Mémoire Bibliographique (SBAET0B)

L’arbre en milieu urbain, histoire et perspectives :

Les contraintes et les services rendus par l’arbre urbain

Commande par Sylvain Girodon, CREPAN

BESRY Alexandre

Professeur référent : Frédéric Meuriot

2022/2023

Table des matières

Table des matières *3*

1 Typologie de l'arbre urbain *7*

La ville, un milieu hostile pour l'arbre *9*

1.1 Le sol des villes **9**

1.1.1 La compaction et l'imperméabilisation 9

1.1.2 Contraintes physiques du sol urbain 13

1.1.3 La pollution 13

1.1.4 Disponibilité des nutriments 17

1.2 L'environnement aérien **17**

1.2.1 Chocs et blessures 19

1.2.2 La lumière 21

2 Les services rendus dans le cadre du réchauffement climatique *21*

2.1 Limiter les îlots de chaleurs **21**

2.2 La séquestration du CO2 atmosphérique **25**

Conclusion *29*

Bibliographie *32*

Résumé : *36*

Abstract : *36*

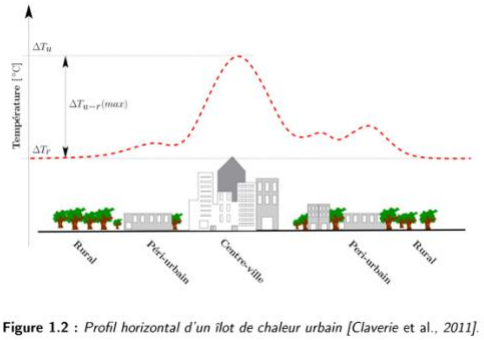


Figure 1.2 : *Profil horizontal d'un îlot de chaleur urbain [Claverie* et al., *2011].*

Figure 1 : Profil horizontal d'un îlot de chaleur urbain (Leconte, n.d.)

Matériau	Albédo (-)	Emissivité (-)
Sols	0.05 - 0.40	0.90 - 0.98
Herbe	0.16 - 0.26	0.90 - 0.95
Champs agricoles	0.18 - 0.25	0.90 - 0.99
Forêts	0.15 - 0.20	0.97 - 0.98
Eau	0.03 - 0.10	0.92 - 0.97
Neige	0.30 - 0.45	0.92 - 0.97
Zone urbaine	0.10 - 0.27	0.85 - 0.96
Moyenne zone urbaine	0.15	0.95

Figure 2 : Valeurs d'albédo et d'émissivité pour différents matériaux urbain et naturel (Leconte, n.d.)

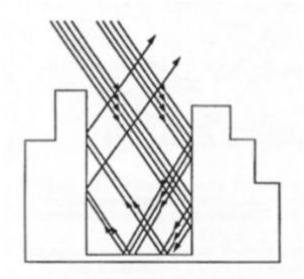


Figure 3 : Illustration du phénomène de piégeage radiatif dans le cas d'une rue canyon. (Leconte, n.d.)

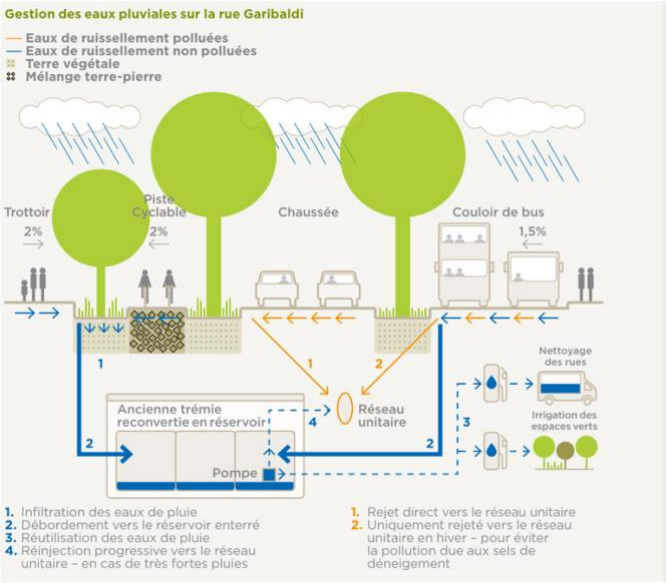


Figure 4 : Schéma du cycle de l'eau en milieu urbain, exemple de la rue Garibaldi (Paris) (James *et al*, 2016)

Introduction

Les arbres en milieu urbain descendent d'un héritage transmis à travers les siècles et font partie du patrimoine culturel. Lors de la période médiévale, et bien que les villes de cette époque soient constituées de rues sombres, étroites et avec des bâtisses hautes, des arbres monumentaux se dressent seuls au milieu de places (Mathis & Pépy, 2017). Lors de la renaissance, la ville s'ouvre sur l'extérieur et les alignements d'arbres prennent de plus en plus d'importance si bien qu'à partir du XVIIe siècle, le végétal est ainsi organisé de manière scénarisée. Les jardins, les promenades et autres ornements sont alors mis au service du bien commun pour le bonheur de citadins toujours plus nombreux (Mathis & Pépy, 2017). À partir du XVIIIe siècle, on continue à assainir le milieu urbain et on poursuit la mise en place des boulevards, des promenades, des esplanades, des quais et des canaux. Le Second Empire a apporté ensuite une dimension plus importante à l'aménagement urbain. On le modernise et on végétalise l'espace public, ce qui a conduit à une hiérarchisation des espaces de vie à partir de leurs fonctionnalités : grandes réserves et paysages protégés, parcs suburbains… La prise de conscience de l'impact écologique et l'émergence des préoccupations environnementales arrive assez récemment, dans les années 1980. Durant tous ces siècles, la ville n'a pas cessé d'évoluer, mais les conditions de vie des arbres se sont très peu améliorées voire elles se sont parfois dégradées.

Le milieu urbain est en effet très contraignant pour les arbres. Les températures sont de 2 à 4 °C au-dessus de celles du milieu rural environnant (fig. 1) (Stefulesco, 1993) à cause des matériaux utilisés, qui ont un faible albédo (ils absorbent beaucoup les rayons du soleil et se réchauffent fortement) par rapport au milieu naturel (fig. 2), de la chaleur résiduelle des bâtiments et de la structure en canyon des villes (fig. 3) (Meyer, 1991). Le milieu urbain possède son propre cycle de l'eau (fig. 4). L'imperméabilité des matériaux perturbe également celui-ci. L'eau de pluie est soit rapidement évacuée par ruissellement, soit par évaporation (5 à 20 % plus élevée par rapport au milieu rural) (Marsalek *et al.*, 2007 ; (Geiger *et al.*, 1987). La pollution est causée par la forte activité anthropique qui relargue des composés issus de la combustion de matières fossiles tels que l'ozone, qui oxyde les déchets végétaux en diminuant leur disponibilité pour l'écosystème souterrain (Stefulesco, 1993), ce qui vient perturber le cycle du carbone. Cependant, la ville devient l'un des enjeux du développement durable. Les marqueurs du dérèglement climatique (canicules, déficits hydriques…) deviennent de plus en plus présents. L'augmentation des températures est estimée à 0,1 °C par décennie, ce qui donne une augmentation moyenne de la température globale de 1,5 à 2 °C au niveau planétaire selon les projections d'ici à 2100.

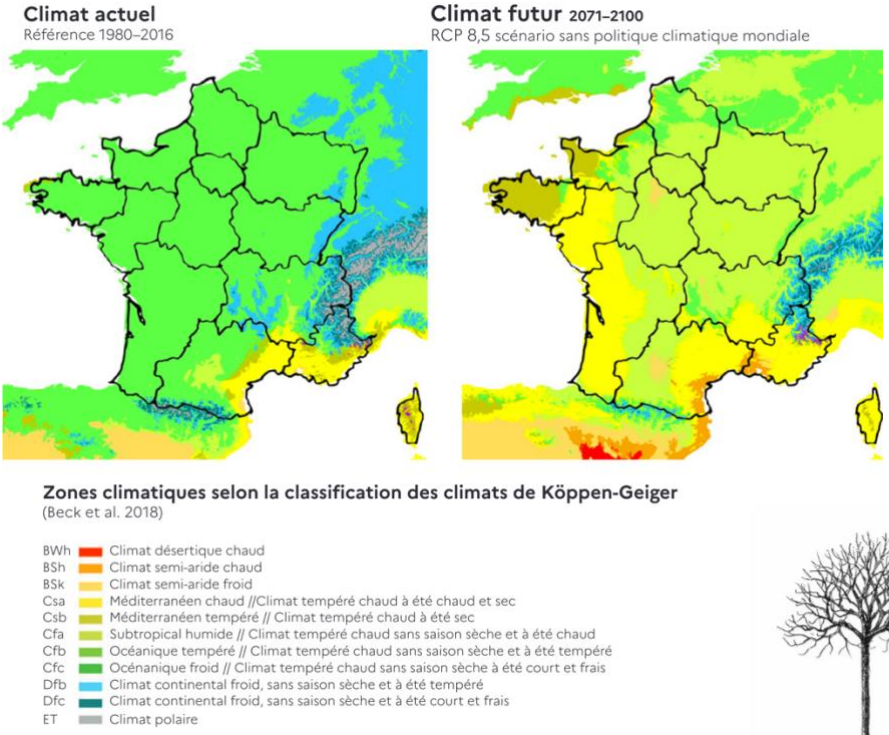
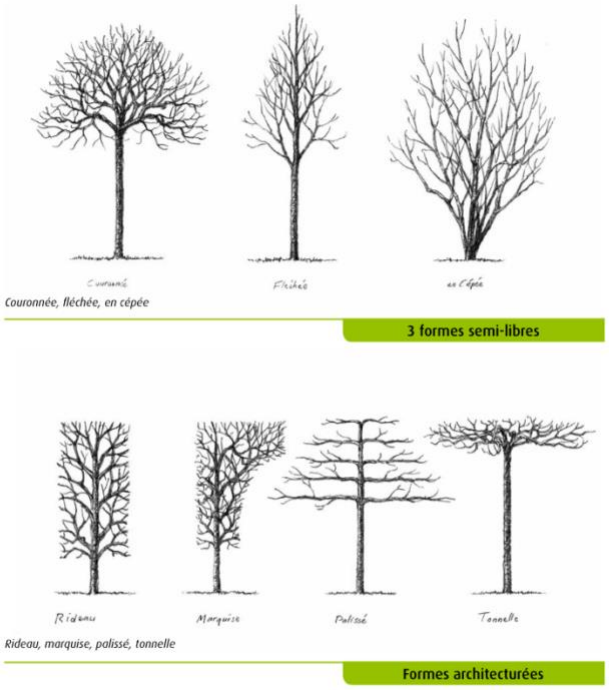


