

(a) Pour plus d'information, voir le chapitre 9 « Nature en ville et confort thermique dans les bâtiments ».

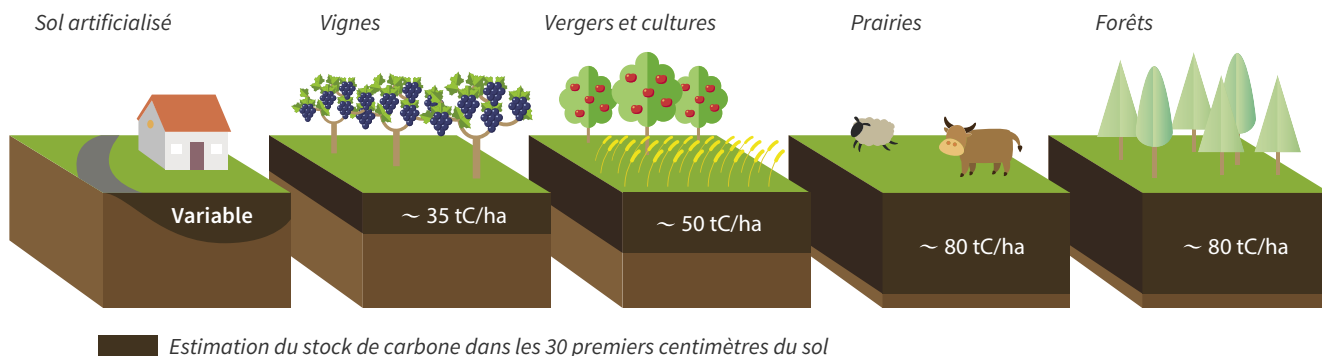
(b) <http://www.developpement-durable.gouv.fr/causes-effets-et-enjeux-du-changement-climatique>

(c) La litière désigne l'ensemble de feuilles mortes et débris végétaux en décomposition qui recouvrent le sol (des forêts, jardins, sols plantés de haies, etc.).

Les stocks de carbone dans les écosystèmes terrestres

Les stocks de carbone dans les écosystèmes terrestres se répartissent entre les sols (en majorité), la litière (en faible proportion) et la végétation. Ils varient avec l'occupation des sols et le climat.

Variation des stocks de carbone organique selon l'affectation des sols en France. Source : ADEME, 2014[1]



La séquestration de carbone par les écosystèmes terrestres

L'atmosphère échange en permanence du carbone avec les écosystèmes terrestres. Grâce à la photosynthèse, la végétation puise le carbone (C) de l'atmosphère (sous forme de CO_2). Une grande partie de ce carbone est rendue à l'atmosphère (sous forme aussi de CO_2) via la respiration des plantes et une petite partie est stockée dans ses tissus (sous forme de matière organique vivante^(d)).

A la mort des plantes ou de certains de leurs organes (feuilles, racines, branches, brindilles), la matière organique « fraîche » est dégradée et incorporée dans les sols :

- Une partie de ce carbone repart à l'atmosphère via la respiration des organismes du sol (sous forme de CO_2), qui utilisent la matière organique pour leur métabolisme^(e);
- Une partie est transformée en matière organique plus ou moins évoluée et stable dans les sols (les formes les plus stables sont communément appelées « humus »). Ce processus correspond à la **séquestration** de carbone par les sols.

L'évolution du stock de carbone organique dans les sols résulte de l'équilibre entre les apports de matières

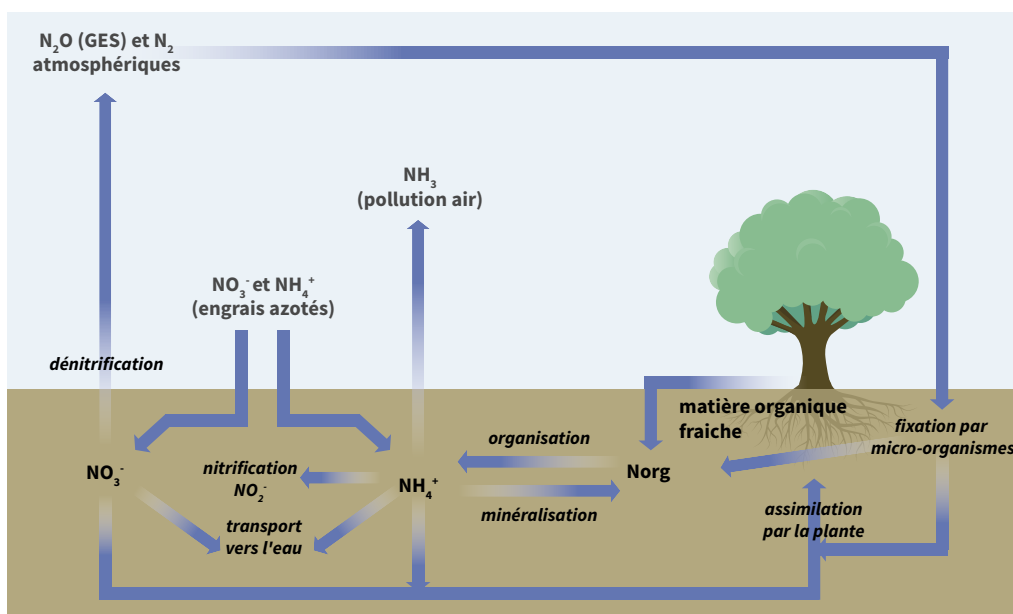
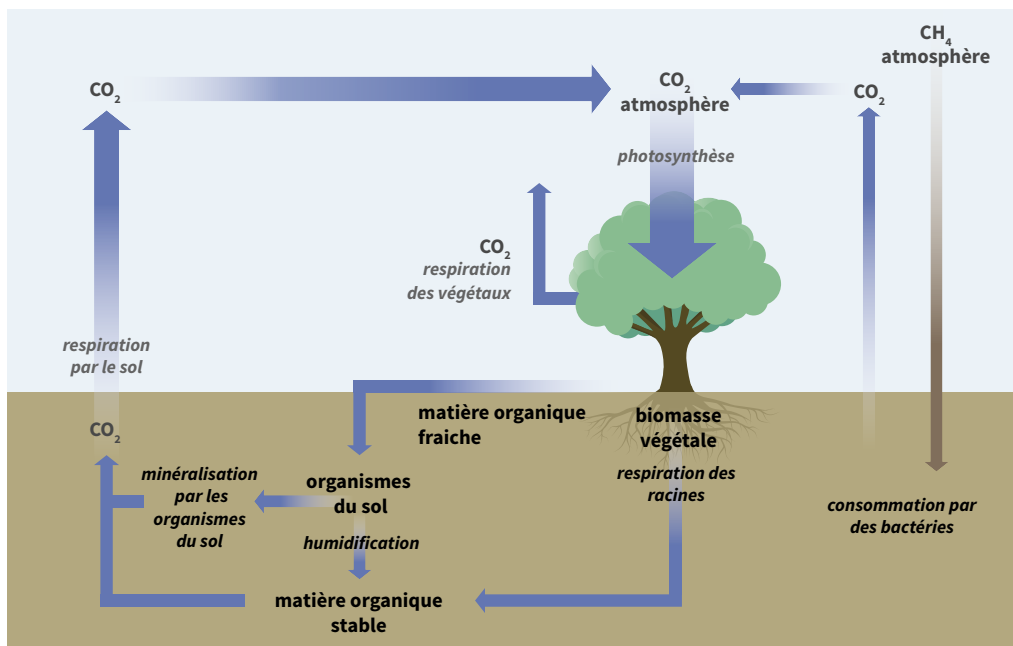
organiques au sol et leur minéralisation par les organismes du sol. A l'échelle de la planète, les écosystèmes terrestres (végétaux et sols) constituent un puits de carbone, freinant ainsi l'augmentation de la concentration en CO_2 de l'atmosphère.

Le sol émet ou consomme d'autres gaz à effet de serre

Les sols jouent aussi un rôle important sur les flux de deux autres gaz à effet de serre : le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O), dont les pouvoirs de réchauffement global à 100 ans sont respectivement de 28 et 265 fois celui du CO_2 . Leurs émissions sont liées à l'activité microbienne des sols, et favorisées par des conditions anoxiques (sans oxygène) pour le méthane et l'apport d'azote (engrais, dépôts atmosphériques) sur des sols humides pour le N_2O [10]. Si les sols émettent localement du CH_4 , ils constituent néanmoins le plus grand puits terrestre naturel du CH_4 au niveau mondial, notamment les sols forestiers bien drainés, car le CH_4 est, pour certaines bactéries, une source d'énergie et de carbone (matière organique)[9].

(d) On parle aussi de biomasse végétale.

(e) On parle aussi de minéralisation.



Les cycles simplifiés du carbone et de l'azote dans les écosystèmes terrestres. Source : ADEME

L'IMPORTANCE DU CHOIX DES VÉGÉTAUX ET DES MODES DE GESTION À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE

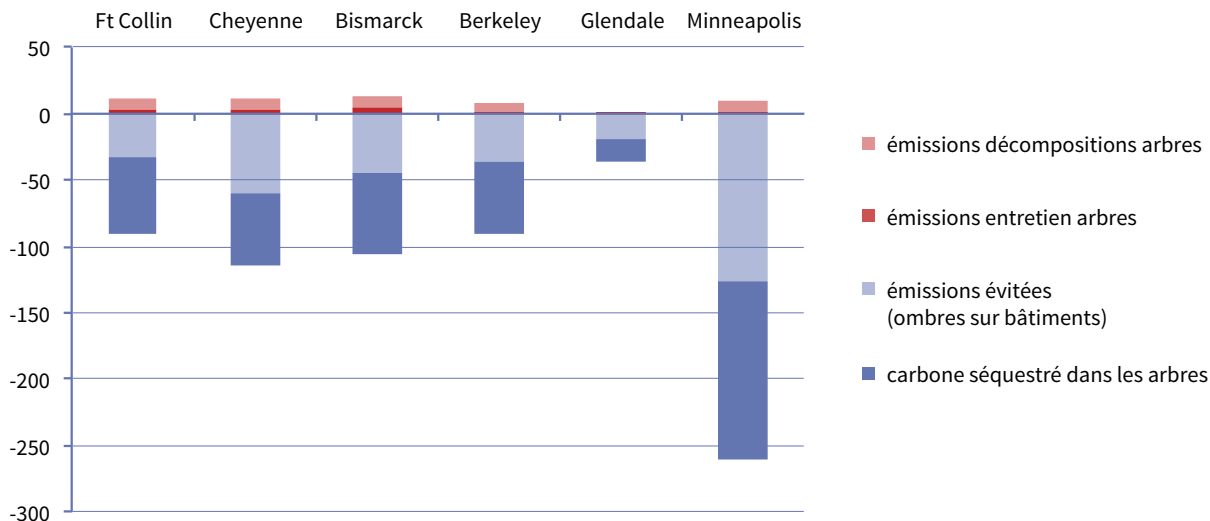
Les arbres séquestrent du carbone dans les parties aériennes (tronc, branches) et les racines, de façon variable selon les essences ou espèces et l'âge (il faut 3 à 10 ans

pour qu'un arbre devienne un puits net de GES : avant il est émetteur net), le climat, les pratiques culturales et l'environnement de l'arbre [5 ; 22].

En milieu urbain, les émissions de GES (dus à l'entretien des arbres et à leur décomposition en fin de vie) sont bien inférieures à la séquestration de carbone. Le bilan des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie de l'arbre est positif. Si l'on considère en outre les émissions de GES évitées grâce à l'ombre portée sur les bâtiments en été (économie d'énergie pour la climatisation)^(a), du même ordre de grandeur que la capacité de séquestration de carbone, le bilan est encore meilleur [3 ; 12 ; 22].



Séquestration de carbone dans arbres urbains : 16 à 135 kg éq. CO₂/arbre/an.
Bilan net des émissions de GES sur cycle de vie de l'arbre : -34 à -252 kg éq. CO₂/arbre/an (moyennes, 6 villes aux Etats-Unis)^(c)[12].



Séquestration de carbone et émissions GES arbres (parcs et alignement) et émissions évitées de 6 villes des Etats-Unis (en kg éq. CO₂/arbre/an). Source : McPherson et al., 2005 [12]

Les pelouses recouvrent 1,2 Mha en France et constituent le compartiment le plus important des espaces publics et des espaces à vocation récréative[21]. Les sols et les racines des pelouses séquestrent du carbone, plus ou moins selon qu'on retire ou non les résidus de tonte et selon la fertilisation^(b)[10 ; 21]. Toutefois la capacité de stockage est limitée et le stock de carbone dans les sols se stabilise au bout de quelques décennies [21].

Par ailleurs, les pelouses nécessitant la plupart du temps beaucoup d'entretien, il est indispensable de calculer le bilan GES global (émissions liées à l'entretien et séquestration sur l'ensemble du cycle de vie de la pelouse. Selon le bilan GES, la pelouse sera émettrice nette de GES ou puits net de GES).

Quand l'entretien est intensif, la pelouse devient émettrice nette de GES car les émissions sont supérieures à la séquestration[5]. Font partie des postes d'entretien les plus émetteurs[10 ; 21] :

- les opérations mécanisées (tonte, scarification, aération...) et la fertilisation qui nécessitent de l'énergie (émissions de CO₂ lors du passage des engins ou de la fabrication d'engrais azoté, la fertilisation générant également des émissions de N₂O),
- la gestion des résidus de tonte (la pratique la plus courante, consistant à les exporter, fait diminuer le stock de carbone dans les sols, contrairement au fait de les laisser sur place).

(a) Pour plus d'information, voir les chapitres 8 « Nature en ville et confort thermique estival en ville [zoom sur les végétaux et les sols] » et 9 « Nature en ville et confort thermique dans les bâtiments ».

(b) La fertilisation azotée favorise la production de biomasse et donc les apports de matières organiques au sol mais peut aussi favoriser les



Aux Etats-Unis, le taux de séquestration de carbone des pelouses intensives est de 3 660 kg CO₂/ha/an pour une fertilisation de 150 kg/ha/an et de 1 830 kg CO₂/ha/an pour une fertilisation de 75 kg/ha/an[21].



Le potentiel de séquestration de carbone des pelouses est diminué de 60% quand on exporte les tontes [21].



A Melbourne (Australie), l'émission de N₂O d'un sol de pelouse est légèrement augmentée avec l'application d'engrais, nettement augmentée avec l'arrosage (passant de 706 à 1 192 kg éq. CO₂/ha/an) et diminuée avec le mulching (copeaux de bois et broyats de branchages) (598 kg éq. CO₂/ha/an). La consommation de CH₄ par le sol (témoin en émissions de GES : -16 kg éq. CO₂/ha/an) n'est pas influencée par la fertilisation ou l'arrosage (-15 kg éq. CO₂/ha/an), mais est augmentée avec le mulching (-90 kg éq. CO₂/ha/an). Le mulching permet aussi d'augmenter les stocks de carbone dans le sol (x160%)[11].



En France, les pelouses des jardins privés ou publics sont émettrices nettes de GES (2 950 kg éq. CO₂/ha/an), de même que les terrains de sport (4 100 kg éq. CO₂/ha/an) sur l'ensemble du cycle de vie [21].

émissions de N₂O. Il s'agit donc de raisonner les apports d'azote par rapport aux besoins des plantes, d'autant plus que les dépôts atmosphériques d'azote peuvent être importants en milieu urbain.

(c) Fort Collins CO, Cheyenne WY, Bismarck ND, Berkeley CA, Glendale AZ et Minneapolis MN.