Figure 5 : Scénario d'évolution du climat sur le territoire métropolitain en 2100



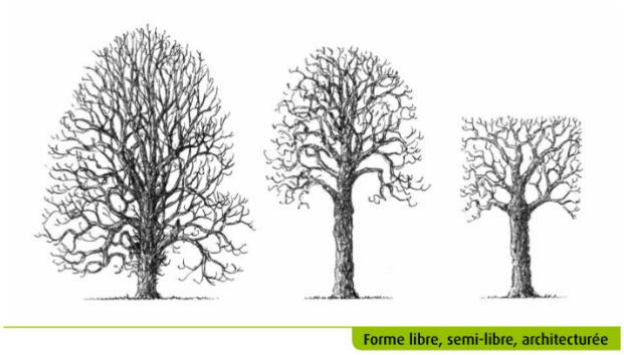


Figure 6 : Différentes formes de l'arbre en ville (Vauvert & Portero, 2014)

Figure 7 : Différents types de tailles pour la forme semi-libre et architecturée (Vauvert & Portero, 2014)

Figure 8 : Taille architecturée en rideau à gauche ; taille architecturée en tête de chat à en haut (Vauvert & Portero, 2014)

Le climat en France passerait d'océanique tempérer à subtropical humide, voir méditerranéen tempéré en Normandie (fig. 5) (Michel & Brun, 2019) (Houghton et al., 1996). L'ensemble de ces perturbations environnementales ont et vont exercer un impact majeur sur l'arbre en milieu urbain. Cependant, les arbres rendent plusieurs services écosystémiques comme le bien-être physique et mental des citoyens, un support pour la biodiversité… Ils rendent également un service de régulation, car ils sont capables de diminuer la température ambiante et apportent un confort thermique. Grâce à la photosynthèse, ils captent et stockent le carbone atmosphérique. Ils peuvent aussi capter d'autres polluants soit avec leurs racines (ce qui peut en faire des indicateurs de pollution du milieu) soit par déposition de particules fines sur leurs feuilles. Leurs racines participent aussi au maintien et à la structure du sol. Ceci place donc l'arbre au cœur du plan d'action pour limiter les effets du dérèglement climatique en ville. Dans ce contexte, cela nous amène à nous demander comment les arbres répondent aux contraintes et aux enjeux du milieu urbain. Après avoir réalisé un bilan de la typologie de l'arbre urbain, nous verrons tout d'abord les principales contraintes auxquelles les arbres font face en milieu urbain (toutes les contraintes ne seront pas développées). Nous verrons ensuite de quelle manière les arbres rendent des services de régulation et pour cela, nous nous focaliserons sur le refroidissement urbain et la captation du CO2 qui sont deux paramètres majeurs dans le contexte de dérèglement climatique.

1 Typologie de l'arbre urbain

L'arbre des villes se retrouve dans de nombreuses configurations en fonction de l'utilisation que l'on souhaite avoir. Les arbres sont principalement gérés par la coupe. Il existe 3 grandes classes de taille : la forme libre, la forme semi-libre et la forme architecturée (fig. 6) (Vauvert & Portero, 2014). La forme libre se retrouve principalement en milieu naturel. Pour la forme semi-libre, il existe 3 dispositions fréquentes : couronnée, fléchée, en Cépée. Pour la forme architecturée, il existe 6 dispositions fréquentes : le rideau, en marquise, palissé, en tonnelle, en têtard et en tête de chat (fig. 7 ; 8). Les gestionnaires en milieu urbain vont privilégier la forme semi-libre ou architecturée. En forme semi-libre, les principales opérations sont la taille de formation et la taille d'entretien. En forme architecturée, agencer la formation sur les plus jeunes sujets et très importante. La gestion doit être continue et régulière tout au long de la vie de l'arbre.

En milieu urbain, les arbres sont présents dans différents dispositifs. Ils servent soit l'architecture du lieu, soit pour répondre à une contrainte (l'ensoleillement l'été) (urbanisme végétal).

Il existe donc différentes typologies d'arbres pour répondre aux différents besoins. Il y a les alignements d'arbres, les arbres des parcs et jardins, les arbres remarquables, les boisements, les vergers et les haies.

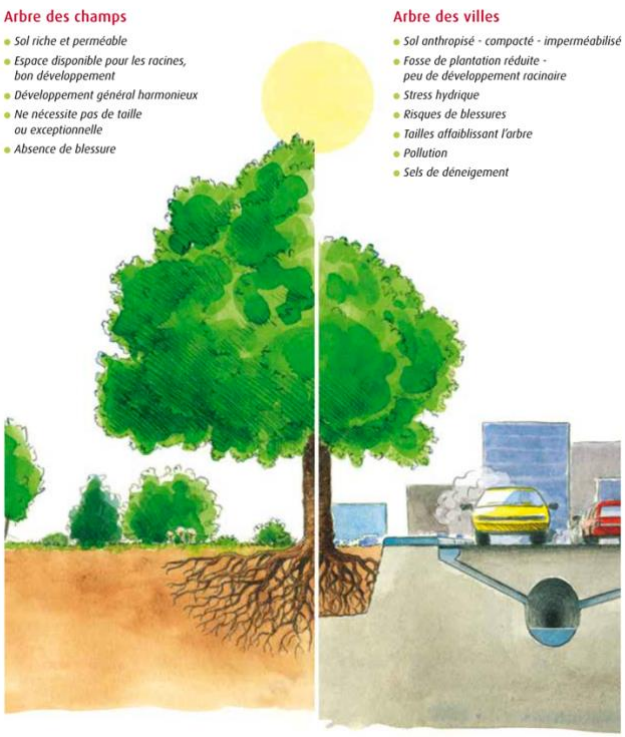


Figure 9 : Dessein récapitulatif des différences entre le milieu rural et le milieu urbain (Gourrierec, 2012)

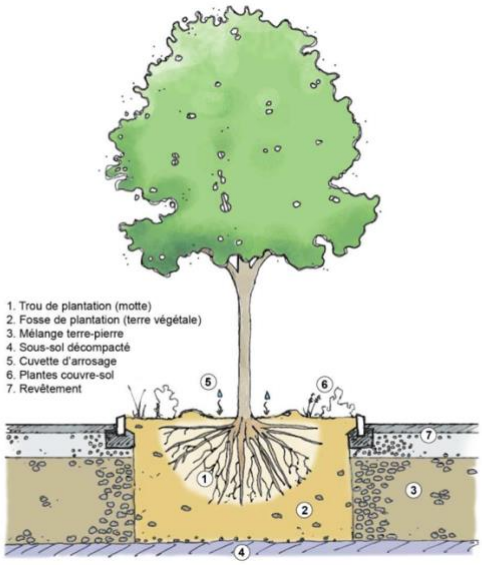


Figure 10 : Coupe de principe d'une fosse de plantation avec un mélange terre-pierre (Gourrierec, 2012)

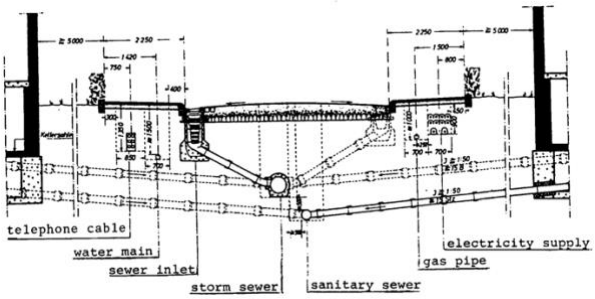


Figure 11 : Illustration des différents éléments présents dans le sol (Geiger *et al.*, 1987)

La ville, un milieu hostile pour l'arbre

L'arbre est donc présent dans deux nombreuses infrastructures de la ville dans un but utilitaire. Or, à la différence du milieu naturel, la ville est un milieu hostile et contraignant pour l'arbre ce qui limite la capacité des arbres à remplir les missions qui lui incombe. On retrouve une pollution de l'air et des sols, une mauvaise alimentation en eau, des dégradations intentionnelles ou accidentelles envers l'écorce ou les branches. Dans le milieu urbain, l'air est plus sec, l'ensoleillement souvent trop direct, mais aussi parfois trop faible. Les sols peuvent être inhospitaliers : tassés, compacts, trop filtrants, pauvres, pollués (fig.9)…

1.1 Le sol des villes

Le sol est l'une des principales surfaces d'interaction de l'arbre avec son environnement. Celle-ci se fait par l'intermédiaire des racines. Elles remplissent trois grandes fonctions : l'alimentation en eau et en éléments minéraux, l'ancrage dans le sol et le stockage d'une partie de leurs réserves (Gourrierec, 2012). Pour qu'un arbre soit en bonne santé, il doit y avoir un bon équilibre entre les parties aériennes et racinaires. Or en ville, cette balance est déstabilisée soit par la taille des parties aériennes, soit par l'espace prévu dans la fosse de plantation (fig. 10) (Gourrierec, 2012). En effet, les horizons des sols en ville sont établis de manière hétérogène à cause des perturbations humaines et des matériaux de remplissage (terre végétale, terre de remblais, réseaux) (Gourrierec, 2012). Le sol est souvent dégradé par la présence d'artéfacts, des substrats technologiques (fig. 11), le compactage mécanique et le piétinement humain (Yang and Zhang, 2015). D'autres facteurs comme la sécheresse, l'engorgement, le salage, les carences minérales ou encore l'imperméabilisation des sols apportent également des problèmes aux plantations d'arbres des villes (Gourrierec, 2012).

1.1.1 La compaction et l'imperméabilisation

L'effet combiné de l'urbanisation, de l'industrialisation et de la croissance démographique modifie énormément les caractéristiques du sol, ce qui a des conséquences sur le cycle normal naturel de l'eau rendant celui-ci plus complexe (fig. 4). Bien qu'il y ait deux sources principales d'eau dans le milieu urbain avec les précipitations et l'eau dite municipale (c'est-à-dire l'eau acheminée par divers procédés) (Marsalek *et al.*, 2007), ce milieu possède une très faible disponibilité en eau par rapport au milieu rural (Leconte, no date). En effet, les matériaux utilisés pour la construction ou pour recouvrir les sols sont globalement imperméables. Ils peuvent réduire le taux d'infiltration de 70 à 99 % (Gregory *et al.*, 2006).

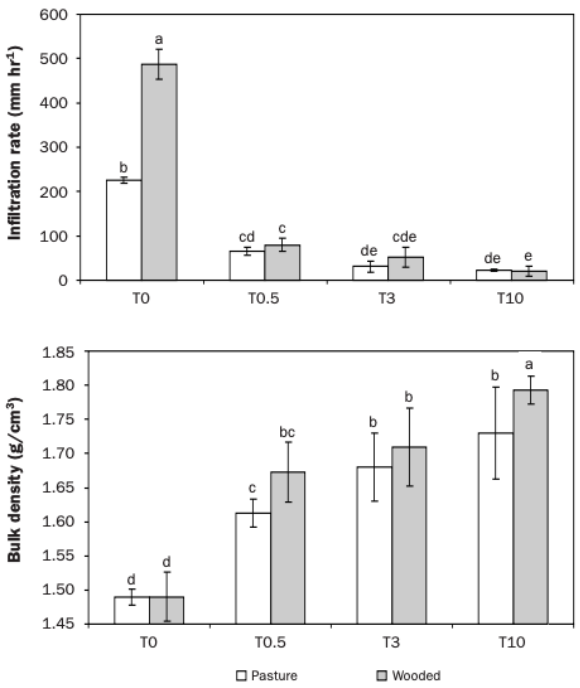


Figure 12 : Mesures moyennes du taux d'infiltration et de la densité apparente à partir d'un pâturage et naturellement terrain boisé. T0, T0.5, T3 et T10 représentent des traitements de compactage de 0, 0,5, 3 et 10 minutes avec un appareil de compactage portable. (Gregory et al., 2006)

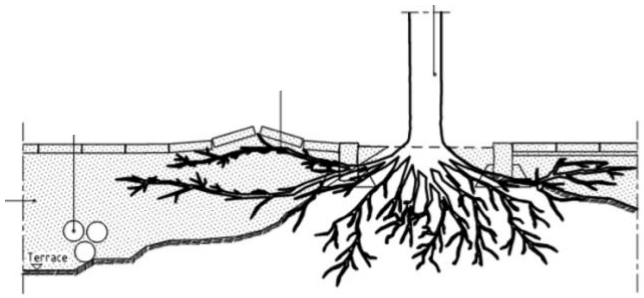


Figure 13 : Schéma d'une section problématique typique autour d'un arbre mature. (James *et al*, 2016)

L'eau est donc rapidement évacuée ou évaporée (Geiger *et al.*, 1987). Ensuite, le compactage du sol réduit ses espaces poreux (Craul, 1992) ce qui diminue la disponibilité en eau par la réduction de sa capacité d'infiltration et de rétention (fig. 12) (Yang and Zhang, 2015).
Comme les matériaux utilisés bloquent la circulation de l'eau, des systèmes de drainage sont disposés dans les fosses de plantation des arbres. Il arrive parfois que ces systèmes soient inadaptés ou inefficaces. Ainsi, lorsque les conditions de drainage ne sont pas suffisantes, l'eau peut se retrouver en excès, inondant la fosse ce qui crée des conditions anaérobies fatales pour les racines (James *et al.*, 2016)
(Gourrierec, 2012). Cette inondation du sol entraine une croissance racinaire
considérablement réduite et la mort de nombreuses racines absorbantes fines (Watson *et al.*, 2014). Il arrive aussi que ce système de drainage soit trop efficace, réduisant d'autant plus un réapprovisionnement hydrique déjà difficile. Il y a donc une perturbation de la recharge en eau des sols de plantations (Gourrierec, 2012) et c'est un problème majeur pour l'arbre en ville. Le stress hydrique est le facteur qui influence le plus négativement la croissance et le fonctionnement des arbres (Close, Nguyen and Kielbaso, 1996).

Une autre conséquence du compactage du sol, associé à la dégradation structurelle et à la perte de porosité, est le blocage des échanges gazeux par les racines (C. Y Jim, 1998). L'oxygène atmosphérique ne pénètre plus dans l'horizon supérieur du sol et le CO2 produit par les racines par respiration ne peut pas non plus facilement s'échapper vers l'atmosphère (James *et al.*, 2016). Toutes les contraintes que nous venons d'évoquer poussent les racines à chercher le peu de zones de porosité, ce qui amène l'arbre à dépenser plus d'énergie dans ses racines au détriment du développement de ses parties aériennes. Cette surprospection provoque alors bien souvent des dégradations dans les infrastructures urbaines (fig. 13) (Mullaney, Lucke and Trueman, 2015).

Figure 14 : photographie de l'intérieur d'un sol urbain, Professeur Kai Bong, Université de Birmingham (James *et al*, 2016)

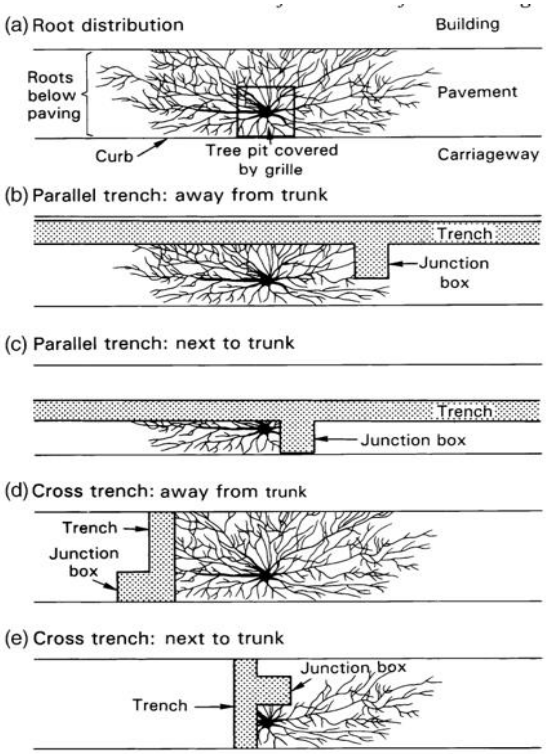


Figure 15 : Schéma de la distribution confinée et asymétrique des racines des arbres sous la chaussée dans les zones urbaines compactes (Jim, 2003)

Tableau I : relation générale entre la densité apparente du sol et la croissance des racines en fonction de la texture du sol (Watson et al., 2014)

Soil texture	Ideal bulk densities (g cm^{-3})	Bulk densities that may affect root growth (g cm^{-3})	Bulk densities that restrict root growth (g cm^{-3})
Sands, loamy sands	<1.60	1.69	>1.80
Sandy loams, loams	<1.40	1.63	>1.80
Sandy clay loams, clay loams	<1.40	1.60	>1.75
Silts, silt loams	<1.30	1.60	>1.75
Silt loams, silty clay loams	<1.10	1.55	>1.65
Sandy clays, silty clays, some clay loams (35%–45% clay)	<1.10	1.49	>1.58
Clays (>45% clay)	<1.10	1.39	>1.47

1.1.2 Contraintes physiques du sol urbain

L'autre conséquence de la perturbation de la structure naturelle du sol est la présence de nombreux obstacles au développement des racines (fig. 14). On retrouve ainsi les canalisations, les lignes électriques, les conduites de gaz, les lignes téléphoniques ou encore la fibre pour internet (fig. 11). Il y a également les réseaux des eaux usées et les lignes de métro (Stewart and Scullion, 1989). Cet ensemble de contraintes entrave la croissance racinaire, rendant l'enracinement difficile et peu efficace lorsqu'un espace d'enracinement suffisant n'est pas prévu (Chi Yung Jim, 1998; Logsdon, Sauer and Shipitalo, 2017). De plus, le compactage limite voir contraint la croissance racinaire en fonction de son degré de compaction, celui-ci varie en fonction de la composition et des caractéristiques physiques (Tableau I), il forme aussi une plage allant de 20 à 30 cm de profondeur qui vient limiter la profondeur d'enracinement (Gregory *et al.*, 2006). Cela empêche la croissance des racines vers le bas, malgré l'épuisement de l'eau ou des nutriments dans les sols de surface.

Cette barrière bride la capacité des systèmes racinaires des arbres à réagir aux périodes de sécheresse et de forte humidité (Watson *et al.*, 2014). Les espaces d'enracinement peuvent de la même façon contenir des barrières contraignant le développement racinaire qui peuvent nuire à la santé des arbres (fig. 15) (James *et al.*, 2016).

1.1.3 La pollution

Les sols des villes sont extrêmement pollués par de nombreux éléments d'origine anthropique. On retrouve les herbicides, métaux lourds, gaz ou huiles (Gourrierec, 2012). Les métaux lourds tels que le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le plomb (Pb) et le mercure (Hg) y sont très présents (Yang and Zhang, 2015). Ils peuvent provenir des matériaux utilisés dans les remblais ou la construction, de l'usure des disques de frein des voitures, des pneus, de la combustion des moteurs… (Sager, 2020) (C. Y Jim, 1998).

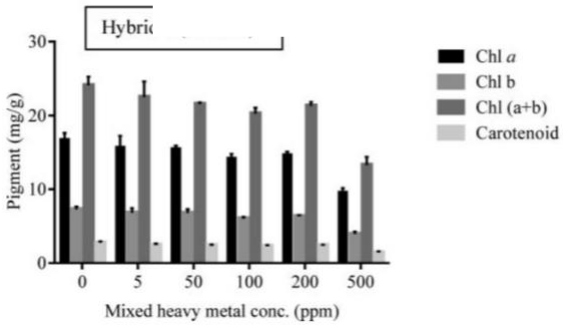
On retrouve aussi des polluants organiques, issus des processus incomplets de combustion aussi bien au niveau domestique (gaz d'échappement automobile, chauffage individuel, fumée de cigarette…) qu'industriels (fumées d'incinération, sidérurgie, raffinerie de pétrole, centrale électrique thermique, fumées de bitume…) (Schroeder, 2010). Il y a également, les éléments du groupe du platine, en particulier le platine, le palladium et le rhodium des catalyseurs d'échappement des automobiles, s'accumulent également dans les sols (Yang and Zhang, 2015). On retrouve aussi le sel utilisé sur les routes l'hiver ou encore les produits phytosanitaires bien que ceux-ci soient de moins en moins employés. Un des autres effets pervers de la perturbation du cycle de l'eau et de l'imperméabilisation est l'accumulation de la pollution à la surface du sol. L'eau vient s'y écouler en emportant et concentrant.