A l'inverse, quand la pelouse est entretenue de façon extensive ou que les espèces de pelouse implantées sont adaptées au sol et au climat locaux (par exemple espèces adaptées à la sécheresse), elle devient un puits net de GES [5 ; 21]. Les pelouses participent à la consommation de CH₄ (par les sols), certaines pratiques d'entretien (fertilisation, arrosage, mulching) permettant de l'augmenter [9 ; 11]. Toutefois, cette consommation pèse peu en termes de bilan GES [11].

Les toitures végétalisées ont un potentiel de séquestration de carbone qui dépend du climat, du substrat, des espèces de végétaux utilisées et de la gestion de la toiture (irrigation et fertilisation notamment). Le bilan des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie de la toiture végétalisée^(a) montre qu'elle est émettrice nette de GES les premières années, puis qu'elle peut devenir puits de carbone [7]. Les émissions de GES évitées grâce à la maîtrise de la consommation d'énergie du bâtiment peuvent s'additionner aux potentiels de séquestration de carbone par le substrat et les végétaux [7]. Néanmoins, les études étant rares, il est nécessaire de rester prudent quant à la généralisation de ces résultats.

A l'échelle de la parcelle, un bilan sur l'ensemble des GES (CO₂, N₂O, CH₄) et du cycle de vie des espaces végétalisés est nécessaire car les gains de stockage de carbone peuvent être contrebalancés par des émissions plus importantes de GES liées à des pratiques intensives de jardinage et d'entretien de ces espaces. A l'inverse, des pratiques raisonnées peuvent limiter les émissions de GES et faire de l'espace végétalisé un puits de GES. En général le bilan est meilleur lorsque l'espace végétalisé est boisé.



A East Lansing (MI, Etats-Unis), pour un type de toiture végétalisée extensive commun (substrat de 6 cm d'épaisseur planté de différentes espèces d'orpin), le taux de séquestration de carbone est de 1 900 kg CO₂/ha/an (73% dans les végétaux et 27% dans le substrat) et le bilan sur l'ensemble du cycle de vie montre que la toiture est émettrice nette de GES pendant 7 ans. Après ce délai, les émissions de GES évitées grâce à la maîtrise de la consommation d'énergie du bâtiment s'additionnent à la séquestration de carbone par le substrat et les végétaux et le bilan en termes d'atténuation du changement climatique devient positif [7].

L'INFLUENCE DES CHOIX D'URBANISATION ET DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DES SOLS À L'ÉCHELLE D'UNE VILLE, D'UNE AGGLOMÉRATION, D'UN TERRITOIRE

L'artificialisation des sols liée à l'urbanisation aboutit soit à l'imperméabilisation des sols (constructions, voies de circulation...), soit à des espaces perméables (espaces végétalisés notamment).

► L'imperméabilisation engendre une diminution du stock de carbone des sols, à laquelle s'ajoute la perte du stock de carbone des arbres abattus dans le cas du défrichage.

► Dans le cas des espaces végétalisés, l'effet net de l'urbanisation dépend des caractéristiques de l'écosystème remplacé et du climat. En général, le stock de carbone dans les sols commence par diminuer, d'autant plus si l'écosystème initial possédait un stock de carbone important (prairies, forêts) [19]. Ensuite, il augmente de façon plus ou moins marquée en fonction des pratiques d'entretien et du climat, dépassant dans quelques cas le stock initial^(b) [8 ; 19 ; 24]. Il en est de même pour les arbres.

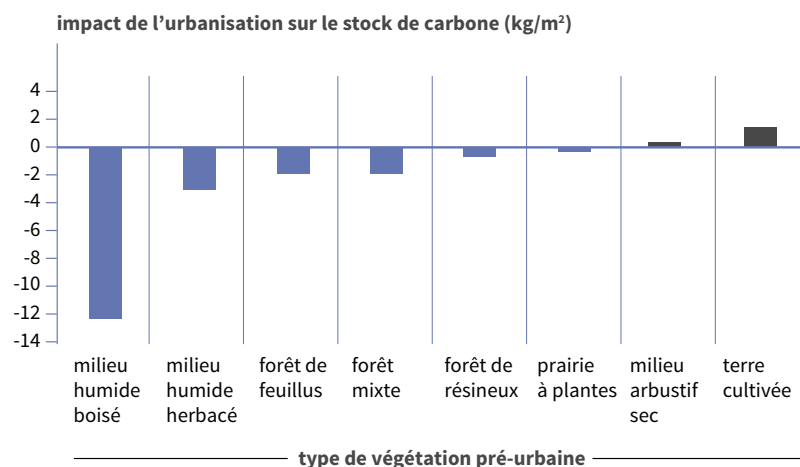


À New York (Etats-Unis) les stocks de carbone sont nettement plus bas dans les sols imperméabilisés que dans les sols végétalisés (83,9 versus 207,7 t CO₂/ha). A l'échelle des Etats-Unis, les pertes de stocks de carbone des sols dus à l'imperméabilisation seraient du même ordre de grandeur que les stocks de carbone dans les arbres urbains ou dans les sols de pelouses [20].

(a) Emissions de GES dues à la fabrication des composants de la toiture végétalisée, émissions évitées par la non fabrication de composants de toits « classiques » non végétalisés et par les économies d'énergie pour refroidir ou chauffer le bâtiment permises par la toiture végétalisée.

(b) En région aride ou semi-aride, le stock peut dépasser le stock initial grâce à l'arrosage ou l'irrigation et la fertilisation, mais il le fera plus difficilement ou jamais en région humide.

Le changement de mode d'occupation des sols et les modalités de gestion peuvent renforcer les capacités de stockage de certains sols (terre cultivée, milieux secs)[5 ; 23 ; 24].



Impact de l'urbanisation sur le stock de carbone (sol, litière et biomasse végétale) dans le sud des Etats-Unis. Source : Zhang et al.[24]

Le bilan de GES des sols et de la végétation ne doit pas se limiter aux espaces végétalisés d'une ville, d'une agglomération ou d'un territoire, mais inclure aussi l'effet du changement d'occupation des sols lié à l'urbanisation (imperméabilisation des sols, artificialisation de sols agricoles, forestiers et naturels, augmentation éventuelle des capacités de stockage après changement d'usage).

Les stocks de carbone des sols de Boston (Etats-Unis, MA) et de Syracuse (Etats-Unis, NY) sont nettement inférieurs à ceux des sols natifs (36% et 44% des stocks pré-urbanisation), car ces villes se sont développées sur d'anciennes forêts aux sols riches en matière organique. A l'inverse, ceux de Chicago (Etats-Unis, IL) et d'Oakland (Etats-Unis, CA) sont légèrement supérieurs (106% et 104%), car ces villes se sont développées sur des écosystèmes de climat plus chauds et/ou plus secs[19].

Dans l'aire métropolitaine de Denver-Boulder (Etats-Unis, CO), la conversion de prairies semi-arides en jardins provoque la perte d'une partie du stock de carbone des sols (mise en culture). Au bout de 10 ans, ce stock remonte et après 25 ans il dépasse le stock des sols de la prairie initiale. Enfin, après 50 ans, il représente 2 fois le stock de la prairie initiale (grâce à l'arrosage ou l'irrigation et la fertilisation)[8].

Dans l'aire métropolitaine de Baltimore (Etats-Unis, MD), les sols des forêts rurales ont une plus forte capacité de consommation de CH₄ (-539 kg éq. CO₂/ha/an), comparée à celle des sols de forêts urbaines (-74 kg éq. CO₂/ha/an) ou des sols de pelouses (quasi-nulle)[9].

En savoir plus sur le rôle du carbone des sols et des secteurs agricoles et forestiers dans l'atténuation du changement climatique

Les terres agricoles et la forêt occupent plus de 80 % du territoire national et séquestrent 4 à 5 Gt de carbone, dont plus des deux tiers dans les sols. Toute variation de ce stock influe sur les émissions de gaz à effet de serre. Les filières agricoles et forestières offrent des solutions pour lutter contre le changement climatique (énergies renouvelables, stocks de carbone dans la biomasse et les sols). Cette brochure vise à expliquer l'enjeu du sol dans la lutte contre l'effet de serre et, au-delà, à valoriser les bénéfices environnementaux associés à une meilleure gestion des matières organiques, réservoir de carbone dans les sols, et déterminant majeur de la capacité des sols à produire des aliments et des matériaux, à réguler le cycle de l'eau et la qualité de l'air.

Carbone organique des sols : l'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat, ADEME 2014 réf 7886, 27p.

<http://www.ademe.fr/carbone-organique-sols-lenergie-lagro-ecologie-solution-climat>



LA PRISE EN COMPTE DE L'ENSEMBLE DES STOCKS DE CARBONE ET FLUX DE GES LIÉS AUX SOLS ET À LA VÉGÉTATION URBAINE À L'ÉCHELLE D'UN TERRITOIRE

L'évaluation des émissions de GES à l'échelle territoriale, indispensable pour définir les stratégies de lutte contre le changement climatique des collectivités, ignore les stocks et la séquestration de carbone, et les flux de GES dans les sols et la végétation urbaine. Ceux-ci sont variables selon les villes et peuvent être élevés. L'imperméabilisation de sols peut donc déstocker des GES et engendrer des émissions de GES importantes.

	Moyenne sur 7 villes ^(a) aux Etats-Unis ^[6; 14 à 18]	Communauté urbaine de Lyon, France ^[4]
Stocks de carbone dans tous les arbres d'une ville (Mt CO₂)	0,14 à 5,49	1,87 à 2,92
Quantité de carbone séquestré par tous les arbres d'une ville (t CO₂/an)	4 400 à 564 490	56 059 à 87 570

A l'échelle d'une ville ou d'une agglomération, la diminution des émissions de GES par les espaces végétalisés, bien que non négligeable, ne suffit pas à « compenser » l'ensemble des émissions de GES. A titre d'illustration, la séquestration de carbone par les arbres compense seulement une part des émissions annuelles de GES des villes : la séquestration correspond à un à dix jours d'émissions par an ^[4 ; 6 ; 14 à 18]. Cependant, elle est du même ordre de grandeur que les émissions qui peuvent être évitées dans certains secteurs^(b)^[6].

A l'inverse, une diminution même faible du stock de carbone dans les sols et les arbres engendrerait des émissions de CO₂ significatifs, correspondant à plusieurs semaines d'émissions de GES de la ville ou de l'agglomération si 10% des espaces boisés étaient imperméabilisés.

Le bilan sur l'ensemble des GES (CO₂, N₂O, CH₄) et du cycle de vie des espaces végétalisés est nécessaire à l'échelle du territoire car en parallèle aux choix d'urbanisation, les pratiques (fertilisation et irrigation des pelouses, des arbustes et des arbres) permettant d'augmenter le stock de carbone dans les sols et les arbres sont aussi émettrices de GES ^[6 ; 24].

A l'échelle du territoire, le bilan est donc plus juste en considérant :

- les émissions de GES et le stockage de carbone par les arbres, les sols urbains et les pelouses tout au long de leur cycle de vie,
- les émissions de GES évitées grâce aux économies d'énergie (ombrage et évapotranspiration qui limitent le recours à la climatisation dans les espaces bâtis),
- les émissions liées aux changements d'occupation des sols liés à l'urbanisation, car une partie du carbone stocké dans les milieux (sol et végétation) remplacés est perdue quand les surfaces sont imperméabilisées.

Rôle de l'arbre en milieu urbain dans un contexte de changement climatique en région Hauts-de-France

Le guide et l'outil ARBO CLIMAT

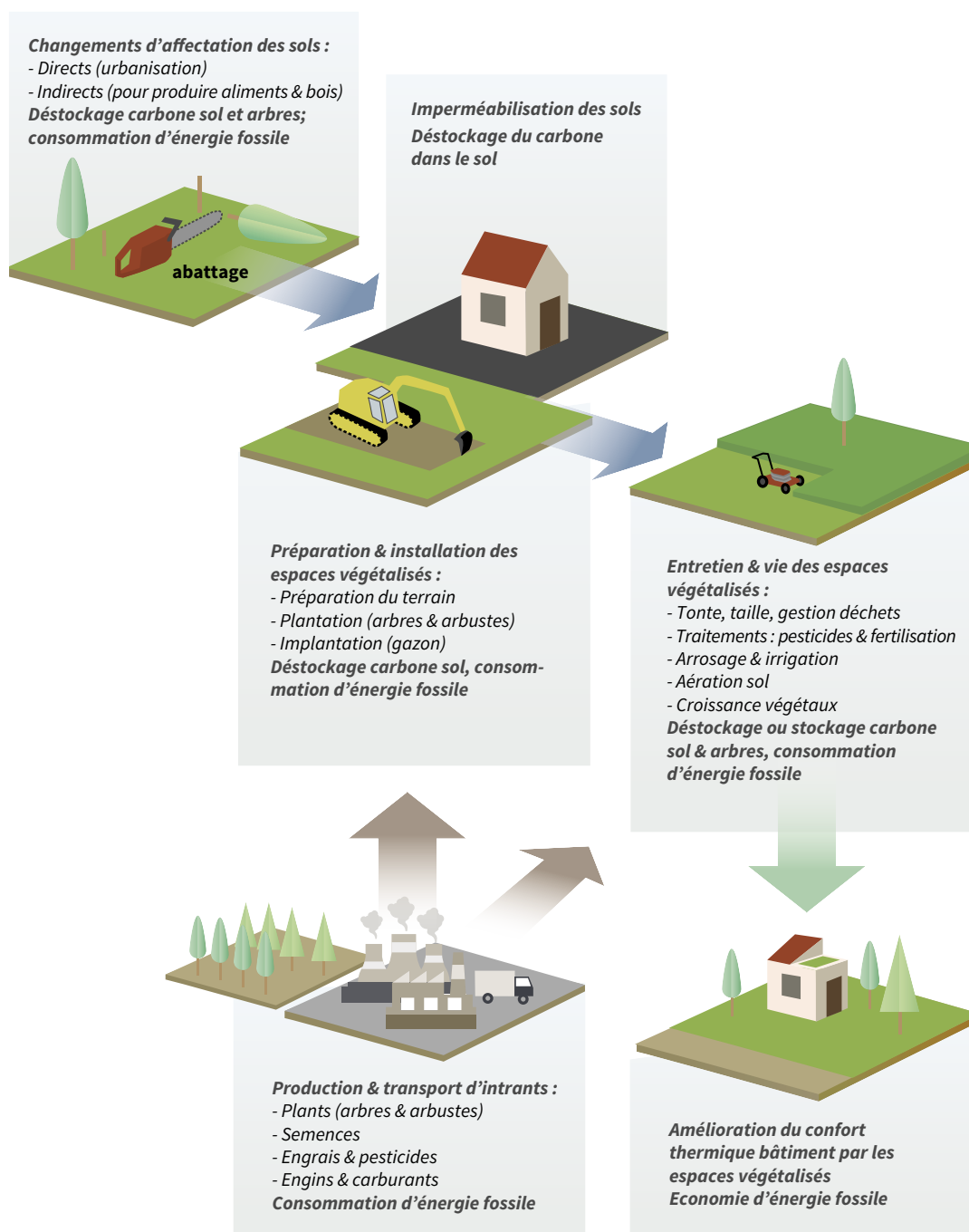
La direction régionale Hauts-de-France de l'ADEME et la Région Hauts-de-France ont souhaité accompagner les collectivités locales en leur proposant, au travers d'un guide et de l'outil « Arbo Climat », d'abord l'arbre en milieu urbain comme un outil privilégié pour une démarche d'atténuation et d'adaptation climatique dans l'aménagement. En plus de contribuer à la biodiversité, l'arbre possède 3 atouts principaux :

- Il absorbe le CO₂ de l'atmosphère pour le stocker dans ses branches, son tronc et ses racines.
- Il apporte de l'ombre, rafraîchissement naturel en été, et facilite l'absorption des précipitations hivernales et d'épisodes violents.
- Il contribue au développement de la filière bois.

En savoir plus : <http://www.arbre-en-ville.fr/>

(a) New York NY, Casper WY, Philadelphia PA, Washington DC, San Francisco CA, Miami-Dade FL et Gainesville FL.

(b) Gestion des déchets, production et utilisation de l'électricité par les ménages, utilisation d'énergie fossile par les industries, transports.



En conclusion, pour préserver, voire augmenter, le potentiel d'atténuation du changement climatique, il est au moins aussi important de préserver les arbres en ville que d'en planter de nouveaux[6], de préserver des espaces verts plutôt que de les imperméabiliser, et plus généralement

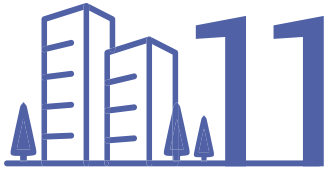
de limiter la consommation de sols naturels, forestiers et agricoles par l'urbanisation, car on risque sinon d'annuler les efforts de réductions des émissions de GES faits dans d'autres secteurs.



BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 10

- [1] ADEME (2014) : *Carbone organique des sols - L'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat*. Collection "Connaître pour agir - Collectivités territoriales et monde agricole". 15 p. <http://www.ademe.fr/carbone-organique-sols-lenergie-lagro-ecologie-solution-climat>
- [2] ADEME et Région Hauts-de-France (à paraître en 2017) : *Rôle de l'arbre en milieu urbain dans un contexte de changement climatique en région Hauts-de-France*. Guide réalisé par le groupement ECIC (Papin O.), Symbios'in (Thuillier B.), Atelier Colin & Poli Paysages (Colin A.) et Climate Adaptation Consulting (Jouan Daniel R.). 36 p.
- [3] AKBARI H. (2002): *Shade trees reduce building energy use and CO2 emissions from power plants*. Environmental Pollution, 116, pp. S119-S126.
- [4] BRUYAT G. (2011) : *Estimation de la masse de carbone stocké par les arbres de la Communauté urbaine de Lyon... ou comment adapter le zonage d'un PLU pour en faire un zonage de végétation*. TFE, ENTPE. 63 p.
- [5] CAMERON R.W.F., BLANUŠA T., TAYLOR J.E., SALISBURY A., HALSTEAD A.J., HENRICOT B., THOMPSON K. (2012): *The domestic garden - Its contribution to urban green infrastructure*. Urban Forestry & Urban Greening, vol. 11, issue 2, pp. 129-137.
- [6] ESCOBEDO F., VARELA S., ZHAO M., WAGNER J.E., ZIPPERER W. (2010): *Analyzing the efficacy of subtropical urban forests in offsetting carbon emissions from cities*. Environmental Science & Policy, vol. 13, issue 5, pp. 362-372.
- [7] GETTER K.L., ROWE D.B., ROBERTSON G.P., CREGG B.M., ANDRESEN J.A. (2009): *Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs*. Environ. Sci. Technol., 43, pp. 7564-7570.
- [8] GOLUBIEWSKI N.E. (2006): *Urbanization increases grassland carbon pools: effects of landscaping in Colorado's Front Range*. Ecological Applications, 16(2), pp. 555-571.
- [9] GROFFMAN P.M., POUYAT R.V. (2009): *Methane Uptake in Urban Forests and Lawns*. Environ. Sci. Technol., 43, pp. 5229-5235.
- [10] HALL S.J., HUBER D., GRIMM N.B. (2008): *Soil N2O and NO emissions from an arid, urban ecosystem*. Journal of Geophysical Research, vol. 113, issue G1, G01016, 11 p.
- [11] LIVESLEY S.J., DOUGHERTY B.J., SMITH A.J., NAVAUD D., WYLIE L.J., ARNDT S.K. (2010): *Soil-atmosphere exchange of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in urban garden systems: impact of irrigation, fertiliser and mulch*. Urban ecosystem, 13, pp. 273-293.
- [12] MCPHERSON E.G., SIMPSON J.R., PEPER P.F., MACO S.E., GARDNER S.L., COZAD S.K., XIAO Q. (2005): *City of Minneapolis, Minnesota, Municipal tree resource analysis*. USDA, Forest service, Pacific Southwest Research station, Center for urban forest research. 45 p.
- [13] MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ENERGIE ET DE LA MER (2016) : *Comprendre le changement climatique*. MEEM/DGEC. 12 p.
- [14] NOWAK D.J., HOEHN R.E., CRANE D.E., STEVENS J.C., WALTON J.T. (2006): *Assessing urban forest effects and values, Washington, D.C.'s urban forest*. Resour. Bull. NRS-1. USDA, Forest Service, Northern Research Station. 24 p.
- [15] NOWAK D.J., HOEHN R.E., CRANE D.E., STEVENS J.C., WALTON J.T. (2006): *Assessing urban forest effects and values, Casper's urban forest*. Resour. Bull. NRS-4. USDA, Forest Service, Northern Research Station. 20 p.
- [16] NOWAK D.J., HOEHN R.E., CRANE D.E., STEVENS J.C., WALTON J.T. (2007): *Assessing urban forest effects and values, New York City's urban forest*. Resour. Bull. NRS-9. USDA, Forest Service, Northern Research Station. 22 p.
- [17] NOWAK D.J., HOEHN R.E., CRANE D.E., STEVENS J.C., WALTON J.T. (2007): *Assessing urban forest effects and values, Philadelphia's urban forest*. Resour. Bull. NRS-7. USDA, Forest Service, Northern Research Station. 22 p.
- [18] NOWAK D.J., HOEHN R.E., CRANE D.E., STEVENS J.C., WALTON J.T. (2007): *Assessing urban forest effects and values, San Francisco's urban forest*. Resour. Bull. NRS-8. USDA, Forest Service, Northern Research Station. 22 p.
- [19] POUYAT R.V., YESILONIS I.D., NOWAK D.J. (2006): *Carbon Storage by Urban Soils in the United States*. J. Environ. Qual., 35, pp. 1566-1575.
- [20] RACITI S.M., HUTYRA L.R., FINZI A.C. (2012): *Depleted soil carbon and nitrogen pools beneath impervious surfaces*. Environmental Pollution, 164, pp. 248-251.
- [21] STREIT J. (2009) : *Calcul et analyse de l'empreinte carbone des gazons*. Rapport de stage de Master 2 « Ecologie humaine », Institut EGID Bordeaux 3, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3, Plante&Cité, 65 p.
- [22] STROHBACH M.W., ARNOLD E., HAASE D. (2012): *The carbon footprint of urban green space - A life cycle approach*. Landscape and Urban Planning, 104, pp. 220-229.
- [23] VASENEV V.I., STOORVOGEL J.J., VASENEV I.I., VALENTINI R. (2014): *How to map soil organic carbon stocks in highly urbanized regions?* Geoderma, Volumes 226-227, August 2014, pp. 103-115.
- [24] ZHANG C., TIAN H., CHEN G., CHAPPELKA A., XU X., REN W., HUI D., LIU M., LU C., PAN S., LOCKABY G. (2012): *Impacts of urbanization on carbon balance in terrestrial ecosystems of the Southern United States*. Environmental Pollution, 164, pp. 89-101.



NATURE EN VILLE, APPROVISIONNEMENT ET ALIMENTATION LOCALE

EN BREF

Les jardins peuvent être une source d'aliments mais il est nécessaire de veiller à la qualité des milieux (sols, eaux) pour garantir la qualité des denrées, et éviter toute contamination.

Les jardins, qu'ils soient privés ou collectifs, peuvent être une source d'approvisionnement en aliments pour les jardiniers et leurs proches. Les sols y sont généralement fertiles, mais souvent plus contaminés que les sols agricoles. Cela génère des risques de contamination des légumes cultivés ou des petits animaux d'élevage et donc une exposition aux contaminants plus importante. Les eaux des puits en ville peuvent aussi être contaminées et accentuer la contamination des sols si elles sont utilisées pour arroser le jardin potager. La mise à disposition, par les collectivités, de jardins collectifs ou de parcelles pour la construction de maisons avec jardins est indissociable d'une approche en amont en matière de risques sanitaires liés à la contamination de ces espaces. L'émergence de cette question rendra probablement nécessaire une politique nationale harmonisée. Lorsqu'une contamination des sols de jardin est constatée, il s'agit d'en maîtriser les risques.

Le jardin : un élément essentiel au bien-être

En France, 12 millions de ménages entretiennent 13,5 millions de jardins et la surface occupée est de plus d'un million d'hectares^[14]. L'engouement des Français pour les jardins est fort (plus de 9 Français sur 10 ressentent le besoin d'un contact quotidien avec les plantes et les jardins^[20 ; 22]) et 1 Français sur 3 rêve d'un jardin « nourricier » (potager et fruitier)^[21].



Parmi les Français qui possèdent un jardin, 33% ont un jardin d'ornement (pelouse, jardin d'agrément) et 67% possèdent un potager et/ou des arbres fruitiers. 1/6 de la surface des jardins amateurs est dédiée aux potagers^[14].

Les motivations des jardiniers sont diverses : production d'aliments, esthétisme (jardins d'agrément notamment), satisfaction, bien-être et sérénité, créativité, activité physique, présence de la nature, protection de la biodiversité, interaction sociale et familiale^[14 ; 20 à 22]. La présence de jardins, voire de petits animaux d'élevage, permet de réduire le volume de déchets verts et de déchets alimentaires des ménages à la charge des collectivités (grâce au compostage domestique et à l'alimentation des volailles notamment).

Le jardin : une source d'approvisionnement d'aliments en circuit court

Les Français produisent dans leurs jardins une partie non négligeable des légumes, voire des volailles et œufs qu'ils consomment.



Part des aliments consommés autoproduits dans un jardin en France^[3]:

Légumes feuilles	26%
Légumes racines	24%
Pommes de terre	24%
Légumes fruits	13%
Volailles	16%
Œufs	17%

Un circuit court de produits alimentaires correspond à tout mode de commercialisation qui s'exerce soit par la vente directe du producteur au consommateur, soit par la vente indirecte, à condition qu'il n'y ait qu'un seul intermédiaire. Dans le cas des jardiniers amateurs, les aliments produits sont majoritairement consommés par les ménages, et non commercialisés (le circuit est encore plus court).

Au-delà des économies réalisées grâce à la production d'aliments, les qualités nutritionnelles et organoleptiques (goût, odeur, apparence, consistance) ainsi que la fraîcheur des aliments sont recherchées par les jardiniers ^[14].





La surface moyenne des potagers individuels (100 m²) offre un réel potentiel d'approvisionnement^[14].



91% des jardiniers estiment que les légumes qu'ils produisent ont des qualités organoleptiques supérieures à ceux du commerce^[14].



Un jardin privatif en Ardèche / Un jardin collectif dans le Maine-et-Loire : sources d'approvisionnement alimentaire local © Isabelle Feix

LES SOLS DE JARDIN : FERTILES MAIS SOUVENT CONTAMINÉS

Les jardins de potagers sont souvent cultivés de façon intensive, ce qui génère des sols à haute fertilité, mais aussi d'une grande diversité en fonction des pratiques de culture et d'entretien^[10 ; 14 ; 15].

Les teneurs en matière organique, azote et phosphore des sols de jardins sont en moyenne supérieures à celles des sols agricoles, car les apports d'amendements organiques et d'engrais des jardiniers sont souvent plus importants. Ce constat est fréquent aussi pour les contaminants, notamment les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les éléments traces métalliques (ETM) ^[10 ; 14 ; 15].

En amont de ces pratiques, les sources de contamination, datant souvent de plusieurs décennies voire plus, sont multiples^[10 ; 12 ; 14 ; 15] :

- retombées atmosphériques (dues au trafic routier, aux rejets atmosphériques industriels et au chauffage),
- utilisation de déchets contaminés (cendres, mâchefers^(a)...) pour amender ou remblayer le jardin,
- usage intensif et répété de produits phytosanitaires ou engrais phosphatés,
- ruissellements des toits en zinc ou des chaussées proches,
- contamination des eaux du puits utilisées pour l'arrosage notamment.

(a) Résidus solides de combustion, issus de l'incinération des déchets ménagers.

(b) Transfert des éléments suivants : cadmium, cuivre, plomb, chrome, cobalt, zinc, mercure, nickel, thallium et arsenic (pas pour molybdène et sélénium).

(c) La variété de laitue Summer bibb accumule plus de cadmium que la variété Romaine par exemple.

(d) Exemples : cresson, endive, salade, chou.

(e) Exemples : carotte, navet, pomme de terre.

Ces contaminants se retrouvent en quantités variables dans les aliments autoproduits en fonction de nombreux facteurs :

- La nature des sols (acidité, aération, taux d'argile, de matière organique, d'oxydes et d'hydroxydes métalliques). Le transfert de la plupart des ETM vers la plante est augmenté dans les sols acides^(b) ou sableux, mais il est diminué dans les sols argileux ou basiques et dans les sols pauvres en oxygène ^[14 ; 19].
- Les plantes cultivées (partie de la plante, espèces et variétés^(c), stade végétatif, activité des racines). De nombreuses plantes accumulent la plupart des ETM plutôt dans leurs racines que dans les parties aériennes (et plutôt dans les feuilles et les tiges que dans les grains et les fruits). En général, les légumes feuilles^(d) prélèvent plus d'ETM que les grains de graminées et les légumes racines^(e), qui eux-mêmes prélèvent plus que les fruits^(f) et les légumes fruits^(g). La concentration en ETM et polluants organiques de la plante diminue au cours de sa croissance, mais certains ETM peuvent être transférés d'un organe de la plante à l'autre en fin de vie ou avant l'hiver^(h). Les racines de certaines espèces végétales, *via* leurs exsudats⁽ⁱ⁾, ont une forte capacité à immobiliser ou à rendre plus disponibles les ETM du sol que d'autres^[14].
- Les animaux d'élevage (organe, espèces et races, stade physiologique). Les polluants organiques persistants (POP) s'accumulent préférentiellement dans les matières grasses (lait, jaune d'œuf, tissus adipeux), le cadmium dans le foie et les reins et le plomb dans les os. La concentration

(f) Exemples : pomme, poire, banane, cerise.

(g) Exemples : aubergine, avocat, concombre, tomate, haricot vert.

(h) Zinc et cuivre peuvent être transférés des feuilles vers les grains lors du remplissage des grains des céréales par exemple.

(i) Liquide excrété par les racines des végétaux, contenant des composés organiques qui exercent de fortes influences sur les microorganismes du sol et sur la mobilisation des éléments nutritifs dans le sol à proximité des racines.

en POP dans les œufs de poule varie de façon importante en fonction de l'état d'engraissement et le taux de ponte [5 ; 6 ; 11 ; 18].

► Les contaminants eux-mêmes (propriétés et formes chimiques, interactions entre éléments ou avec d'autres molécules). Certains ETM^(a) ou formes chimiques de l'ETM^(b) sont plus disponibles pour la plante. Certains éléments ou molécules inhibent le prélèvement des ETM^(c) par les plantes et d'autres l'amplifient. La disponibilité de polluants organiques pour une plante dépend de leur solubilité dans l'eau^(d). Les polluants organiques lipophiles^(e) se fixent majoritairement à la matière

organique du sol, mais ils peuvent se fixer à la surface des racines (en s'associant aux lipides des épidermes). Ils sont ingérés avec le sol par les animaux qui broutent ou picorent. L'accumulation et l'élimination des polluants organiques chez les animaux varient avec les propriétés des polluants[5 ; 6 ; 11 ; 14 ; 18 ; 19].

► Le climat. Le prélèvement des ETM par la plante augmente avec la température, la lumière et l'humidité [19].

► Les pratiques de jardinage^(f) et d'élevage^(g), car ils influencent les conditions du milieu et agissent sur les facteurs liés au sol, à la plante, à l'animal et les facteurs climatiques qui contrôlent le prélèvement[18].