Tableau II : Concentration en éléments (ppm D W), production de matière sèche et longueur moyenne des racines de semis d'épicéa de Sitka après 100 jours de croissance dans un sol gley tourbeux contaminé par du Cadmium (Cd) et Plomb (Pb), pH 3,3 (Kahle, 1993)

		Element concentration		Root parameter		
		Soil concentration				
Element	Conc. added (ppm)	Total (ppm)	Extractable (ppm)	Root conc. (ppm)	Root DW (mg/ plant)	Root length (cm)
Cd	0.0			2.0	5.32	13.07
	0.1	0.54	0.00	27.1	4.62	10.41
	0.4	0.83	0.19	24.3	4.11	9.51
	1.0	1.57	0.30	33.9	5.90	12.23
	2.0	2.50	0.30	60.6	2.89	5.33
	4.0	3.93	1.03	93.4	3.70	7.17
	8.0	8.40	2.02	134.9	3.20	8.27
	16.0	17.33	3.70	164.8	2.93	5.71
Pb	0.0			67.2	5.32	13.07
	5.0	34.2	0.8	88.3	3.68	7.72
	10.0	40.0	1.3	126.8	4.35	9.58
	25.0	47.9	1.7	228.2	4.89	7.70
	50.0	70.8	2.5	283.3	5.13	8.14
	100.0	141.0	6.6	444.8	3.87	6.58
	200.0	183.4	11.7	477.2	4.10	7.11
	400.0	435.0	24.6	1220.5	2.20	2.95

Tableau III : Nombre de racines latérales (perplant) de divers ordres, pourcentage de racines courtes (longueur < 2 mm) parmi toutes les racines, longueur de la racine primaire non ramifiée (mm) et densité des poils absorbants des semis de Fagus sylvatica, cultivés pendant 40 jours dans des chambres d'observation des racines avec Sol forestier contaminé au Pb (Kahle, 1993)

Root character	3	10	24	44	283
Number of laterals of					
first order	110	87	70	47	4
second order	127	195	189	180	1
third order	2	1	10	14	0
Total number of laterals	239	283	269	241	5
Percentage of short roots	37	30	44	47	54
Length of unbranched primary root (mm)	36	38	33	24	6
Density of root hairs					
high	85	96	80	24	0
medium	15	4	16	36	0
low	0	0	4	37	0
no root hairs	0	0	0	3	100



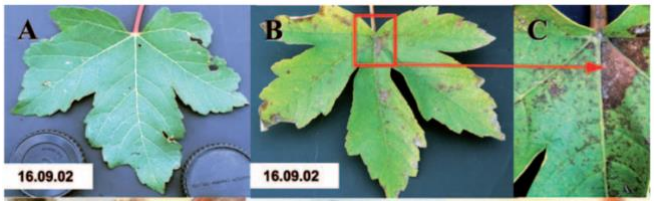


Figure 16 : Photographie de feuilles portant des symptômes de brunissement causés par des métaux lourds sur les feuilles (André et al., 2006)

Figure 17 : Effets de métaux lourds mixtes sur des pigments photosynthétiques chl a, chl b, la chlorophylle totale (aCb) et la teneur en caroténoïdes dans les feuilles des quatre hybrides de peuplier à différentes concentrations de métaux lourds. P (Chandra and Kang, 2016)

toute cette pollution (Yang and Zhang, 2015). Cela favorise l'accumulation de polluants dans le sol. Or ce dernier est le principal lieu d'absorption de métaux lourds chez les arbres (Nechita *et al.*, 2021) et ce sont principalement les espèces métalliques biologiquement actives qui ont une éventuelle action toxique. (Kahle, 1993) Bien que la plupart des espèces d'arbres sont généralement incapables de s'adapter à des concentrations élevées de métaux lourds dans leur rhizosphère. Ils ne sont pas en mesure d'exclure les traces de métaux de leurs racines, même si les niveaux toxiques sont atteints ou dépassés. D'autant que la sécheresse va augmenter la concentration en métaux lourds dans les tissus. (Nechita *et al.*, 2021). Seules quelques espèces sont tolérantes aux métaux ou lorsqu'il existe une interconnexion avec des mycorhizes.

Le système racinaire transfert les métaux lourds au travers des xylèmes dans les tissus de l'arbre (Kharkan, Sayadi and Rezaei, 2019). Selon où sont accumulé les métaux lourds au niveau tissulaire et cellulaire, ils peuvent déclencher soit peu ou des cascades de réactions de stress oxydatif conduisant à des réponses de type hypersensible (André, Vollenweider and Günthardt-Goerg, 2006). Quand les métaux lourds entrent dans les racines, ils vont limiter leur croissance. Lorsque la translocation se fait au niveau des feuilles, cela menace les activités physiologiques, car plusieurs sites du limbe et de la nervure foliaire y sont sensibles (Dietz, Baier and Krämer, 1999). Un des symptômes d'un effet délétère des métaux lourds sur la feuille est son brunissement (fig. 16). Celui-ci est causé par la diminution de la teneur en chlorophylle et en caroténoïdes. Cela possède une incidence sur du taux de photosynthèse qui est proportionnel à l'augmentation de la concentration en métaux lourds, comme on peut le voir sur la (fig. 17), le taux de pigment photosynthétique diminue avec l'augmentation en métaux lourds. Cela entraine ainsi une forte diminution de la photosynthèse et de la respiration (Chandra and Kang, 2016).

Une forte concentration en métaux lourds impact également la fertilité des graines (Nechita *et al.*, 2021). Une faible concentration en cadmium et en plomb suffit pour observer une diminution l'allongement racinaire, lorsque la concentration est importante, vn va aussi observer une inhibition de l'allongement des racines (Tableau II) (André, Vollenweider and Günthardt-Goerg, 2006). Cette inhibition touche également le développement des racines secondaires (Tableau III), cela vient limiter les racines à pouvoir prospecter leurs environnements et d'y extraire des ressources. Cependant, il faut bien retenir que tous les arbres ont la capacité de stocker les métaux lourds (Pulford and Watson, 2003), il est important de comprendre que pour avoir un effet toxique la concentration en métaux lourds doit atteindre un certain seuil de concentration (André, Vollenweider and Günthardt-Goerg, 2006).

La pollution de l'air causée par la combinaison de SOx et Nox provoque des pluies acides. Celles-ci ont un effet sur les infrastructures urbaines. Cela affaiblit également les arbres, les plantes et le sol. Les nutriments du sol sont moins disponibles pour les plantes, cela extrait l'aluminium présent dans le sol altérant se perméabilité (Marsalek *et al.*, 2007)

Tableau IV : pH moyen du sol et concentrations élémentaires foliaires (écart-type) des érables à sucre des rues (campus) et des arbres forestiers (Minnis) (Close et al., 1996)

	Street	Forest
Soil pH**	7.29 (0.11)	5.62 (0.51)
Element (%)		
N**	1.58 (0.19)	2.04 (0.25)
P	0.19 (0.04)	0.15 (0.01)
K*	0.58 (0.01)	0.69 (0.05)
Mg	0.26 (0.03)	0.22 (0.04)
Ca**	2.01 (0.03)	1.44 (0.04)
Element (ppm)		
Mn**	66 (51)	571 (418)
B*	55 (8)	66 (7)
Fe	120 (29)	140 (28)
Al	108 (28)	106 (24)
Na*	27 (11)	17 (6)
Zn	19 (5)	22 (4)

Figure 18 : photographie d'un scellage du sol au pied d'un arbre (Vauvert & Portero, 2014)

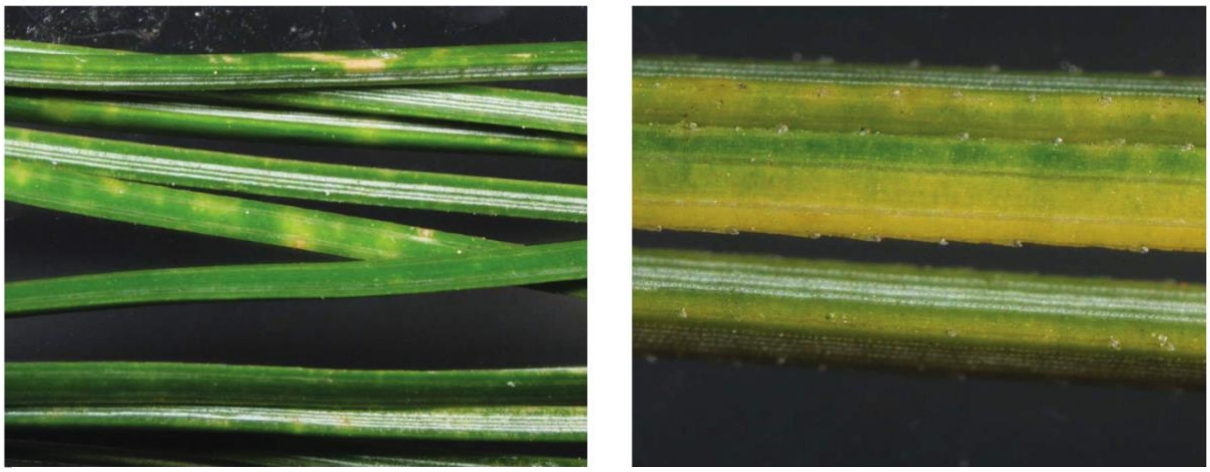


Figure 19 : photographie du symptôme de décoloration provoqué par l'exposition à O3 sur des épines de pins cembro (Dalstein et al., 2005)

1.1.4 Disponibilité des nutriments

En ville, les sols sont généralement oligotrophes. Par exemple, À Hong Kong, les sols n'ont pas d'horizon naturel, sont utilisés des matériaux de remblai avec une mauvaise structure et une stratification artificielle. Le sol y est très caillouteux, avec une texture grossière et une abondance de gravats. À l'intérieur des fosses d'arbres de bord de route, la teneur en matière organique, l'apport d'azote et de phosphore sont plus faibles qu'en milieux naturels (C. Y Jim, 1998). Une étude a comparé les éléments nutritifs présents dans le sol d'un campus et avec ceux présents en forêt. Ils ont observé une plus faible concentration en azote, en potassium par exemple (Tableau IV). À cause de la compaction, les sols disposent généralement d'une faible capacité à retenir les bases nutritives et la quantité retenue sous les formes disponibles n'est pas suffisante pour les plantes (C. Y Jim, 1998). Il y a moins de régénération d'humus, moins de mycorhizes, et des carences ou excès de certains éléments (Gourrierec, 2012).