Dans les départements du Nord et du Pas de Calais, les teneurs en cadmium, plomb, zinc des sols de 92 jardins potagers (en contextes urbains, suburbains et industriels) sont, à l'exception d'un jardin, supérieures aux teneurs agricoles habituelles de la région et une proportion non négligeable des légumes présente des teneurs en cadmium et/ou plomb supérieures aux seuils européens[4].

	laitue	feuille radis	racine radis	carotte	poireau	pomme de terre	haricot vert	tomate
Nouvelle-Godault	0/5	0/5	1/5	1/6	0/4	1/6	6/6	1/4
Auby	1/3	0/3	1/3	0/3	0/2	1/3	2/3	0/2
Dunkerque	4/4	4/4	3/4	3/3	2/2	3/3	4/4	4/4
Montagne du Nord	1/2	1/3	3/3	0/1	1/3	2/3	3/3	1/2
Valenciennes	6/6	5/6	6/6	5/6	4/4	6/6	6/6	4/4
Lille métropole	12/15	14/17	17/17	9/14	11/12	18/18	17/17	15/15

Proportion de végétaux cultivés dont les teneurs en cadmium et/ou en plomb respectent les seuils européens dans les aliments

(a) Le cadmium et le zinc, par exemple, sont plus disponibles pour la plante que le cuivre et le plomb.

(b) Les formes solubles des ETM (par ex. Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cr VI) sont plus disponibles pour la plante que les ETM en phase solide (par ex. CuO ou cuivre fixé sur la matière organique solide et sur les oxydes de fer et de manganèse du sol, $\text{Pb}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, PbCO_3 ou PbO , Cr III).

(c) De fortes concentrations de zinc, de calcium, de phosphore ou de fer inhibent généralement le prélèvement du cadmium par exemple.

(d) Les phénols sont solubles dans l'eau contrairement aux HAP, PCB et dioxines.

(e) Certains HAP, les PCB.

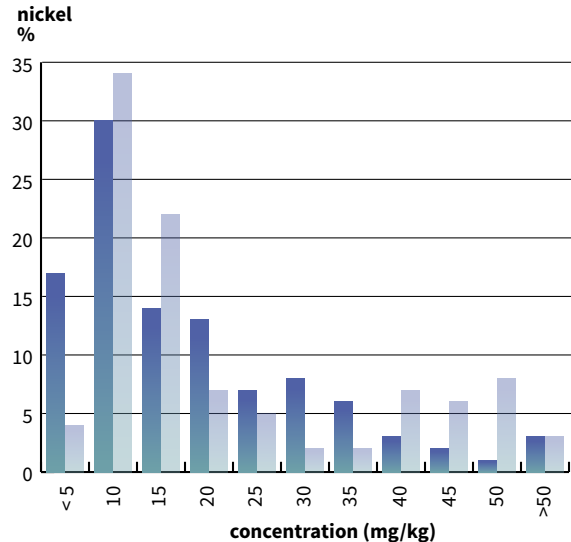
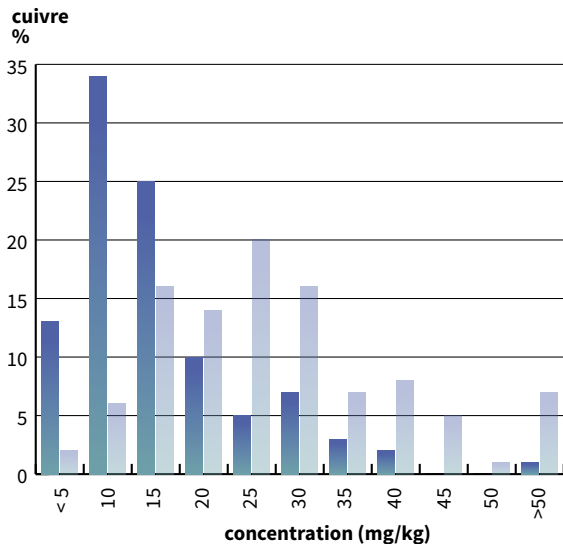
(f) Arrosage, chaulage, apport d'amendements organiques, travail du sol par exemple.

(g) Elevage de poules en cage ou en plein air, mode d'alimentation et origine des aliments, par exemple.





Dans la région de Sarrebruck (Allemagne, Sarre) et à quelques dizaines de kilomètres à l'ouest (nord-est mosellan, France), les teneurs en ETM (cuivre, nickel, plomb, zinc) des sols de jardins privés et collectifs (en contextes miniers, industriels, urbains et ruraux) sont supérieures à celles des sols agricoles de la région[7].



Distribution des teneurs en ETM (cuivre et nickel) des sols de jardins (233 parcelles) et des sols agricoles (185 parcelles) dans la région de Sarrebruck et le nord-est mosellan



Les légumes cultivés dans les jardins à Berlin (Allemagne) présentent des teneurs très variables, en général de 1,3 à 6 fois supérieures en zinc, plomb, cuivre et chrome, à ceux achetés dans le commerce. Par contre, les fruits, baies et noix de cette ville montre la tendance inverse pour la teneur en cadmium et plomb[13 ; 23].

Lorsque les aliments autoproduits dans les jardins constituent une part importante de l'alimentation des ménages, leur exposition à ces polluants peut présenter un risque pour leur santé, alors même qu'ils sont convaincus de la qualité de leur alimentation autoproduite. Les consommateurs ingèrent des quantités variables de contaminants (doses externes) via les aliments. Une partie des contaminants ingérés est absorbée au niveau de l'intestin (le reste est éliminé) et constitue l'exposition

réelle aux contaminants (doses internes)[19]. L'exposition dépend de plusieurs facteurs[19]:

- Les propriétés et les formes chimiques du contaminant,
- La concentration de l'aliment en contaminants,
- Le consommateur (âge, sexe, état physiologique, sensibilité aux polluants).
- La quantité d'aliment consommé (régime alimentaire^(h), part des aliments provenant du jardin).
- Le mode de préparation de l'aliment⁽ⁱ⁾.

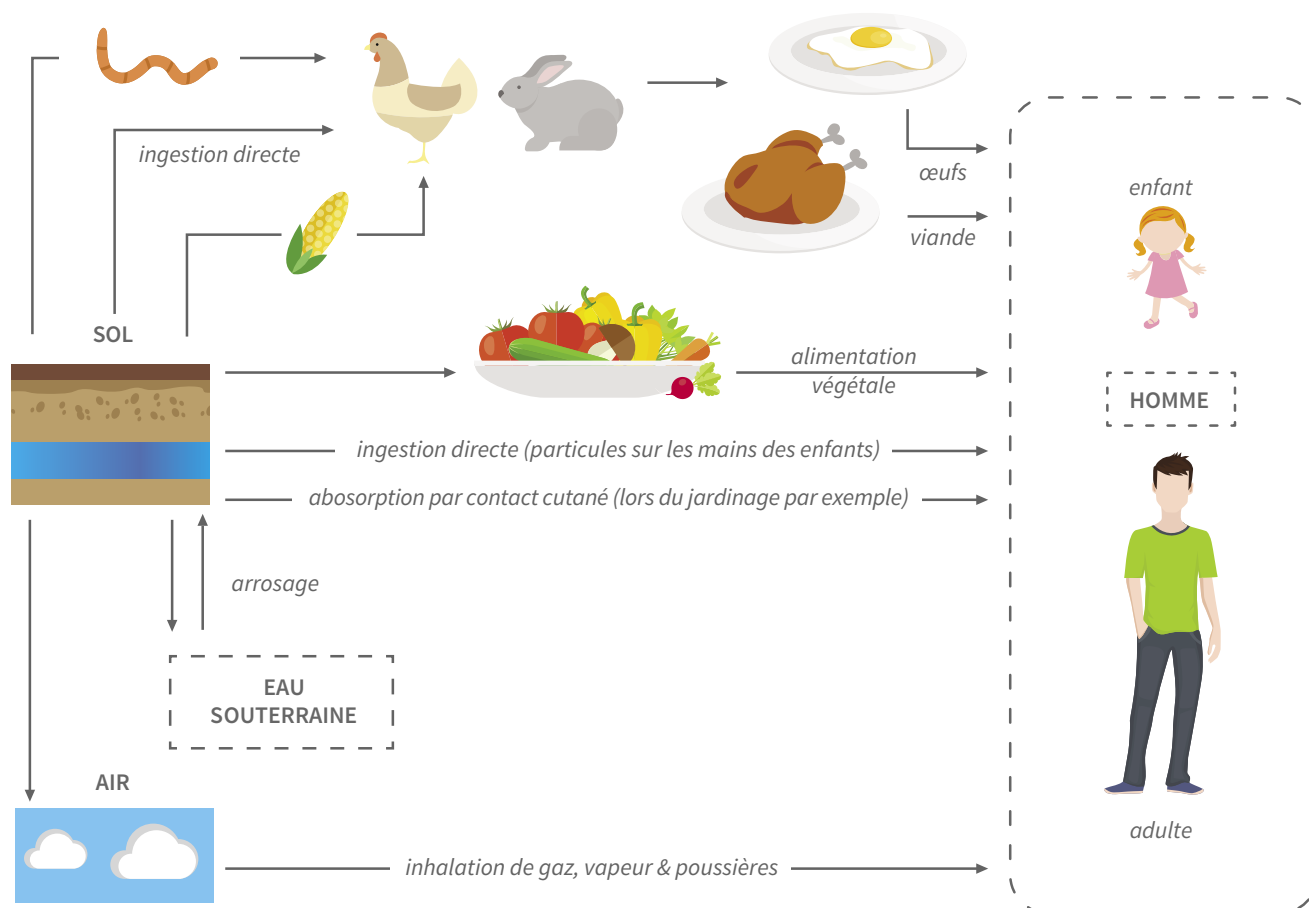


92% de la surface de l'aire urbaine d'une ville anglaise (Midlands de l'Ouest) présentent un risque pour la santé^(j) minimal pour la population qui consomme peu d'aliments provenant de son jardin, mais élevé pour des ménages consommateurs d'aliments autoproduits, notamment les jeunes enfants[9].

(h) Par exemple, en moyenne en France, les fruits et les légumes ne représentent que 20% du régime alimentaire, mais apportent près de 50% du plomb, 35% du cadmium et près de 30% du mercure[19]. Ce régime « moyen » cache néanmoins des réalités variées en termes de régimes. Les produits d'origine animale contribuent pour près de 90% à l'ingestion de dioxines et furannes par la population française [11].

(i) Par exemple après lavage, pelage et cuisson d'une carotte, 96 à 99 % du plomb est éliminé. A l'inverse, tout contact avec un matériau contenant des ETM est susceptible de contaminer le produit : boîte de conserve, tuyauteries, cristal, ustensiles de cuisine[19].

(j) Risques liés à la contamination en cadmium, cuivre, plomb, nickel et zinc des jardins (consommation d'aliments produits dans les jardins, inhalation de poussières de sols, ingestion de sols).



Les voies d'exposition des jardiniers et de leur famille aux contaminants du sol de leur jardin. Source : Isabelle Feix

LA QUALITÉ DES SOLS, UN ENJEU DANS LA MISE À DISPOSITION PAR LES COLLECTIVITÉS DE JARDINS COLLECTIFS OU DE LOTISSEMENTS RÉSIDENTIELS AVEC JARDINS

La demande croissante de jardins collectifs de la part de la population et la difficulté à trouver du parcellaire en milieu urbain obligent souvent les collectivités et les aménageurs à se tourner vers des espaces à moindre valeur foncière (comme des espaces à proximité d'axes routiers ou ferroviaires ou des friches)[12]. Cela peut prêter à questionnement sur la qualité agronomique (fertilité) et environnementale (pollution) des parcelles mises à disposition (sol et le cas échéant eau du puits)[12]. De même, les parcelles mises à disposition pour des constructions de maisons avec jardins ne sont pas choisies en fonction de la qualité des sols, et les pratiques-

mêmes de construction ne ménagent pas toujours cette qualité. Dans les deux cas, l'historique des usages du site et la possibilité que ces usages aient contaminé les sols et les eaux souterraines, ne sont pas systématiquement recherchés. De plus, il est peu courant qu'en amont des projets d'aménagement, des analyses des sols soient effectuées pour en déterminer la qualité.

La question des risques liés à la contamination des sols de jardin est récente, et traitée inégalement en France. Ce sont parfois les associations de jardins collectifs qui sollicitent une expertise. Des collectivités anticipent les risques dans le cas d'un projet de création de jardins collectifs, ou gèrent les problèmes pour les jardins collectifs existants. Parfois, des chercheurs mettent en lumière des pollutions dans des jardins collectifs ou privés[12].

Une politique nationale spécifique semble nécessaire pour anticiper et gérer, de façon harmonisée, les risques posés par la contamination des sols (et des eaux de puits) des jardins privés et collectifs[12].

LA GESTION DES RISQUES AU NIVEAU DES PARCELLES CONTAMINÉES

Lorsqu'une contamination des sols de jardin est constatée, diverses pratiques ou techniques permettent de limiter les risques pour la santé des ménages consommant les aliments produits^[8 ; 17].

Le chaulage (traitement à la chaux) ou l'apport d'amendements organiques (composts), la formation de plates-bandes surélevées avec des terres non polluées, ainsi que la couverture des sols (engazonnement, mulchage), permettent de réduire le transfert des contaminants vers les plantes comestibles^[8 ; 16 ; 17].

Le lavage systématique des feuilles comestibles ou des légumes-fruits et fruits poussant près du sol (pour enlever les particules de sol) et l'épluchage soigneux des racines et tubercules (la peau a tendance à accumuler) limitent l'ingestion des contaminants^[16 ; 17].

Le recours à des espèces peu accumulatrices^(a) et le choix d'éviter les espèces accumulatrices^(b), peuvent s'avérer efficaces quand les contaminations de sol sont limitées ^[16 ; 17].

Certaines techniques de bioremédiation utilisant des microorganismes pour dégrader les polluants in situ peuvent être intéressantes dans le cas de sols contaminés avec des polluants organiques^(c)^[8 ; 12].

Dans le cas de fortes contaminations, un risque direct lié au travail de la terre^(d) peut s'ajouter aux risques alimentaires et une solution peut être de remplacer la terre contaminée par de la terre végétale « propre »^[8 ; 12].

Enfin, dans les cas extrêmes, la solution consiste souvent à interdire de produire des plantes à vocation alimentaire en pleine terre, ainsi que d'élever des animaux susceptibles de brouter ou de picorer à même le sol. La culture en pots ou en bacs avec du terreau et/ou de la terre végétale « propre » et l'élevage des petits animaux « hors sol » constituent alors des solutions alternatives^[8 ; 12].

Si certaines de ces solutions revêtent un caractère systématique et de bon sens (nettoyage, épluchage avant consommation) ou permettent de contourner le problème (culture hors sol sur des terres d'apport), d'autres nécessitent des études préalables pour en valider l'efficacité (apport d'amendement, modification de pH...) et leurs coûts.

Pour en savoir plus :

► sur les sols de jardins

Les jardins, objets d'un engouement croissant, sont localisés dans des environnements modifiés par les actions humaines, à l'interface d'usages agricoles, urbains et industriels. Les sols de jardins sont support des activités de jardinage, de production végétale et de la biodiversité locale. Ils se caractérisent par des qualités très variables. Les pratiques des jardiniers sont définies par des contraintes et des convictions écologiques ou économiques très contrastées. Cet ouvrage présente un état de l'art des connaissances sur les sols, les usages et productions potagères dans les jardins français.

Jardins potagers : terres inconnues ? éd. ADEME 2013, 176 p. Réf. 7481
<http://www.ademe.fr/jardins-potagers-terres-inconnues>



(a) Arbres fruitiers, arbustes à baie, tomate, aubergine, poivron, maïs, concombre, melon par exemple.

(b) Betterave, carotte, chou, endive, chicorée, laitue, champignon, radis, épinard, petit pois, oseille, bette, navet, pomme de terre par exemple.

(c) Pour plus d'informations, voir le chapitre 4 « Nature en ville et lutte contre la pollution des sols urbains ».

(d) Risque lié à l'inhalation de poussières ou à l'absorption par voie cutanée par exemple.

► sur les transferts des contaminants des sols vers les cultures

Un des aspects de la sécurité alimentaire est le contrôle des teneurs en éléments-traces des aliments d'origine végétale. Il est donc nécessaire de connaître les facteurs régissant le transfert des éléments-traces du sol vers l'organe récolté de la plante, puis ceux qui ont une incidence sur la teneur finale de l'aliment. Cet ouvrage fait l'état de l'art sur le transfert de 12 éléments-traces (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Tl, Zn) des sols vers les plantes à vocation alimentaire.

Contamination des sols : transferts des sols vers les plantes, éd. ADEME & EDP Sciences 2005, 414 p. Réf. 3362 <http://www.ademe.fr/contamination-sols-transferts-sols-vers-plantes>



Les diverses crises qui ont affecté la filière agroalimentaire ont généré la revendication de la part des consommateurs, au droit à la sécurité des aliments. Pour répondre à ces exigences, la nécessité de disposer d'avis rapides, fiables et clairs sur les questions émergentes a été relevée par la législation communautaire, l'évaluation des risques liés à l'alimentation est nécessaire. Cet ouvrage vise à synthétiser les connaissances du transfert de polluants organiques (PCDD/F, PCB, HAP) et des éléments traces du sol vers l'animal d'élevage.

Contamination des sols : transferts des sols vers les animaux, éd. ADEME & EDP Sciences 2005, 218 p. Réf. 5096 <http://www.ademe.fr/contamination-sols-transferts-sols-vers-animaux>



Ce guide propose une méthode d'échantillonnage de plantes potagères permettant de disposer d'espèces végétales et d'analyses représentatives des situations environnementales rencontrées. Il facilite la conduite d'évaluations de la qualité sanitaire de productions potagères consommées par l'homme et cultivées dans un environnement potentiellement pollué et de la contribution d'une installation industrielle à la contamination des cultures potagères.

Guide d'échantillonnage des plantes potagères dans le cadre des diagnostics environnementaux, 2ème édition. 2014, 67 p. <http://www.ademe.fr/guide-dechantillonnage-plantes-potageres-cadre-diagnostics-environnementaux>





BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 11

- [1] ADEME, INERIS, INP/ENSAT, UNIVERSITE LORRAINE/ENSAIA, ISA LILLE (novembre 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-presentacion-notice-dutilisation>
- [2] ADEME, Université Lorraine, INRA, INERIS, INP/ENSAT, ISA Lille, CERTOP, INVS, IRSN, ANDRA, Géovariances, CNAM-IHIE Ouest (2014) : *Guide d'échantillonnage des plantes potagères dans le cadre des diagnostics environnementaux*, 2ème édition. 67 p. <http://www.ademe.fr/guide-dechantillonnage-plantes-potageres-cadre-diagnostics-environnementaux>
- [3] CESSAC B., BEAUGRLIN-SEILLER K., METIVIER J.M., MORIN A., MOURLON C., VINCENT G. (2002) : *CIBLEX : Banque de données de paramètres descriptifs de la population française au voisinage d'un site pollué*. ADEME/IRSN. 72 p. <http://www.ademe.fr/ciblex-banque-donnees-parametres-descriptifs-population-francaise-voisinage-dun-site-pollue>
- [4] 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, 667-676.
- [5] FAYÇAL O. (2011) : *Influence de la matrice sol sur la biodisponibilité orale des polluants organiques persistants chez les ruminants laitiers*. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 195 p.
- [6] 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, pp. 431-435.
- [7] FETZER K.D., ENRIGHT E., GRENZIUS R., KUBINIOK J., SCHWARTZ C., MOREL J.L. (1998): *Garden soils in south-western Germany (Saarland) and north-eastern France (Lorraine)*. 16th World Congress of Soil Sciences, Montpellier, 20-26/08/1998, Symp. n° 28, Comm. n°801, 7 p.
- [8] 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. 20 p.
- [9] HOUGH R.L., BREWARD N., YOUNG S.D., CROUT N.M.J., TYE A.M., MOIR A.M., THORNTON I. (2004): *Assessing potential risk of heavy metal exposure from consumption of home-produced vegetables by urban populations*. *Environmental Health Perspectives*, vol. 112, n° 2, 215-221.
- [10] JOIMEL S. (2015) : *Biodiversité et caractéristiques physicochimiques des sols de jardins associatifs urbains français*. Thèse de l'Université de Lorraine. 308 p.
- [11] LAURENT C., FEIDT C., LAURENT F. (2005) : *Contamination des sols : transfert des sols vers les animaux*. ADEME, EDP Sciences, 218p.
- [12] 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*, 18 p.
- [13] 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, 124-132.
- [14] SCHWARTZ C., CHENOT É.D., DUMAT C., DOUAY F., POURRUT B., PERNIN C. (2013) : *Jardins potagers : terres inconnues ?* EDP sciences – ADEME éditions, 172 p. <http://www.ademe.fr/jardins-potagers-terres-inconnues>
- [15] 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>
- [16] SHAYLER H., MCBRIDE M., HARRISON E. (2009): *Soil Contaminants and Best Practices for Healthy Gardens*. Cornell Waste Management Institute / Cornell University. 4 p.
- [17] TORONTO PUBLIC HEALTH (2013): *"From the ground up – guide for soil testing in urban gardens"*. 25 p.
- [18] TRAVEL A., FOURNIER A., MARCHAND P., VENISSEAU A., LE BOUQUIN S., ALLAIN V., THÉBAULT A., MAHÉ A., GRAMMONT V., BADREDDINE R., JURJANZ S., FEIDT C., JONDREVILLE C. (2012) : *Transfert de polluants organiques persistants vers l'œuf de consommation : état des lieux, modalités et facteurs de risques*. *Innovations agronomiques*, 25, pp. 313-330.
- [19] TREMEL - SCHAUB A., FEIX I., (2005) : *Contamination des sols : transferts des sols vers les plantes*. ADEME, EDP Sciences, 413 p.
- [20] UNEP-IPSOS (2010) : *Enquête. Un jardin, un bien social à partager. Les français font le choix du vert*.
- [21] UNEP-IPSOS (2011) : *Enquête. Le jardin rêvé des français*.
- [22] UNEP-IPSOS (2013) : *Enquête. Jardin et espaces verts, l'exception culturelle française ?*
- [23] VON HOFFEN L.P., SÄUMEL I. (2014): *Orchards for edible cities: cadmium and lead content in nuts, berries, pome and stone fruits harvested within the inner city neighbourhoods in Berlin, Germany*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 101, 233-239.

12 NATURE EN VILLE ET ATTRACTIVITÉ DES ESPACES URBANISÉS

EN BREF

La nature en ville accroît la valeur des espaces urbains

La nature en ville, en particulier par les espaces végétalisés, accroît la valeur des espaces urbains. C'est un élément essentiel pour l'image et l'identité de la ville : elle contribue à la qualité de l'espace public, facteur déterminant pour les habitants, mais aussi pour les non-résidents, visiteurs et touristes. C'est aussi un déterminant de la qualité de vie ou qualité de ville, au sens où elle apporte du confort, un contraste reposant avec l'environnement construit, permet l'activité physique, des dynamiques sociales et la reconquête de certains quartiers. Cette qualité est également recherchée par les entreprises. Facteur d'attractivité, la nature en ville influence les choix de localisation résidentielle ou d'entreprises.



Quartier du Trapèze à Boulogne-Billancourt © Arnaud Bouissou/MEEM-MLHD

Les enjeux de l'attractivité des villes

L'attractivité abrite deux notions : l'attraction qui s'apparente à une force capable à la fois d'attirer et retenir sur place et l'attrait qui renvoie à l'idée de séduction. Ainsi, pour une ville ou un territoire, l'attractivité devient un concept mêlant la capacité à drainer des flux et à fixer durablement des ressources en un lieu (attraction effective) et la capacité à se rendre désirable, quelle qu'en soit la raison (attrait ou attraction potentielle). Depuis une dizaine d'années, l'attractivité est devenue pour les villes une notion cruciale, que l'on cherche à mesurer^[11].

L'offre de nature en ville, par exemple, est un facteur d'attractivité. Dans ce chapitre, la nature en ville est principalement représentée par les espaces ouverts végétalisés et/ou par la végétation, particulièrement étudiés en tant que facteur d'attractivité.



Les espaces verts sont devenus un critère clé pour un peu plus de 7 Européens sur 10 (72,2% pour les Français), qui estiment leur proximité « importante » ou « très importante » au moment de choisir leur lieu d'habitation^[18].



LA NATURE EN VILLE, PARTIE INTÉGRANTE DE L'HISTOIRE ET ATOUT POUR LE TOURISME ET L'IMAGE DE LA VILLE

La végétation urbaine fait partie intégrante de l'identité d'une ville, d'un quartier, qui conditionne l'attachement de ses habitants et l'attractivité du territoire.

Identité et mise en valeur historiquement liées à la végétation

La végétation témoigne de l'histoire de la ville, son implantation correspond souvent à une époque précise et certaines formes urbaines ont été conditionnées par la végétation préexistante ou ont été pensées avec la végétation. Celle-ci peut aussi relever du patrimoine naturel ou historique, constituer un élément du patrimoine architectural ou un moyen de le mettre en valeur.

Les cours, par exemple, larges et propices aux promenades, ont été introduits en France au XVII^e siècle et ont fait la renommée des villes françaises. Ils deviennent pérennes et constituent parfois le point de départ de l'extension des villes. A Aix-en-Provence, le Cours Mirabeau, né d'anciennes allées plantées des remparts, a servi d'axe de développement du nouveau quartier[16].

Un autre exemple est l'avenue des Champs-Élysées à Paris. Dessinée par André Le Nôtre au XVII^e siècle comme une allée de promenade plantée d'arbres (des ormes) afin de créer de longues perspectives et de suggérer la grandeur, elle prolonge le jardin des Tuileries et l'ouvre sur la campagne et les forêts environnantes. Après de nombreux aménagements, et toujours bordée d'arbres (des platanes), elle constitue aujourd'hui un axe central de Paris[16].

Au XVIII^e siècle, les plans de jardin classique inspirent la structure de développement des villes. A Toulouse, cinq allées plantées convergeant vers un rond-point forment la trame de l'extension urbaine, complétée par un jardin des plantes et un jardin royal[16].

À la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle, l'essor de l'acclimatation d'espèces végétales exotiques en région méditerranéenne est venu enrichir le patrimoine horticole, allant jusqu'à créer des images régionales fortes (palmiers, mimosas et eucalyptus de la Côte d'Azur)[6], comme en témoigne la promenade de Anglais ou la place Masséna plantées de palmiers à Nice.

Enfin, pour les aménagements urbains à venir, « bien choisi et bien réparti, le végétal accompagne harmonieusement les aménagements et l'histoire de la ville, il renforce son image positive en orchestrant les volumes et il peut contribuer à donner une image personnalisée de la Ville tranchant sur la normalité végétale des cités ordinaires »[2].



Place Masséna à Nice © Daniel Joseph-Reinette

Image et attractivité

La qualité de l'espace public est un facteur déterminant pour les habitants, mais aussi pour les non-résidents, visiteurs et touristes. Il semble que l'infrastructure verte ait un impact positif sur le tourisme urbain et les revenus associés[12]. Ainsi, la restauration de la rivière Cheonggyecheon à Séoul a généré une augmentation du nombre de touristes étrangers dont la contribution à l'économie locale a été estimée à environ 1,6 million d'euros par an[8].



Le label « Villes et Villages Fleuris », créé en 1959 en France, connaît toujours un grand succès. Le label a été conçu pour favoriser l'attractivité touristique et ainsi le développement économique des territoires. Perpignan utilise le label comme support de promotion auprès des touristes, des entreprises et des nouveaux administrés. Il a ensuite intégré des enjeux sociaux (c'est l'amélioration de la qualité de vie et l'enjeu social qui ont motivé Beauvais et Maisons-Alfort à s'engager dans le label) et d'écologie (le label a permis à Courbevoie de valoriser les démarches en faveur de l'écologie). Le label est devenu un outil au service de l'accueil et de l'image des communes^(a).



Le label « Villes et Villages Fleuris » mobilise 1 commune sur 3 en France.

(a) Conseil national des Villes et Villages Fleuris (Echos du CNVVF : Pourquoi devenir ville fleurie ou village fleuri ? <http://www.villes-et-villages-fleuris.com/>)

LA NATURE EN VILLE, FACTEUR DE QUALITÉ DE VIE ET DE QUALITÉ DE VILLE

De nombreux facteurs définissent notre qualité de vie, parmi lesquels la nature en ville, et notamment les espaces verts. Les espaces verts contribuent à la qualité de vie dans la mesure où ils proposent un contraste reposant avec l'environnement construit; ils favorisent également la santé mentale et la vitalité physique et permettent des rencontres[15].

Pour 96% des participants à l'enquête de BiodiverCity^(a) dans trois villes suisses, l'accès à la nature importe pour leur qualité de vie. Même si 86 % des sondés habitent dans un environnement où la nature est très présente, 41 % pensent qu'une présence encore accrue de la nature aux alentours de leur logement améliorerait encore davantage leur cadre de vie[15].

La proximité et la vision de végétation ont un effet tranquilisant et permettent une baisse du niveau de stress et d'anxiété, de l'intensité de fatigue mentale, du syndrome d'hyperactivité et de déficience d'attention chez les enfants, ainsi que du nombre de suicides et de dépressions. Ils augmentent l'état de bien-être et le sentiment de sécurité et de convivialité de la population[12 ; 14].

Ces espaces végétalisés diminuent aussi le stress, l'attention et la concentration des collaborateurs sur les lieux de travail. Cela contribuerait par conséquent à la limitation de l'absentéisme, et renforcerait la productivité des entreprises[12].



*Jeux pour enfants © Gérard Crossay/Terra
Quais de la rive gauche de la Seine*



Selon une étude américaine, le taux d'absentéisme pourrait baisser jusqu'à 10% lorsque les employés disposent de fenêtres donnant accès à la lumière du jour et offrant une vue sur la nature[7].

Les espaces verts augmentent l'activité physique des habitants : ils encouragent la pratique de la marche, du vélo, de la course à pied, les jeux pour les enfants, par exemple. Ces espaces augmentent aussi le niveau global de santé des habitants, grâce à la diminution du taux de mortalité et des maladies circulatoires par exemple, notamment chez les populations dites sensibles telles que les personnes âgées, les enfants (moins de 15 ans) et les malades.

Enfin, les espaces verts se révèlent porteurs de dynamiques sociales qui permettent de soutenir la cohésion sociale d'un quartier, le sentiment d'appartenance socio-culturelle et le sentiment de sécurité[14]. Le végétal peut ainsi être un support idéal de l'insertion sociale, comme dans le cas des jardins collectifs ou des jardins d'insertion, qui développent la solidarité, les liens communautaires, la créativité, la responsabilisation, la reconnaissance personnelle et celle des autres[19]. La nature en ville peut en outre être un levier de reconquête de certains quartiers[3], dans les projets de renouvellement urbain.