Les matériaux utilisés dans les fosses d'arbres sont comme nous l'avons énoncé, parfois des déchets de construction utilisés dans les remblais. Quand ceux-ci sont calcaires, ils relarguent des carbonates. Cela induit un pH alcalin, ce qui provoque des carences en micronutriment et en phosphore. (C. Y Jim, 1998). Le scellage des sols (fig. 18) et la compaction sont défavorables aux micro-organismes chargés de la décomposition qui sont absents du sol. Ils induisent un manque d'oxygène dans les pores du sol, ce qui empêche le développement de ces micro-organismes. Il y a donc une faible quantité de substance humique, donc de matière absorbable disponible pour les arbres (dans la ville de Manchester, l'apport de matière organique est nécessaire) (Sager, 2020).

1.2 L'environnement aérien

En ville, il n'y a pas que le sol qui présente des perturbations, l'environnement aérien. On retrouve une pollution atmosphérique, des contraintes physiques et lumineuses.

Dans l'atmosphère, l'un de polluant qui possède le plus d'impact sur l'arbre est l'ozone (O_3) troposphérique. C'est le deuxième gaz à effet de serre le plus important dans l'atmosphère après le CO_2 (Cooper *et al.*, 2002). Il est issu de la réaction entre le rayonnement solaire et le NO_2 (dioxyde d'azote), produit de la combustion de matière organique fossile (Crutzen, 1988). Quand il est en excès, il impacte l'arbre à la fois au niveau de la cellule et de la feuille en induisant des cascades biochimiques, physiologiques et morphologiques (fig. 19) (Paoletti, 2008), ce qui peut altérer sa croissance (Isebrands *et al.*, 2001). C'est un gaz très oxydant qui pénètre dans les feuilles par les stomates et une fois en contact avec les cellules foliaires, il se dégrade instantanément, entrainant la mort de celles-ci (Site ONF).

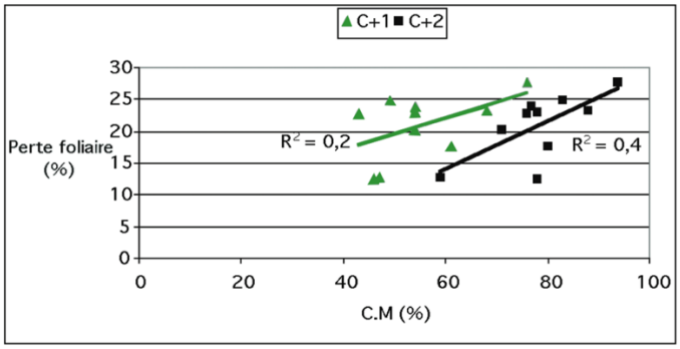


Figure 20 : comparaison entre la perte foliaire et les taches chlorotiques observées sur les aiguilles de pin cembro en 2001 (Dalstein et al., 2005)

Figure 21 : photographie des contraintes exercées sur l'arbre. À gauche, une grille d'arbre trop étroite. À droite, attaches de tuteur non desserrées et non retirées (Vauvert & Portero, 2014)

Figure 22 : photographie d'une coupe trop drastique (Vauvert & Portero, 2014)

L'O_3 va altérer de nombreuses fonctions, comme la capacité de régulation de l'allocation des ressources plutôt que sur la productivité (Paoletti, 2008) et la conductance stomatique, ce qui peut prédisposer l'arbre au stress hydrique (Paoletti, 2008). Il induit une augmentation du flux de sève avec une perte de la croissance des tiges, un appauvrissement de l'humidité du sol dans la zone d'enracinement (Paoletti, 2008). Il provoque une perte foliaire (fig. 20) du fait de la mort des cellules, avec pour conséquence une diminution de la croissance, un affaiblissement des plantes, les rendant plus sensibles aux attaques de parasites et de maladies (Site : ONF) bien que celle-ci diffère entre les espèces (Dalstein *et al.*, 2005).

1.2.1 Chocs et blessures

En ville, l'intégrité de l'écorce du tronc est souvent mise à mal. De nombreuses dégradations, volontaires ou non, viennent dégrader l'écorce et la couche se trouvant juste sous l'écorce appelée le cambium. Par exemple, le creusement de tranchées pour atteindre ou installer des services publics le long des trottoirs est une cause majeure de dommages aux arbres et de dépérissement ultérieur (fig. 14) (Jim, 2003). On peut également observer encore des dimensions d'ouverture de surface autour du collet de l'arbre non adapté à la taille de l'arbre (fig. 21).

Le cambium est essentiel à la survie de l'arbre, car il contient les vaisseaux conducteurs de sève élaborée : le phloème. Ce dernier assure ainsi le transport jusqu'aux racines des nutriments produits grâce à la photosynthèse dans les feuilles. Sans cet apport en sève, les racines ne parviennent pas à survivre et cessent d'envoyer de l'eau et des minéraux vers les feuilles via les tissus conducteurs du xylème, surtout chez les jeunes arbres ou l'écorce est plus fins et fragiles. Il existe des dispositifs de protection qui existent (Nowak and Mcbride, 1991) (James *et al*, 2016).

Un autre élément qui cause des dégradations est la taille des arbres lorsque celle-ci est trop sévère. Lorsque la coupe est drastique (fig. 22), c'est un véritable traumatisme subi par l'arbre. En effet, les arbres stockent une grande partie de leurs réserves énergétiques dans leur structure porteuse (tronc, branche, racine…). Cela engendre, une perte de réserves, une voie d'entrée pour les maladies et les nuisibles, et donc un affaiblissement physiologique. L'arbre est obligé de mobiliser ses réserves restantes pour la cicatrisation, la remise en place du houppier et la défense immunitaire (Vauvert & Portero, 2014).

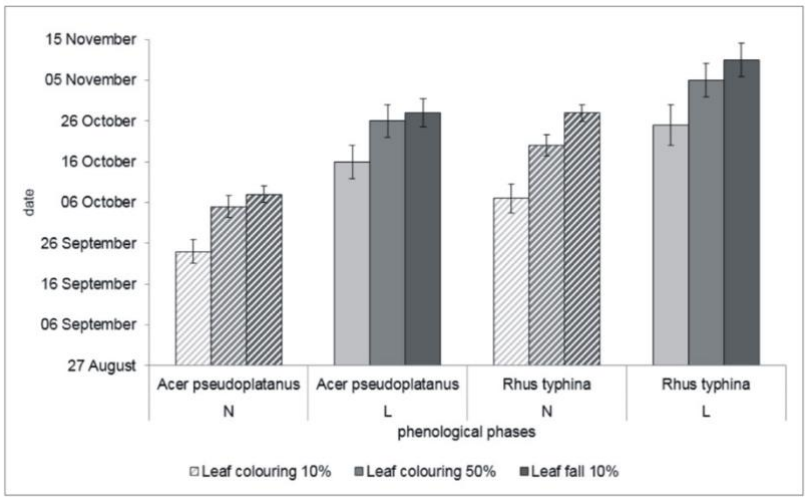


Figure 23 : Histogramme du début de trois phases phénologiques automnales de l'érable sycomore (Acer pseudoplatanus L.) et du sumac vinaigrier (Rhus typhina L.) à Zvolen des années 2013 à 2015 ;
La partie non éclairée = N - barres hachurées ; la partie éclairée = L - barres pleines (Škvareninová et al., 2017)

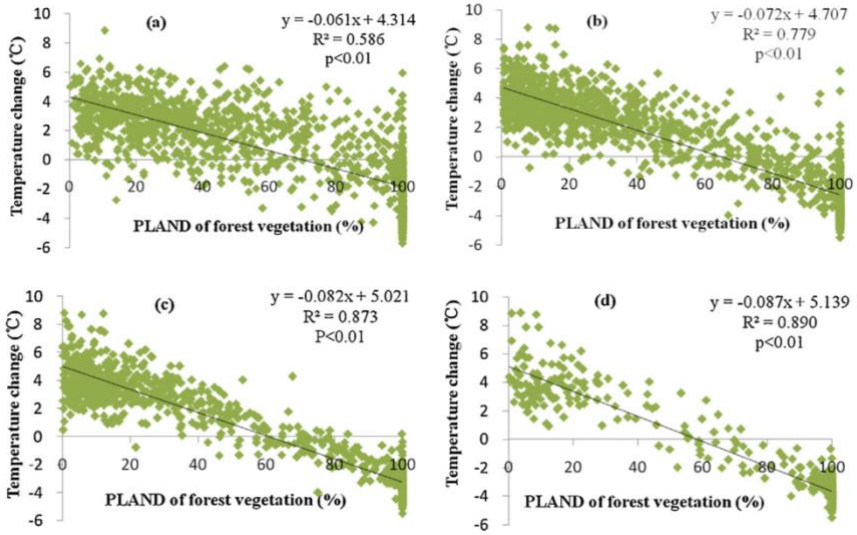


Figure 24 : (a–d) Relation entre le pourcentage du paysage (PLAND) de végétation forestière et le changement de température (◦C) dans différentes tailles de surfaces ; (a) 60 m × 60 m, (b) 120 m × 120 m, (c) 240 m × 240 m et (d) 480 m × 480 m. (Kong et al., 2014)

1.2.2 La lumière

L'arbre utilise la lumière comme facteur extérieur pour réguler le fonctionnement de son organisme. Il possède un cycle circadien ainsi qu'un cycle circannuel. Ils vont lui permettre de coordonner et d'adapter son organisme aux changements de son environnement. Par exemple, les stomates des feuilles de certaines espèces d'arbres sont ouverts la nuit et fermés le jour pour protéger les plantes du flétrissement, qui se produirait pendant la journée (Chaney, 2002). La croissance et le développement des arbres sont influencés par la qualité spectrale, la quantité et la durée de la lumière (Škvareninová *et al.*, 2017). Or, l'éclairage artificiel des villes vient mimer la lumière naturelle, ce qui entraine une altération des cycles. La lumière artificielle est suffisamment brillante pour induire une réponse physiologique chez des arbres (fig. 23) (Škvareninová *et al.*, 2017). Cela va affecter la phénologie, la forme de croissance et l'allocation des ressources des arbres (Rich and Longcore, 2013) et même le fonctionnement des bourgeons (Škvareninová *et al.*, 2017). Les érables, les bouleaux, les peupliers et les sycomores sont ainsi sensibles à la lumière nocturne (Chaney, 2002). Cette perturbation peut affecter le cycle biologique annuel, les arbres qui poussent à proximité de lumières artificielles réagissent avec retard au refroidissement automnal et aux basses températures. Leurs feuilles ne changent pas de couleur, mais gèlent souvent entièrement vertes. La glace et la neige, qui sont déposées à leur surface, peuvent provoquer la rupture des branches.