*Jardin flottant © Gérard Crossay/Terra
Quais de la rive gauche de la Seine*

(a) Etude interdisciplinaire (écologie et sciences sociales) du Programme national (suisse) de recherche « Développement durable de l'environnement construit » PNR 54, menée par L'Institut fédéral de recherches WSL, les Universités de Berne et de Zurich, le bureau d'études Studi Associati SA Lugano et la communauté de travail SWILD de Zurich, dans les villes de

Lugano, Lucerne et Zurich en Suisse. L'objectif du projet de recherche était d'identifier les besoins des habitants et de définir les facteurs clés qui influent positivement sur la qualité de vie et sur la diversité biologique en milieu urbain. L'article d'Obrist K. et al.[15] repose sur des connaissances extraites du projet BiodiverCity.



UNE ATTRACTIVITÉ PROUVÉE PAR LES ASPIRATIONS RÉSIDENTIELLES DES MÉNAGES ET LES CHOIX DE LOCALISATION DES ENTREPRISES

L'accessibilité à des espaces verts, ainsi que leur répartition, influencent les choix de localisation résidentielle (comme par exemple à Angers)[4].

L'accessibilité à la nature, sa proximité et l'importance de sa présence sont des caractéristiques paysagères privilégiées par la majorité des citoyens[15].



Pour 70% des répondants à l'enquête de BiodiverCity, la proximité des espaces verts constitue un facteur de décision dans le choix de leur lieu de résidence[15].

La contribution de la nature en ville à l'attractivité des espaces aménagés peut se mesurer à travers les prix du foncier et de l'immobilier à proximité d'espaces de nature en ville. Les prix sont influencés par des facteurs tels que la distance et la surface des espaces de nature en ville qui diffèrent selon les travaux.

A Angers sur la période 2004-2005, une première étude a permis de calculer qu'une augmentation de la densité d'espaces verts dans un rayon de 1 000 m autour d'un appartement conduit à une hausse du prix de vente moyen[5]. Plus récemment, d'autres résultats montrent que ce n'est pas la distance ou la densité qui importent, mais la superficie de l'espace vert[17]. Par ailleurs, il a été mis en évidence qu'au-delà de 200 m, l'effet des espaces verts ne s'observe plus dans le prix des logements (résultat récurrent dans la littérature scientifique)[1].



Un appartement à proximité immédiate d'un espace vert urbain vaut 17% plus cher que le même logement situé 100 m plus loin [1].

Toutefois, les espaces de nature en ville sont attrayants dans la mesure où leur proximité avec l'état naturel n'interfère pas avec l'utilité et l'accessibilité des installations. Ces

espaces, tout en évoquant la nature, doivent proposer différentes utilisations, être entretenus et facilement accessibles[15]. Dans certains cas, la proximité immédiate avec une infrastructure verte pourrait avoir un impact négatif sur le prix des logements en raison de nuisances engendrées (bruits, stationnement difficile, etc.) ou de l'éloignement aux services et commerces par exemple.

Parmi les citoyens sensibles à la présence d'espaces verts à proximité de leur logement, deux profils s'observent : ceux dont le choix résidentiel est porté vers la recherche de la « qualité de vie » au sens large (proximité des commerces, accessibilité, qualité des écoles, qualité de l'environnement social, ambiance verte contribuant à l'image et au calme du quartier, et ceux pour lesquels le choix de « nature et d'espaces verts » passe avant la proximité des commerces ou l'accessibilité en transports collectifs et qui fréquentent régulièrement les espaces verts (promenade, sport, vélo, etc.)[9].

La présence et la qualité des espaces verts est un critère de choix pour les entreprises.

À titre d'exemple, la ville de St Paul (Minnesota, États-Unis) a attiré, pour la première fois depuis 40 ans, des investisseurs privés après avoir remplacé un vieux bâtiment par un espace naturel[10]. Dans l'aire métropolitaine de Cleveland (Ohio, États-Unis), un aménagement paysager esthétique ou la présence d'arbres apportant de l'ombre sur les murs et les fenêtres de l'immeuble, font grimper les tarifs de location des bureaux de 7%, mais la proximité d'un écran d'arbres qui « ferme le paysage » a l'effet inverse[13].

La nature en ville en tant que facteur d'attractivité contribue à la valorisation des espaces urbanisés.

Focus : Projet de recherche OASIS URBAINES, TRIBU/ CASA -Olivier BALAY/ CAUE 74

Ce projet, soutenu par l'ADEME, porte sur la forme construite, le végétal, la sociabilité et la perception des lieux de tranquillité dans la ville, dans le but d'aider à la conception de lieux plaisants et confortables, espaces de ressourcement. Ces lieux, appelés « oasis urbaines » dans le projet, mêlent des rues, des bâtiments habités, une « nature », des activités sociales et des phénomènes sensibles concordants entre eux pour « apaiser » dans l'espace public comme dans son habitat. Le bien-être vient

des rencontres avec les éléments vivants, par exemple un arbre fleuri, le cri d'un oiseau, les mouvements du soleil, une brise en été qui traverse le logement. Ce sont des lieux ouverts, créant un effet de contraste avec les espaces environnants. La recherche démontre ainsi que, loin de la méthode fonctionnaliste centrée sur la fabrication des espaces en fonction des usages imaginés, la conception par l'ambiance est possible.



BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 12

- [1] AHAMADA I., FLACHAIRE E., LUBAT M. (2007) : *Prix des logements et autocorrélation spatiale : une approche semi-paramétrique*. Économie publique, (20), p. 131-145.
- [2] CADIC A., BERTRAND H., LEJEUNE D. (1997) : *La diversification végétale en pépinière ornementale : une nécessité, des moyens*. Colloques-INRA, 5-7 novembre 1997, Angers (France), pp. 285-294.
- [3] Caisse des Dépôts, Mission économie de la biodiversité (2014) : *Biodiversité et économie urbaine*. Biodiv'2050, n°5, 24 p.
- [4] CHOUMERT J. (2009) : *Analyse économique d'un bien public local : les espaces verts*. Thèse AgroCampus, 450 p.
- [5] CHOUMERT J., TRAVERS M. (2010) : *La capitalisation immobilière des espaces verts dans la ville d'Angers : une approche hédoniste*. Revue économique vol 61, n°5, p. 821-836.
- [6] DUCATILLON C., DUBOIS E. (1997) : *Diversification des plantes ornementales méditerranéennes : estimation des besoins qualitatifs des villes en arbres et arbustes*. Colloques-INRA, 5-7 novembre 1997, Angers (France), pp. 139-149.
- [7] ELZEYADI I. (2011): *Daylighting-Bias and Biophilia: Quantifying the impact of daylighting on Occupants Health*. School of Architecture & Allied Arts, University of Oregon, Eugene, OR – USA. 9 p.
- [8] GORE T., OZDEMIROGLU E., EADSON W., GIANFERRARA E., PHANG Z. (2013): *Green Infrastructure's contribution to economic growth: a review*. Final Report. Department for Environment, Food & Rural Affairs and Natural England, UK / Efec (Economic for the environment consultancy).
- [9] GUEYMARD S. (2006) : *Facteurs environnementaux de proximité et choix résidentiels. Le rôle de l'ancrage communal, des représentations et des pratiques des espaces verts*. Développement durable et territoires [En ligne]. Dossier 7, 17 p. <https://developpementdurable.revues.org/2716>
- [10] KELLY M. C.H., ZIEPER M. (2000): *Financing for the future: The economic benefits of parks and open space*. Government Finance Review, vol. 16, n° 6, pp. 23-28
- [11] La Fabrique de la Cité (2010) : *L'attractivité des villes - Étude menée de janvier à avril 2010 - Synthèse*. 24 p.
- [12] LAILLE P., PROVENDIER D., COLSON F., SALANIE J. (2013) : *Les bienfaits du végétal en ville : étude des travaux scientifiques et méthode d'analyse*. Plante & Cité, Angers, 31 p.
- [13] LAVERNE R.J., WINSON-GEIDEMAN K. (2003): *The influence of trees and landscaping on rental rates at office buildings*. Journal of Arboriculture, vol. 29, n° 5, pp. 281-290.
- [14] MANUSSET S. (2012) : *Impacts psycho-sociaux des espaces verts dans les espaces urbains. Développement durable et territoires [en ligne]*, vol. 3, n° 3, 11 p. <https://developpementdurable.revues.org/9389>
- [15] 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, 12 p.
- [16] STEFULESCO C. (1997) : *L'urbanisme végétal*. Colloques-INRA, 5-7 novembre 1997, Angers (France), pp. 101-106.
- [17] TRAVERS M., APPÉRÉ G., LARUE S. (2013) : *Évaluation des aménités urbaines par la méthode des prix hédoniques: une application au cas de la ville d'Angers*. Economie et statistique, vol. 460, no 1, p. 145-163. http://www.persee.fr/doc/estat_0336-1454_2013_num_460_1_10203.
- [18] UNEP-IPSOS (2013) : *Enquête « Jardins et espaces verts, l'exception culturelle française ? »*. 20 p.
- [19] VIAU D. (2006) : *Végétal et médiations culturelles: un enjeu social, économique et culturel*. Compte-rendu de colloque (Angers, 26-27 octobre 2004). Natures Sciences Sociétés, vol. 14, n° 2, pp. 196-198.



13 NATURE EN VILLE ET DÉPENSES PUBLIQUES

EN BREF

La nature en ville peut engendrer des dépenses, fonction des choix de végétalisation et des modes de gestion, mais elle participe à la valorisation des espaces urbanisés.

La demande de nature en ville, d'espaces de respiration ou ressentis comme tels, est souvent assortie d'une demande de nature maîtrisée, organisée, entretenue. En ce sens, répondre à cette demande peut effectivement être coûteux. Néanmoins, il existe des alternatives : espèces nécessitant peu d'entretien et d'eau, modes de gestion de ces espaces, modes de financement. La communication autour des modes de gestion auprès des habitants est essentielle pour changer les perceptions. De plus, le coût doit être intégré dans une approche globale : la nature en ville participe à la valorisation des espaces urbanisés, elle a des retombées économiques car elle peut contribuer à la diminution ou l'évitement d'autres coûts, à la création d'activités et d'emplois et à l'attractivité des territoires urbanisés.

Les enjeux en termes de finances publiques

L'objectif de réduction des dépenses publiques et les budgets contraints des collectivités en lien avec la conjoncture économique se traduisent par une baisse des moyens consacrés à différents services publics. Il est nécessaire de consacrer des moyens aux espaces de nature en ville, ne serait-ce parce que la végétation est une source potentielle de dégradation (façades, canalisations) ou de dangers (chaussées rendues glissantes à cause des feuilles mortes, chutes d'arbres).



Les municipalités allouent en moyenne 4 à 5 % de leur budget aux espaces verts^[3] et 95 % des dépenses de ce secteur sont assurées par les budgets municipaux^[4].

De plus, la nature en ville participe à la qualité du cadre de vie et à l'attractivité des espaces urbains, c'est un élément de leur valorisation^(a).



© Sophie Boisteau/Terra

L'ÉQUILIBRE ENTRE LES DÉPENSES NÉCESSAIRES ET LES DÉPENSES POUVANT ÊTRE ÉVITÉES



Les dépenses pour la gestion des espaces verts des collectivités locales françaises s'élèvent à 3,8 Md€ en 2013, en hausse de 4,8% par rapport à 2012^[6].

Les dépenses pour la gestion des espaces verts des collectivités locales françaises regroupent l'ensemble des actions d'aménagement, de restructuration et de restauration des parcs, jardins et squares publics, ainsi que les coûts relatifs à l'entretien et à l'assistance au fleurissement des villes et des villages. Ces dépenses sont majoritairement composées (à 81 %) de dépenses courantes. Les charges de personnel en représentent

(a) Pour en savoir plus, voir le chapitre 12 « Nature en ville et attractivité des espaces urbanisés »

1,8 Md€, le reste des dépenses courantes étant composé d'achat de biens et de services. Quant aux dépenses en capital, elles n'atteignent que 700 M€ en 2013 et prennent en particulier la forme d'achats de terrain et de plantations d'arbres[6].

De manière générale, une réflexion en amont d'un aménagement facilite la conception des espaces de nature en ville. Cela évite de devoir transformer un espace déjà aménagé par exemple, qui occasionnerait des coûts d'acheminement de terre et de traitement des déchets de chantier plus importants que l'aménagement en l'espace de nature en ville en lui-même.

La conception d'espaces de nature en ville nécessite du temps et des moyens financiers, pour établir un écosystème viable et robuste (analyse de sol, des potentiels de connectivité, des espèces présentes, choix d'essences locales adaptées et suffisamment variées, stratification du milieu, etc.) et pour former les futurs gestionnaires. Cependant, une conception suivant ces objectifs peut à plus long terme permettre de limiter les coûts d'entretien et de gestion (voir le paragraphe suivant : Le choix des espèces et des modes de gestion et d'entretien à moindre coût).

Par ailleurs, le coût d'acquisition du foncier par la collectivité peut être limité en jouant sur les multiples fonctions que peuvent assurer les infrastructures vertes et en mobilisant des surfaces minérales. De plus, des opportunités sont à explorer en termes de financement et de modèle économique (voir Le choix des modalités de financement).

LE CHOIX DES ESPÈCES ET DES MODES DE GESTION ET D'ENTRETIEN À MOINDRE COÛT

Le choix des espèces et des modes de gestion des espaces de nature en ville sont deux leviers permettant de maîtriser les coûts.

Le choix des espèces (ou des variétés au sein d'une même espèce) détermine les quantités d'intrants (eau, fertilisation, apport de terre végétale ou de terreau, carburant pour l'entretien, etc.) et les moyens humains pour l'entretien (taille, tonte, protection phytosanitaire, etc.) nécessaires et les coûts associés. Les espèces robustes, peu sensibles à la pollution et aux phytopathogènes^(a), les espèces endémiques, adaptées à la nature du sol et au climat et microclimat locaux, les espèces choisies en fonction des contraintes urbaines et de l'usage prévu (parc, alignement, etc.) nécessitent moins d'entretien par exemple. De plus, les choix peuvent contribuer à la mise en place d'écosystèmes fonctionnels et robustes, nécessitant moins d'entretien et d'intrants[2].

La gestion et l'entretien différenciés sont généralement moins coûteux qu'une gestion classique.

Focus sur la gestion différenciée

Mode de conception et d'entretien des espaces verts qui se démarque des méthodes traditionnelles par l'intégration du développement durable (respect de l'environnement, développement de la biodiversité, préservation des ressources, prise en compte du travail). Il doit permettre d'adapter l'entretien aux spécificités de chaque site à l'usage, à la fréquentation, à son identité

paysagère et à sa localisation. Il n'exclut pas l'entretien conventionnel et/ou horticole de certains espaces mais limite les interventions tout en leur conservant une vocation esthétique et d'accueil du public^(b)[7]. « En résumé, c'est entretenir les espaces verts autant que nécessaire mais aussi peu que possible »^(c).

La gestion différenciée limite l'utilisation d'intrants (engrais, pesticides, carburant) et peut aussi éviter l'arrosage (par un système de récupération des eaux de pluie par exemple)[1] ou limiter l'entretien (réduction du nombre de tontes dans le cas des fauches tardives). De manière générale, plus le mode de gestion est intégré en amont d'un aménagement, plus il sera facile à mettre en œuvre ; le passage en gestion différenciée d'un espace

vert n'ayant pas été conçu dans cette optique pouvant engendrer des coûts supplémentaires.



À Fécamp, la gestion différenciée des espaces verts a permis une économie de 5000€ par an sur les crédits consacrés à l'achat de produits phytosanitaires[9].

(a) Organismes (bactérie, virus, mycète, etc.), susceptibles d'infecter les végétaux et d'y déclencher des maladies, en général transmis par des organismes vecteurs tels que les insectes

(b) D'après [7] et le site internet de l'agglomération Grand Paris Sud - Seine Essonne Sénart <http://www.senart.com/environnement/gestion-differenciee-des-espaces-verts/>

(c) <http://www.senart.com/environnement/gestion-differenciee-des-espaces-verts/>



Nécessité d'information et de formation

La perception des espaces de nature en ville est liée à leur mode de gestion. Cette gestion est déterminante dans l'image du lieu, pour les citoyens, visiteurs, touristes et les services techniques des collectivités.