2 Les services rendus dans le cadre du réchauffement climatique

2.1 Limiter les îlots de chaleurs

Le milieu est donc très difficile pour l'arbre, les contraintes sont à la fois dans le sol et dans le l'environnement aérien. Cependant, plus que jamais, malgré les difficultés, on compte sur les arbres pour limiter les effets du dérèglement climatique, car c'est une question de plus en plus préoccupante. L'augmentation de la température pose un problème majeur pour la santé et la qualité de vie dans cet environnement perturbé qu'est la ville. L'arbre est une solution envisagée pour réduire ces effets.

Les études tendent à démontrer l'efficacité de l'arbre dans le refroidissement urbain principalement du fait de l'ombrage et de l'évapotranspiration. Cette dernière permet une augmentation de l'échange de chaleur ce qui permet de diminuer la température du milieu alors que l'ombre est la résultante du blocage ou de l'absorption des rayons du soleil par le feuillage de l'arbre. L'effet du refroidissement de la ville porte par les arbres porte à la fois à l'échelle de la ville entière, mais aussi à l'échelle du piéton. Bien qu'ils aient la capacité de réduire la température ressentie jusqu'à 10 °C, la taille et l'espèce employée.

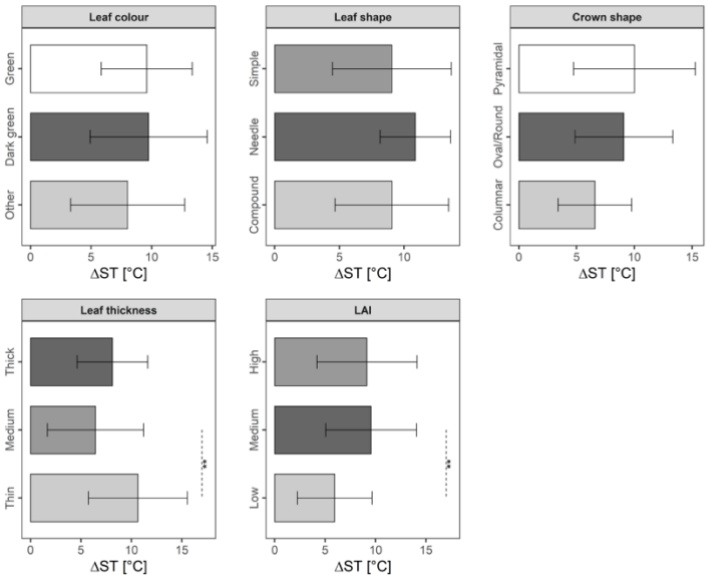


Figure 25 : effet du type de feuillage sur le refroidissement ΔST : Les résultats concernant les avantages potentiels du refroidissement. LAI : indice de surface foliaire (Rahman et al., 2020)

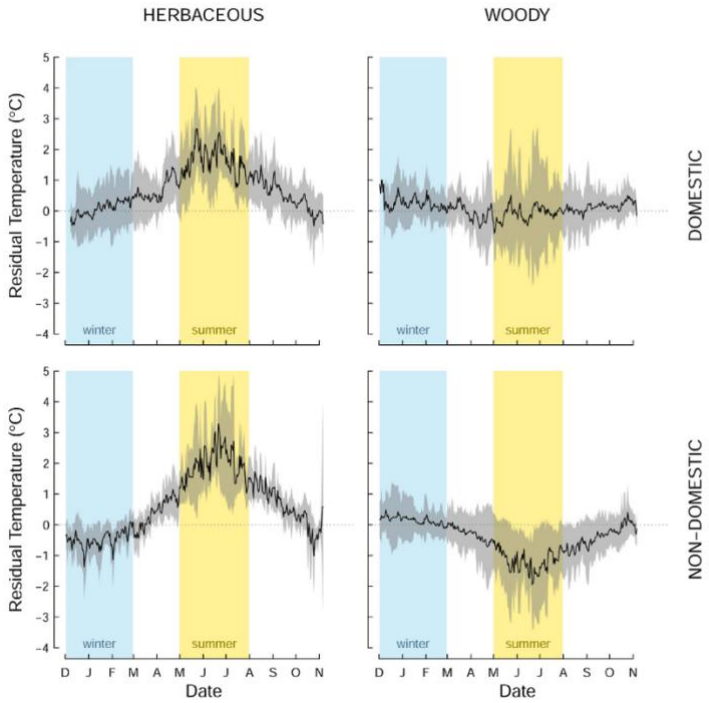


Figure 26 : Fluctuations annuelles moyennes de la température résiduelle du sol sous la végétation herbacée domestique, les arbres et arbustes domestiques, la végétation herbacée non domestique, les arbres et arbustes non domestiques. Les bandes bleues verticales indiquent les mois d'hiver et les bandes jaunes verticales indiquent les mois d'été. (Edmondson et al., 2016)

on un effet sur la diminution de la température, plus il est important plus elle va être importante (fig. 24) (Kong *et al.*, 2014).

Toutes les espèces d'arbres ne se valent pas dans leur efficacité. Le choix de l'essence est très important, les feuillus ont un pouvoir de rafraichissement plus important que les conifères. Ces derniers sont en effet plus adaptés à la sécheresse, car ils sont nettement moins sujets à l'évapotranspiration du fait de la structure de leurs feuilles et de leur conduction hydraulique (Michel & Brun, 2019).

La typologie de l'arbre dans le milieu urbain est également très importante sur l'effet ou le type de refroidissement. Pour un arbre isolé, le refroidissement vient principalement par l'ombrage. Divers paramètres ont été mesurés (comme la couleur des feuilles ou leurs morphologies) afin de déterminer quels paramètres physiques influencent la diminution de la température par l'ombrage créé par le feuillage. Ce sont l'épaisseur et la surface des feuilles qui ont un impact significatif (fig. 25). Cet effet varie d'un facteur 1 à 4 en fonction des conditions dans lesquelles se trouve l'arbre (qualité du sol, disponibilité en eau).

À l'échelle d'une rue, c'est encore l'effet d'ombrage qui prédomine. En fonction de la typologie de la rue, la présence d'un arbre ou sa configuration a son importance. L'implantation d'arbres dans les rues étroites et hautes, car l'ombrage y est important du fait du manque de lumière, peut nuire à son bon développement. Pour les rues larges, il faut utiliser de petits arbres aux troncs haut, au houppier large et une forte densité de feuillage. Ces alignements d'arbres ont la capacité de faire diminuer la température de 2 à 3 °C (SANNA *et al.*, 2021). Il y a ensuite les arbres dans les parcs des villes, cette fois-ci l'ombrage et l'évapotranspiration vont avoir un rôle conjoint, dans la capacité de refroidir l'air (Rahman *et al.*, 2020). Pour finir, il y a aussi les arbres des jardins domestiques. Bien que souvent plus petits, ils sont moins efficaces que les grands arbres des voies publiques, mais ils participent tout de même au refroidissement global du milieu urbain. De plus, le type de gestion des arbres possède un impact sur la limitation de l'îlot de chaleur. Un arbre taillé sous forme semi-libre va maintenir une température résiduelle constante, tandis qu'un arbre laissé en forme libre comme on peut le retrouver dans les jardins va avoir la capacité de réduire cette température résiduelle pendant l'été (fig. 26) (Edmondson *et al.*, 2016).

De nombreux facteurs ont leur importance dans l'efficacité du refroidissement. Il y a la densité d'arbres, la densité du feuillage, de l'essence, la disponibilité de l'eau dans le sol, le revêtement du sol au pied des arbres et la qualité des sols (SANNA *et al.*, 2021)… Certains de ces facteurs sont des contraintes que nous avons évoquées dans la partie précédente, il est important d'accueillir au mieux l'arbre afin qu'il puisse être le plus efficace possible. La contrainte qui va avoir le plus d'importance sur l'effet du refroidissement est la disponibilité en eau,

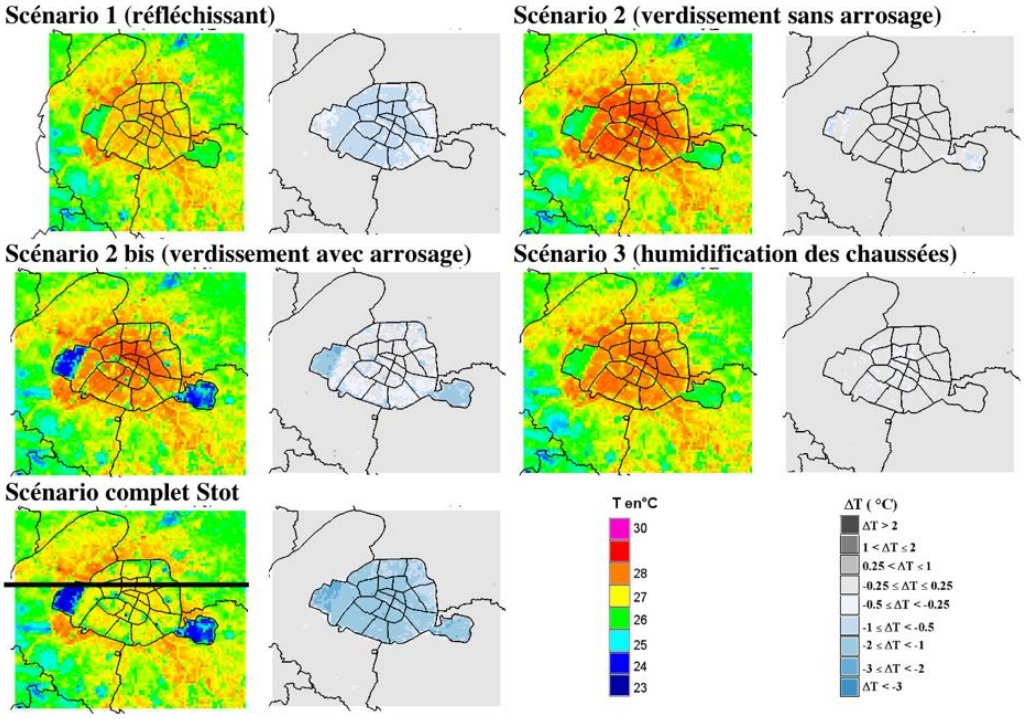


Figure 27 : Comparaison des ICU simulés pour les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot par rapport à la situation de référence (intensité de l'ICU calculé sur les températures à 2 m simulées dans les différents scénarios (colonnes de gauche) et anomalies de températures à 2 m calculées sur l'ICU entre chacun des scénarios et la référence (colonnes de droite)). L'ICU est calculé comme la moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC (4 h, 5 h et 6 h locales) les 5 nuits de la simulation. (Lemonsu, 2012)

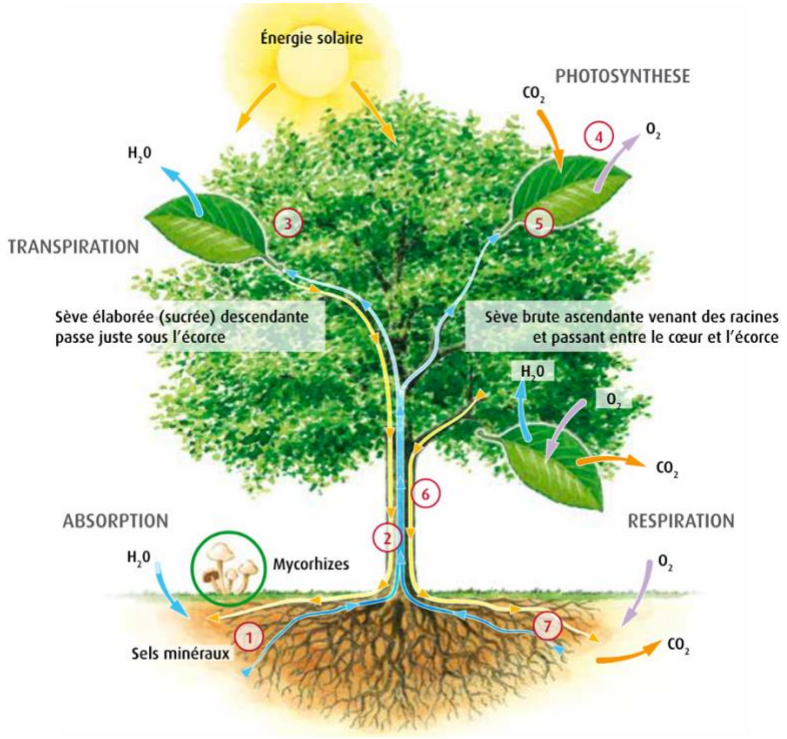


Figure 28 : Schéma récapitulatif du processus de photosynthèse chez les plantes. (Vauvert & Portero, 2014)

elle est importante pour la qualité du feuillage et l'évapotranspiration. S'il n'y a aucun recours à l'arrosage pendant les vagues de chaleur, l'effet de refroidissement peut être divisé par 4 (SANNA *et al.*, 2021) Lemonsu, 2012). Le taux de refroidissement est aussi lié au taux de végétalisation et de la position dans l'agglomération. L'effet peut aller de 0,25 à 2 °C (Michel & Brun, 2019). En effet, la circulation du vent est perturbée, voire limitée. L'addition de la résistance au vent et de l'évapotranspiration peut augmenter localement l'humidité, ce qui en été peut avoir un effet négatif dans l'effet de refroidissement. Lorsque la couverture arborée est trop forte, cela peut bloquer le refroidissement des surfaces minérales la nuit (SANNA *et al.*, 2021).

L'arbre à lui seul n'a pas la capacité à réduire les îlots de chaleur en ville, il peut avoir un gros impact, mais pour pouvoir multiplier ses effets, son action doit être mise en synergie avec d'autres moyens. Par exemple, la mise en place d'infrastructure urbaine avec un albédo élevé ou la présence de plan d'eau et de pelouse ou des façades et des toits végétalisés (SANNA *et al.*, 2021). Combiner deux types de végétation permet de cumuler certains bénéfices, comme on peut le voir sur la réduction de la demande en climatisation quand on implante simultanément et massivement toitures végétalisées et végétation mixte arborée : une réduction de 25 % est atteinte, conséquence du caractère isolant de la végétation en toiture et du rafraichissement engendré par la végétation arborée de pleine terre (fig. 27). (de Munck *et al.*, 2013 ; Michel & Brun, 2019)

2.2 La séquestration du CO2 atmosphérique

Si on souhaite réduire la température ressentie en ville, il faut s'attaquer à la source du problème, le CO2. Le stockage est un enjeu à l'échelle mondiale, il est l'une des principales causes du réchauffement climatique. La structure des villes et la forte activité humaine font du milieu urbain parmi les zones à la plus forte concentration de CO2. La concentration de CO2 dans les zones urbaines est 50 % plus élevée que dans les zones non urbaines environnantes (Koerner and Klopatek, 2002). La pollution de l'air est à l'origine de 48 000 morts prématurées par an en France (écologie.gouv.fr). Le stockage de ce carbone est devenu un enjeu de santé publique. L'augmentation des surfaces vertes des villes et une des solutions largement plébiscitées actuellement comme nous l'avons vu dans la partie précédente et l'arbre ont encore une fois un énorme rôle à jouer.

Pour réaliser sa photosynthèse, l'arbre réduit naturellement le CO2 atmosphérique à l'aide de l'eau absorbée par les racines et l'énergie solaire captées par les feuilles. À la suite de cette réaction, l'oxygène est relargué dans l'atmosphère, tandis que le carbone est stocké sous forme de glucide qui sera utilisé pour synthétiser la matière organique (fig. 28) (Hall and Rao, 1999). Ils sont donc qualifiés de puis de carbone.

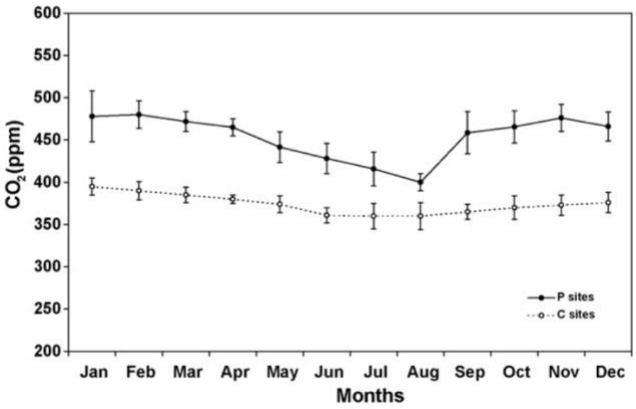


Figure 29 : Tendance mensuelle de la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (CO2) aux sites pollués : bord de route (P) et témoins : parc (C) au cours de l'année 2005. (Gratani and Varone, 2007)

Tableau V : Comparaison entre les concentrations moyennes de CO2 avec et sans arbres sous densités de trafic différentes et vent de 2 m/s du sud-ouest a) et b), du sud c) et d) pendant la journée b) et d), la nuit a) et c). (Li et al., 2013)

a)

Traffic density (vehicles/min)	Average CO_2 concentration with trees (mg/m^3)	Average CO_2 concentration without trees (mg/m^3)	Percentage difference of the average CO_2 concentration with trees relative to that without trees (%)
0	678.95	700	−3.01
20	712.02	730.53	−2.53
40	745.56	761.45	−2.09
60	779.58	792.78	−1.67
80	813.63	824.57	−1.33
120	884.58	889.33	−0.53
160	957.35	957.07	+0.03
200	1032.42	1027.23	+0.51

b)

Traffic density (car/min)	Average CO_2 concentration with trees (mg/m^3)	Average CO_2 concentration without trees (mg/m^3)	Percentage difference of the average CO_2 concentration with trees relative to that without trees (%)
0	702.38	700	+0.34
20	736.54	730.53	+0.82
40	771.35	761.45	+1.30
60	806.66	792.78	+1.75
80	842.36	824.57	+2.16
120	915.12	889.33	+2.90
160	991.52	957.07	+3.60
200	1069.92	1027.23	+4.16

c)

Traffic density (vehicles/min)	Average CO_2 concentration with trees (mg/m^3)	Average CO_2 concentration without trees (mg/m^3)	Percentage difference of the average CO_2 concentration with trees relative to that without trees (%)
0	682.73	700.00	−2.47
10	695.91	710.08	−2.00
20	709.37	720.26	−1.51
30	723.19	730.55	−1.01
40	737.47	740.95	−0.47
50	752.25	751.45	+0.11
60	767.51	762.19	+0.70
70	799.29	784.09	+1.94
100	832.49	806.83	+3.18
120	866.87	830.87	+4.33

d)

Traffic density (vehicles/min)	Average CO_2 concentration with trees (mg/m^3)	Average CO_2 concentration without trees (mg/m^3)	Percentage difference of the average CO_2 concentration with trees relative to that without trees (%)
0	701.98	700.00	+0.28
10	715.80	710.08	+0.81
20	729.98	720.26	+1.35
30	744.61	730.55	+1.92
40	759.81	740.95	+2.54
50	775.51	751.45	+3.20
60	791.62	762.19	+3.86
80	825.21	784.09	+5.24
100	860.25	806.83	+6.62
120	896.66	830.87	+7.92