Les modes de gestion permettant une plus grande maîtrise des dépenses publiques (gestion différenciée, végétation en pied d'arbre) nécessitent d'être acceptés. Leur mise en œuvre entraîne la modification d'un espace et des pratiques

d'entretien, et par conséquent un bouleversement des habitudes. Des actions de communication, de sensibilisation, ainsi que de formation, sont indispensables pour que tous soient impliqués et convaincus de ces modes de gestions, voire qu'ils soient étendus aux jardins privés. Il est également important de considérer les aspects esthétiques pour éviter que « gestion différenciée » ne rime avec « espace négligé ou délaissé ».



LE CHOIX DES MODALITÉS DE FINANCEMENT

Le financement est majoritairement public, mais d'autres modalités sont envisageables, notamment les partenariats public/privé : mécénat, accompagnement public des actions développement durable d'entreprises[8].

Focus : Des opportunités de financement[2]

Le **financement participatif** pourrait être une piste pour impliquer les citoyens, bénéficiaires directs des services écosystémiques rendus par l'infrastructure verte, dans la réalisation et l'entretien de celle-ci. A titre d'exemple, la plateforme Koom a rassemblé des dons citoyens qui, abondés par Nature & Découverte, ont permis le financement d'un projet local de ruches pédagogiques.

Les **financements privés** peuvent également être mobilisés pour favoriser le développement des infrastructures vertes à biodiversité positive. Il peut s'agir d'un don, sous forme de mécénat environnemental et/ou au titre de la politique RSE (responsabilité sociétale des entreprises) de l'entreprise, consacré à l'entretien

d'espaces de nature en ville, des diagnostics écologiques, des projets de réhabilitation de friches urbaines, etc. Les obligations réglementaires telles que la compensation écologique peuvent permettre de mobiliser des fonds.

Le **contrat de Partenariat Public Privé (PPP)** offre des opportunités variées : favoriser la biodiversité et de nouveaux services écosystémiques, développer une activité économique (agriculture, écotourisme), réhabiliter des quartiers. Le montage financier peut par exemple intégrer les revenus liés à la production agricole, à l'accès payant au parc et aux autres activités touristiques. La fiscalité environnementale pourrait être mobilisée pour financer les infrastructures vertes.

LA PRISE EN COMPTE DES RETOMBÉES ÉCONOMIQUES

L'aménagement et la rénovation d'espaces de nature en ville peuvent représenter un coût. Néanmoins, ils peuvent aussi éviter des coûts plus élevés, revitaliser l'économie locale en générant des emplois, des activités, et renforcer l'attractivité du territoire. Il importe donc d'appréhender cette question de coûts d'une manière globale.

Les espaces de nature en ville offrent des services écosystémiques. Leur absence nécessite de les remplacer par une intervention et une gestion humaine et matérielle^(a). Ainsi, les volumes d'eaux pluviales qui ne sont pas gérés par la nature en ville nécessitent la construction et l'entretien des canalisations. Par ailleurs, le phénomène d'îlot de chaleur urbain, s'il n'est pas atténué par la nature en ville, impose de climatiser les bâtiments publics par exemple. Cela représente un coût direct lié à la consommation d'énergie mais aussi indirect avec l'impact environnemental qui en découle.

Les espaces de nature en ville peuvent contribuer à générer des emplois. À titre d'exemple, l'aménagement des rives d'un canal à Birmingham (Royaume-Uni), combiné au développement des abords du site, a directement impliqué le travail temporaire de 700 Equivalent Temps Plein (ETP) sur un an. Il a aussi indirectement généré 85 ETP liés aux dépenses des visiteurs et il a contribué à l'embauche de 30 ETP supplémentaires dans les entreprises commerçantes des environs^[5]. De même, la rénovation de Glasgow Green, parc urbain au centre de la ville de Glasgow (Royaume-Uni), a nécessité 200 emplois temporaires. Sur le plan des emplois permanents, l'augmentation du nombre de visiteurs, à la réouverture du parc, a justifié l'embauche de 40 personnes supplémentaires par rapport à l'effectif initial. L'activité générée dans les environs a également permis de créer 230 emplois indirects entre 1998 et 2006^[5].

Par ailleurs, le label « Villes et Villages Fleuris » génère également des retombées économiques importantes pour la filière horticole (qui emploie 150 000 personnes en France), via les achats de végétaux des municipalités, mais aussi des particuliers^[8].

Par extension, en renforçant l'attractivité des territoires, voire en les revitalisant, les espaces de nature en ville peuvent également favoriser l'arrivée d'investisseurs et d'entreprises, la fréquentation touristique, la variété des emplois et des activités associées.



Après la rénovation de Glasgow Green, parc urbain de Glasgow, 40 personnes supplémentaires ont été embauchées par rapport à l'effectif initial^[5].



En 2005, les particuliers ont dépensé 728 millions d'euros pour l'achat de végétaux d'extérieur^[8].

(a) Pour en savoir plus, voir le chapitre 14 « Nature en ville et valeur économique des espaces »





BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 13

- [1] ADEME (2015a) : *Ecosystèmes dans les territoires*, Cahier technique de l'AEU2, réf.7592.
- [2] Caisse des Dépôts, *Mission économie de la biodiversité* (2014) : *Biodiversité et économie urbaine*, Biodiv'2050 n°5, 24 p.
- [3] CNFPT (2001) : *Dossier sectoriel Espaces Verts*. Éditions du CNFPT (Centre national de la fonction publique Territoriale), Paris, 97 p.
- [4] DGCP-Ifen (2004) : *Les dépenses des communes et de leurs groupements pour l'environnement en 2002*. Direction générale de la comptabilité publique - Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, Paris, 12 p.
- [5] GORE T., OZDEMIROGLU E., EADSON W., GIANFERRARA E., PHANG Z. (2013): *Green Infrastructure's contribution to economic growth: a review*. Final Report. Department for Environment, Food & Rural Affairs and Natural England, UK / Eftec (Economic for the environment consultancy).
- [6] Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (ex-Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Énergie) (2015) : *Les comptes de l'environnement en 2013. Rapport de la Commission des Comptes et de l'Economie de l'Environnement* – édition 2015. Commissariat Général au Développement Durable, Service de l'Observation et des statistiques, décembre 2015. 196 p.
- [7] Région Pays de la Loire : *Guide vert de la gestion différenciée des espaces verts. Des idées pour agir*. 40 p.
- [8] REYGROBELLET B., *Conseil économique et social* (2007) : *La nature dans la ville : biodiversité et urbanisme*, Journal officiel de la République française, avis et rapports du Conseil économique et social, 182 p.
- [9] *Ville de Fécamp* (2009) : *Agenda 21 Fécamp*. Fiche d'information n°1 – La gestion différenciée des espaces verts à la ville de Fécamp. 4p.

14 NATURE EN VILLE ET VALEUR ÉCONOMIQUE DES ESPACES

EN BREF

La nature en ville a une valeur économique, liée aux services écosystémiques qu'elle assure.

Les espaces de nature en ville peuvent être considérés comme une réserve pour l'urbanisation, car ils représentent un foncier accessible, en particulier dans un contexte de rareté de l'espace disponible pour l'urbanisation. Cependant, les écosystèmes qu'ils abritent fournissent à l'humain des services de plusieurs ordres, et ont de ce fait une valeur économique. En raison des changements subis par les écosystèmes pour satisfaire la demande humaine en nourriture, eau douce, bois, fibre et énergie, ces services sont actuellement menacés. Pour les préserver, il faut considérer leur valeur économique. Cette valeur peut être évaluée par différents moyens, et monétarisée dans une certaine mesure. L'évaluation monétaire des services écosystémiques permet d'appréhender les espaces de nature en ville autrement que par les seuls coûts d'investissement et de fonctionnement nécessaires à leur mise en place et leur entretien.

Les enjeux de la prise en compte de la valeur des écosystèmes et des services écosystémiques portés par la nature en ville

De nombreux éléments constitutifs du patrimoine naturel n'ont *a priori* pas de valeur économique chiffrable et ne se réfèrent à aucun marché économique existant. Parmi ces éléments, les espaces de nature en ville peuvent être considérés par une municipalité comme une source de dépenses pour leur création, et une réserve foncière, un manque à gagner comparativement aux revenus directs potentiels de constructions et d'habitations[7]. En leur attribuant un prix (valeur) nul, ils ne sont pas intégrés dans l'approche économique globale. Cela conduit à une utilisation non durable de ces ressources, et un risque de distorsion dans la planification et l'aménagement de milieux urbains et péri-urbains. Les arbitrages entre protection, exploitation et transformation des milieux naturels sont déterminants[6]. Pourtant, dans ces espaces se trouvent des écosystèmes qui rendent des services ayant une valeur économique généralement non mesurée donc inconnue, et dans certains cas peuvent générer des retombées économiques^(a).



La biodiversité nous fournit en biens et en services deux fois la valeur de ce que nous produisons chaque année[9].

LA NATURE EN VILLE ACCUEILLE DES ÉCOSYSTÈMES FOURNISSEURS DE SERVICES ESSENTIELS AU BIEN-ÊTRE, MAIS MENACÉS

La nature en ville contribue à la qualité des espaces urbanisés. Plus largement, les écosystèmes, parmi lesquels ceux qui existent grâce à la nature en ville, fournissent des services essentiels au bien-être humain.

Instaurée en 2001, l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (EM ou Millenium Ecosystem Assessment) a pour objectif d'évaluer les conséquences des changements écosystémiques sur le bien-être humain. Elle doit également établir la base scientifique afin d'améliorer la conservation et l'utilisation durable de ces écosystèmes, ainsi que leur contribution au bien-être humain. Les rapports produits par l'EM présentent une évaluation scientifique de la condition et des tendances des écosystèmes dans le monde et de leurs fonctions ou services (comme fournir l'eau potable, la nourriture, les produits forestiers, les ressources naturelles, protéger contre les crues), ainsi que les possibilités de restaurer, de conserver les écosystèmes ou d'en faire une utilisation durable.

(a) Pour aller plus loin sur les retombées économiques, voir le chapitre 12 « Nature en ville et attractivité des espaces urbanisés ».



Il est supposé que le bien-être humain compte de multiples éléments constitutifs, dont :

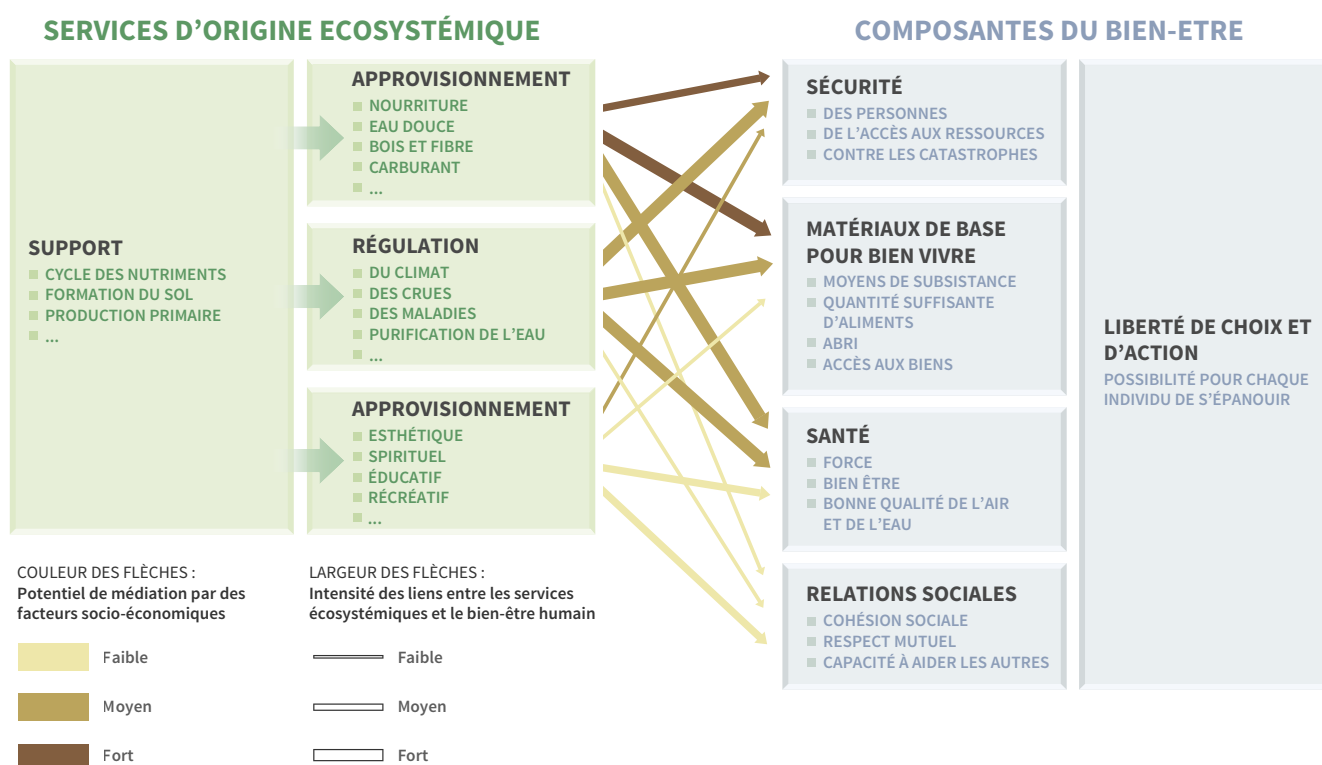
- le tissu de base pour bien vivre : moyens d'existence, disponibilité de nourriture suffisante, logement, vêtements, accès aux biens,
- la santé, dont le fait de se sentir bien et avoir un environnement physique sain (air, eau potable),
- de bonnes relations sociales,
- la sécurité, dont l'accès sécurisé aux ressources, la sécurité personnelle, la protection contre les catastrophes

naturelles ou provoquées par l'homme,

- la liberté de choix et d'action^(b).

L'intensité des liens entre les catégories de services d'origine écosystémique et les composantes du bien-être humain est variable. Le degré d'intervention possible de facteurs socio-économiques, comme le remplacement d'un service non rendu en cas d'écosystème dégradé par un produit de substitution, varie aussi (voir schéma).

Effets des services écosystémiques sur les constituants du bien-être humain. Source : Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire



Pour satisfaire la demande humaine en nourriture, eau douce, bois, fibre et énergie, les écosystèmes ont été modifiés et la biodiversité réduite. Les changements écosystémiques ont donné des gains nets substantiels en termes de bien-être humain et de développement économique. Ces gains ont cependant été obtenus à des coûts croissants, notamment celui de la dégradation de nombreuses fonctions écosystémiques, dont la pérennité est menacée^(c).

Des aménagements réalisés en réponse à la demande croissante de logement et d'infrastructures ont ainsi des impacts sur le fonctionnement des écosystèmes nécessaires à la sécurité des villes et territoires et aux maillages écologiques préexistants^[1].

Il s'agit donc d'inverser le processus de dégradation des écosystèmes, tout en répondant aux demandes croissantes des fonctions qu'ils fournissent^(d). Dans cette optique, une solution est d'objectiver et faire connaître la valeur de ces services écosystémiques afin qu'ils soient mieux pris en compte. Il convient donc d'évaluer la valeur des biens et services fournis par les écosystèmes, utiles à l'être humain mais n'ayant pas de valeur monétaire définie (prix de marché) car ne pouvant être achetés ou vendus directement^[6]. Cela permet d'accompagner les processus de prise de décision publique en matière d'aménagement, notamment sur les choix relatifs à la nature en ville.

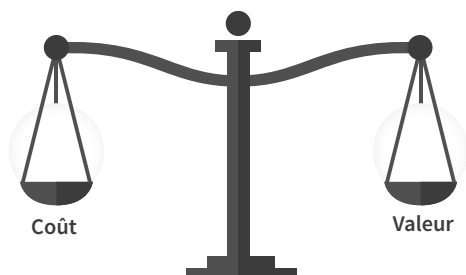
(b) <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.447.aspx.pdf>

(c) Extrait des principales conclusions de l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire (EM). <http://www.millenniumassessment.org/>

(d) Extrait des principales conclusions de l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire (EM). <http://www.millenniumassessment.org/>

LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES : UNE VALEUR À MESURER

L'évaluation monétaire ou monétarisation permet d'introduire une valeur, outil de mesure et de comparaison dans des processus décisionnels, à tous les niveaux, publics ou privés. Cette méthodologie en constante évolution mobilise fortement les économistes, les naturalistes et les entreprises[1].



L'évaluation monétaire des services écosystémiques permet d'appréhender les espaces de nature en ville autrement que par les seuls coûts d'investissement et de fonctionnement pour leur mise en place et leur entretien^(a). Les services écosystémiques qu'ils procurent ont une valeur, qui peut se mesurer par différents moyens :

- la valeur de la production (production de bois utilisable en énergie, production d'aliments dans les jardins et en agriculture urbaine ou péri-urbaine),
- par les coûts évités (par exemple : moindre consommation d'énergie pour assurer le confort thermique à l'intérieur des bâtiments^(b)),
- le consentement à payer des habitants ou des entreprises, qui choisissent respectivement un logement ou des bureaux à proximité de ces espaces^(c),

- le coût d'un dispositif artificiel pour assurer un même service (par exemple : infrastructures pour la gestion des inondations ou pour la gestion des eaux de ruissellement urbaines, installations de traitement de la pollution des eaux^(d)),
- le coût représenté par les dégâts en l'absence du dispositif naturel ou artificiel (exemples : dégâts d'inondations, soins ou arrêts maladie dans le cas de pollution des milieux ou de stress),
- les revenus liés à l'attractivité entraînant l'arrivée de nouveaux habitants et activités^(e).

On estime que 1,32 millions de tonnes de matière sèche de biomasse ligneuse sont produites annuellement par la croissance des arbres urbains des espaces publics et privés en France métropolitaine. Le menu bois d'élagage des arbres est essentiellement utilisé pour du compostage (économie d'engrais et amendement), et pourrait l'être pour produire de l'énergie[3].

Les zones humides de La Bassée, en amont de Paris, par leur fonction de zone tampon et d'expansion des crues, permettent d'économiser ce qu'aurait coûté la construction d'un barrage écrêteur de crue (200 à 300 millions d'euros)[4]

La simulation d'une plantation de 4 arbres par bâtiment dans 3 villes des Etats-Unis^(f) réduit les factures énergétiques des logements, bureaux et magasins de 1,5 à 12,8 M\$ par ville (effets cumulés de l'ombrage et de l'évapotranspiration)[8].

« Diverses études tendent à montrer que la nature urbaine présente un avantage sur le plan économique. Les bénéfices ne sont cependant pas toujours monétarisables pour des raisons méthodologiques, sans parler du questionnement éthique que suscitent ces calculs. La monétarisation des services écosystémiques se révèle, dès lors, un exercice délicat et parfois approximatif, notamment en ce qui concerne les services de régulation, de support ou encore les valeurs de non-usage, le contexte et les conditions initiales impactant fortement les résultats obtenus.

L'approche par les impacts socio-économiques permet de s'affranchir de ces limites en se concentrant sur la contribution tangible et mesurable des infrastructures

vertes à certaines composantes du développement économique local. C'est une alternative pour valoriser les services écosystémiques fournis par l'infrastructure verte, qui sous-tendent indirectement ces impacts socio-économiques.

Il s'agit, en préambule, de souligner que ces évaluations dépendent fortement du contexte local, des composantes de l'infrastructure verte et des caractéristiques de chaque milieu, qui influencent directement les impacts sociaux, économiques et environnementaux. Sur le plan environnemental, il est, par ailleurs, primordial de s'assurer du bénéfice global des installations en procédant à l'analyse de leur cycle de vie. »[2]

L'ensemble des composantes qui permettent de répondre à une exigence de bien-être des êtres humains en milieu urbain n'est pas toujours monétarisable de façon directe. Certains aspects (santé) peuvent être monétarisés,

notamment grâce aux coûts des soins (supportés par la sécurité sociale), des arrêts maladies (pris en charge par la sécurité sociale et les employeurs), voire même par la valeur d'une vie humaine. D'autres éléments de bien-être doivent

(a) Pour en savoir plus, voir le chapitre 13 « Nature en ville et dépenses publiques ».

(b) Pour en savoir plus, voir le chapitre 9 « Nature en ville et confort thermique dans les bâtiments ».

(c) Pour en savoir plus, voir le chapitre 12 « Nature en ville et attractivité des espaces urbanisés ».

(d) Pour en savoir plus, voir les chapitres 6 « Nature en ville et gestion des eaux pluviales et des inondations » et 7 « Nature en ville et lutte contre la pollution de l'eau ».

(e) Pour en savoir plus, voir le chapitre 12 « Nature en ville et attractivité des espaces urbanisés ».

(f) Baton Rouge, Sacramento et Salt Lake City.

être estimés par des méthodes indirectes qui prennent en compte les évaluations subjectives des personnes interrogées[1].

La monétarisation des services écosystémiques met en évidence que le financement d'espaces de nature en ville par les collectivités territoriales ne leur est pas toujours directement profitable, au sens où elles ne sont pas systématiquement les bénéficiaires des services rendus. A l'inverse, elles bénéficient parfois de services permis par des activités privées qu'elles n'ont pas financées. Ainsi, des pratiques mises en œuvre et financièrement supportées par les agriculteurs offrent des services de régulation des inondations ou de préservation de la qualité de l'eau potable.

Ce constat invite à s'interroger sur les modes de financement des services rendus. Différents acteurs pourraient participer au financement de la mise en place de services écosystémiques dont ils bénéficient, ou au financement de la réparation des dommages qu'ils causent à ces écosystèmes. Par exemple, Berlin aide financièrement les agriculteurs pour s'assurer d'une bonne qualité d'eau potable et évite ainsi la construction d'une usine de potabilisation des eaux. Des entités à l'origine de dégâts pourraient apporter un financement permettant la réparation de ces dégâts. Or dans le cas des pollutions générées par des entreprises ou des particuliers, les coûts de santé sont actuellement supportés par l'assurance sociale et les coûts de traitement de l'eau supportés par les consommateurs d'eau.

En savoir plus sur les gisements de bois disponibles pour des usages énergétiques

Dans un contexte où les attentes envers le bois (matériau, énergie) vont croissantes et où la multiplication des acteurs intéressés par cette matière première entraîne un risque de concurrence d'usages, il est nécessaire de quantifier de la manière la plus exhaustive et consensuelle possible la biomasse ligneuse effectivement disponible pour l'énergie en France à l'horizon 2020. Avec le soutien de l'ADEME, l'IFN, le FCBA et SOLAGRO ont réalisé en 2008-2009 une évaluation de la biomasse ligneuse supplémentaire disponible pour l'énergie à l'échelle nationale. Ce rapport d'étude contribue à l'approfondissement des connaissances sur les gisements de bois disponibles pour des usages énergétiques à l'échelle nationale.

Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020, 2009, 74 p. <http://www.ademe.fr/biomasse-forestiere-populicole-bocagere-disponible-lenergie-a-lhorizon-2020>



DES ESPACES DE VALEUR PLUTÔT QUE DES RÉSERVES

L'attribution d'une valeur aux espaces de nature, en particulier les espaces de nature en ville et les espaces ouverts, aux alentours des zones urbanisées, permet de

ne pas considérer ces espaces comme une réserve pour l'urbanisation, et donc de maîtriser l'étalement urbain, à condition de maîtriser aussi les prix du foncier.

« La ville doit pouvoir évoluer, changer, s'adapter pour être plus durable. Pour répondre à la nécessité de construire des logements dans les territoires en croissance démographique sans accentuer la périurbanisation, l'augmentation de la densité en milieu urbain constitue une réponse partagée majoritairement par les urbanistes. Elle ne convainc cependant ni la population, qui aspire au logement individuel et assimile la densité urbaine au mal-vivre, ni les élus, à l'écoute de la demande sociale et attachés au libre développement de leur commune. C'est pourquoi il convient d'éclairer le

débat en soulignant que l'augmentation de la densité de l'habitat - non de la population -, qui doit aller de pair avec la qualité de conception et de réalisation architecturale, libère de l'espace au sol qui devient ainsi disponible pour l'aménagement d'espaces verts. La nature devient ainsi un élément de valorisation de la ville dense. La prise de conscience des services écologiques rendus par la nature à la ville revêt une importance particulière. Élargissant l'image traditionnelle et finalement réductrice de la nature dans la ville, ils illustrent une réalité plus vaste et plus complexe, celle de la ville dans la nature[10]. »



BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 14

- [1] BALEZ A., REUNKRILERK J. (2013) : *Ecosystèmes et territoires urbains: impossible conciliation ?* Développement Durable et Territoires, juillet 2013 (Volume 4-n°2)
- [2] Caisse des Dépôts, *Mission économie de la biodiversité* (2014). *Biodiversité et économie urbaine*, Biodiv'2050 n°5, 24 p.
- [3] COLIN A., THIVOLLE-CAZAT A., COULON F., COUTURIER C. (2009) : *Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020*, Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par l'Inventaire Forestier National (IFN), avec l'Institut Technique Forêt Cellulose Bois Ameublement (FCBA) et l'association SOLAGRO, Contrat n°0601C0134, 74p + annexes.
- [4] DRON D. (2007) : Intervention rapportée dans les actes de l'audition publique du 28 mars 2007 « *La Biodiversité : l'autre choc* » organisée par MM. Les sénateurs Pierre Laffitte et Claude Saunier. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, pp 47-50.
- [5] *Evaluation des écosystèmes pour le millénaire* (2005) : *Ecosystems and human well being* ; Résumé à l'usage des décideurs ; site internet <http://www.millenniumassessment.org/> (dernière consultation en août 2016)
- [6] Fondation David Suzuki et Nature-Action Québec, DUPRAS J., MICHAUD C., CHARRON I., MAYRAND K. et REVERET J.-P. (2013) : *Le capital écologique du Grand Montréal : Une évaluation économique de la biodiversité et des écosystèmes de la Ceinture verte*, Rapport préparé par le Groupe AGÉCO pour la Fondation David Suzuki et Nature-Action Québec, 61 p.
- [7] GUEYMARD S. (2006) : *Facteurs environnementaux de proximité et choix résidentiels. Le rôle de l'ancrage communal, des représentations et des pratiques des espaces verts*. Développement durable et territoires [En ligne]. Dossier 7, 17 p. <https://developpementdurable.revues.org/2716>
- [8] KONOPACKI S., AKBARI H. (2000) : *Energy savings calculations for urban heat island reduction strategies in Baton Rouge, Sacramento and Salt Lake City*. Proceedings of the 2000 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, vol. 9, Pacific Grove (CA), p. 215.
- [9] MEEM (2016). *Projet de loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages*. Brochure, 24 p.
- [10] REYGROBELLET B., *Conseil économique et social* (2007) : *La nature dans la ville : biodiversité et urbanisme*. Journal officiel de la République française, avis et rapports du Conseil économique et social, 182 p.



DES OUTILS POUR AMÉNAGER AVEC LA NATURE EN VILLE

La caractérisation des effets environnementaux, sanitaires et économiques de la nature en ville et des conditions dans lesquelles ces effets se réalisent permet de définir des ambitions précises pour un aménagement favorable à la nature en ville. Des ressources sont indiquées par chapitre. Des orientations générales sont proposées dans d'autres publications de l'ADEME.

Sur les sols

La ressource sol est limitée, fragile et difficilement renouvelable alors même que les sols rendent de nombreux services : ils nous nourrissent, nous habillent, nous chauffent, régulent et filtrent nos eaux, sont le socle de nos paysages et de nos villes... Le sol a également un rôle majeur dans la lutte contre le changement climatique.

Cette brochure fait le point sur les enjeux liés aux sols, à leur gestion et sur les actions possibles à mettre en œuvre par chaque acteur - administrations, collectivités, aménageurs territoriaux, entreprises et monde agricole - pour leur préservation et l'amélioration de leurs qualités.

Les sols portent notre avenir, éd. ADEME Connaître pour agir 2015, 16 p. Réf. 8387 <http://www.ademe.fr/sols-portent-avenir>



Sur l'approche écosystémique dans l'urbanisme

L'AEU2 - L'urbanisme durable, développée par l'ADEME, est une démarche d'aide à la décision et d'accompagnement qui permet de répondre aux enjeux de l'urbanisme durable de manière partagée avec l'ensemble des acteurs d'un projet d'aménagement et de planification (maîtrise d'ouvrage, AMO, maîtrise d'œuvre...).

L'AEU2 est aussi un corpus d'outils. *Le cahier Ecosystèmes dans les territoires* (ADEME, réf. 7592) est un appui opérationnel complémentaire au guide méthodologique de l'AEU2 *Réussir la planification et l'aménagement durables* (éd. du Moniteur 2013, réf. ADEME 7586) et son nouveau volet « Les écosystèmes » (éd. du Moniteur 2016, réf. ADEME 8619).

A destination des professionnels (urbanistes, architectes, bureaux d'études, techniciens des collectivités), il aide les parties prenantes des projets d'urbanisme et d'aménagement à intégrer la biodiversité, les sols, les espaces naturels, les espaces artificialisés aménagés pour créer de la nature en ville, l'agriculture urbaine et périurbaine dans les projets.

Ecosystèmes dans les Territoires, Cahiers techniques de l'AEU2 - Réussir la planification et l'aménagement durables, éd. ADEME 2015, 128 p. Réf. 7592 <http://www.ademe.fr/ecosystemes-territoires>



NOTES

[illegible]

L'ADEME EN BREF

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

www.ademe.fr

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



AMÉNAGER AVEC LA NATURE EN VILLE

Préserver, développer, restaurer la nature en ville, tant de défis au cœur des projets d'aménagement.

La nature en ville est entendue dans cet ouvrage comme l'ensemble des espèces vivantes en zone urbanisée ainsi que leur milieu de vie.

Les pratiques visant à favoriser l'introduction et le renforcement de la nature en ville dans l'aménagement urbain s'appuient sur de nombreux principes souvent issus du bon sens et parfois d'idées préconçues. Ces principes peuvent parfois manquer d'une approche quantifiée des effets environnementaux, sanitaires et économiques de la nature en ville.

Il s'agit donc de dépasser les intuitions sur les opportunités et les contraintes de la nature en ville, en donnant des clés de compréhension des phénomènes en jeu et des conditions dans lesquelles ils se produisent ainsi que des ordres de grandeur chiffrés pour caractériser les effets environnementaux, sanitaires et économiques de la nature en ville.

Destiné notamment aux services techniques des collectivités et complémentaire d'orientations proposées par ailleurs pour un aménagement favorable à la nature en ville, cet ouvrage donne le point de vue de l'ADEME sur des effets de la nature en ville pour différents enjeux liés à l'aménagement urbain : la biodiversité, la qualité de l'air, la qualité des sols, l'ambiance sonore, la gestion de l'eau, le confort thermique, la concentration en gaz à effet de serre, l'alimentation, l'attractivité des espaces urbanisés et l'approche économique.

ADEME

Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

www.ademe.fr

ISBN 979-1-02971-180-0

010658



9 791029 711800