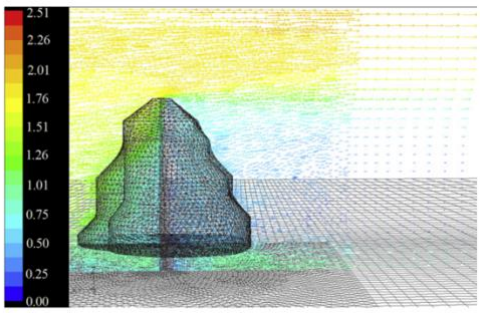


Figure 30 : modélisation de la résistance de l'air par l'arbre (Li et al., 2013)

Le stockage de ce carbone est devenu un enjeu de santé publique. Pour réaliser la photosynthèse, l'arbre réduit naturellement le CO2 atmosphérique avec l'eau captée par les racines et l'énergie solaire captée par les feuilles. À la suite de cette réaction, l'oxygène est relargué dans l'atmosphère, tandis que le carbone est stocké sous forme de glucides tels que le saccharose ou encore l'amidon qui seront utilisés pour synthétiser la matière organique (Hall and Rao, 1999). Les arbres sont donc qualifiés de puits de carbone, car il stocke le CO2 atmosphérique sous forme de biomasse végétale. Cependant, ce carbone stocké peut être perdu, c'est-à-dire relargué dans l'atmosphère dans le cas où l'arbre est coupé, exploité ou bien laissé en décomposition (Laïlle, *et al.*, 2014). Ainsi, un érable à Giguère fixe, sur une période de 50 ans environ, en moyenne 117 kg de carbone, ce qui correspond à une moyenne annuelle de 2,25 kg. Une épinette bleue fixe, quant à elle, 148 kg de carbone pendant environ 40 ans, soit 3,4 kg/(Laïlle, *et al.*, 2014).

Les arbres urbains dans les territoires des États-Unis d'un seul tenant stockent 770 mégatonnes de carbone, pour une valeur de 14,3 milliards de dollars (Salbitano *et al.*, 2017).

Les arbres peuvent avoir un réel rôle dans la diminution de la concentration du carbone en ville, à Rome une étude a comparé la concentration en CO2 atmosphérique à l'intérieur d'un parc cet au bord d'une route. Celle-ci a montré une concentration en CO2 inférieure de 21 % dans le parc. Même si les conditions diffèrent entre les deux lieux, il en a été conclu que les arbres avaient un rôle significatif (fig AD) (Gratani and Varone, 2007). Cependant, en ville l'écoulement de l'air et perturbé par les bâtiments créant un effet de canyon urbain. Les arbres, bien qu'ils absorbent la concentration de CO2 dans l'air, créé par une résistance à l'air qui diminue la dispersion du CO2 (fig. 30) (Li *et al.*, 2013). Il est donc important pour une gestion optimale du CO2 atmosphérique en ville de bien choisir l'essence de l'arbre afin que limité cet effet. Par exemple la ville de Metz à réaliser 85 fiches espèces de tous les arbres présents sur son territoire et déterminer les caractéristiques de chaque essence que ce soit la capacité à diminuer la température ou à capter le CO2. En prenant en compte le dérèglement climatique afin de mettre en avant les espèces les plus adaptées au climat avenir. ('SESAME_85_fiches_especes.pdf,' n.d.)

Conclusion :

Depuis des siècles, les arbres font partie intégrante de nos villes et ils ont suivi leurs transformations au gré des courants politiques et architecturaux. Cet héritage se traduit par les différentes dispositions et méthodes de gestion dans lesquelles nous trouvons les arbres de nos jours et qui passent par un usage statuaire à un usage pour le bien-être des populations. Cependant, et bien qu'il rende service à l'environnement urbain, l'arbre est contraint par celui-ci qui lui est globalement défavorable, tant pour sa croissance aérienne que racinaire. En effet, le sol des villes est compacté, et les revêtements utilisés sont très généralement imperméables à l'eau. Le sol est aussi pollué par des éléments de toutes sortes comme les métaux lourds et des obstacles au développement racinaire sont présents en son sein. Du point de vue aérien, l'atmosphère est aussi polluée par les activités humaines (O3, CO2). Les arbres subissent des chocs et des blessures. La conception des villes cause une sur ou une sous-exposition à la lumière. Enfin, l'éclairage public perturbe leur cycle biologique. L'ensemble de ces contraintes à un impact très important sur la disponibilité en eau et en nutriments, ce qui explique en grande partie l'aspect défavorable à une croissance harmonieuse de l'arbre en ville. Or, dans un contexte de dérèglement climatique, la vie en milieu urbain va devenir de plus en plus difficile, en particulier à cause des fortes températures ressenties (+2 °C dans les villes par rapport à l'environnement rural local). On compte ainsi sur les arbres pour diminuer les effets de ce réchauffement. Ils sont en effet capables de baisser la température en ville, principalement par l'évapotranspiration et l'ombrage. Ce sont aussi des puits de carbone qui ont la capacité d'extraire le CO2 atmosphérique et de le stocker sous forme de matière organique.

Cependant, pour pouvoir rendre ces services de refroidissement et de capture du CO2 atmosphérique, le plus efficacement possible, il est plus que nécessaire que les conditions d'accueil des arbres soient grandement améliorées. Il est important que les espèces plantées soient diversifiées, adaptées et résilientes face au climat que l'on va retrouver dans les prochaines années. Il faut aussi que la qualité des sols soit améliorée, que ceux-ci redeviennent vivants et que les infrastructures d'accueil soient réellement adaptées. Forte heureusement, l'opinion et les pouvoirs publics en on prit conscience, et des « chartes sur l'arbre en ville » ou des « plans arbres » sont mis en place dans de nombreuses villes pour favoriser l'accueil des arbres. Comme par exemple « le plan arbre 2021-2026 » de la ville de Paris ou « la charte de l'arbre 2020 » de la ville de Montpellier.

Une des solutions pourrait être la forêt urbaine. Il consiste à relier entre eux les secteurs les plus arborés des structures et espaces verts urbains et périurbains en prenant en considération l'ensemble du réseau d'espaces verts et bleus tels que les lacs, les cours d'eau et les zones humides d'une ville ou d'une métropole. Cela offre une perspective d'ensemble qui englobe tous les arbres et la végétation associée,

notamment les arbres plantés dans les rues, les parcs urbains, les cimetières, les arbres des jardins privés et les autres sites urbains arborés formant comme un écosystème.

Cette solution apporte un large potentiel de services, qui montre une transition écologique pragmatique et organisée incluant tous les acteurs autour de la nature afin de limiter les effets du changement climatique. Cela nous amène à nous demander comment mettre en place cette initiative dans un contexte où les espaces en villes sont rares…

Bibliographie

André, O., Vollenweider, P. and Günthardt-Goerg, M. (2006) 'Foliage response to heavy metal contamination in Sycamore Maple (Acer pseudoplatanus L.)', *Forest Snow and Landscape Research*, 80.

Chandra, R. and Kang, H. (2016) 'Mixed heavy metal stress on photosynthesis, transpiration rate, and chlorophyll content in poplar hybrids', *Forest Science and Technology*, 12(2), pp. 55–61.

CHANEY, W. (2002): Does night lighting harm trees? Circular FNR-FAQ-17, Department of Forestry and Natural Resources, Purdue University [online]. [cit. 13.11.2016]. (La ville végétale : Une histoire de la nature en milieu urbain [France, XVIIe-XXIe siècle]

Close, R., Nguyen, P. and Kielbaso, J.J. (1996) 'Urban vs. Natural Sugar Maple Growth: I. Stress Symptoms and Phenology in Relation to Site Characteristics', *Arboriculture & Urban Forestry*, 22(3), pp. 144–150.

Cooper, R.N. *et al.* (2002) 'Climate Change 2001: The Scientific Basis', *Foreign Affairs*, 81(1), p. 208.

Craul, P.J. (1992) *Urban Soil in Landscape Design*. John Wiley & Sons.

Crutzen, P.J. (1988) 'Tropospheric Ozone: An Overview', in I.S.A. Isaksen (ed.) *Tropospheric Ozone: Regional and Global Scale Interactions*. Dordrecht : Springer Netherlands (NATO ASI), pp. 3–32.

Dalstein, L. *et al.* (2005) 'Effets de l'ozone sur la forêt et la végétation dans les Alpes franco-italiennes.', *Forêt Méditerranéenne*, XXVI (2), pp. 149–156.

Michel, L., Brun, E., (2019) 'Des solutions fondées sur la nature pour s'adapter au changement climatique. Rapport au Premier ministre et au Parlement', observatoire national sur les effets du réchauffement climatique.

Dietz, K.-J., Baier, M. and Krämer, U. (1999) 'Free Radicals and Reactive Oxygen Species as Mediators of Heavy Metal Toxicity in Plants', in M.N.V. Prasad and J. Hagemeyer (eds) *Heavy Metal Stress in Plants: From Molecules to Ecosystems*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 73–97.

Edmondson, J.L. *et al.* (2016) 'Soil surface temperatures reveal moderation of the urban heat island effect by trees and shrubs', *Scientific Reports*, 6(1), p. 33708.

Geiger, W.F., Marsalek, J., Rawls, W.J. & Zuidema, F.C. (eds.) (1987). Manual on drainage in urban areas. Volume I – Planning and design of drainage systems. Studies and reports in hydrology No. 43, UNESCO, Paris, ISBN 92-3-102416-7

Gourrierec, S.L. (2012) *L'arbre en ville : le paysagiste concepteur face aux contraintes du projet urbain*. other. SCE Nantes, Aménagement & Environnement, 5 avenue Augustin-Louis Cauchy - 44307 NANTES Cedex 03. Available at: https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00739439 (Accessed: 23 January 2023).

Gratani, L., Crescente, M.F. and Petruzzi, M. (2000) 'Relationship between leaf life-span and photosynthetic activity of Quercus ilex in polluted urban areas (Rome)', *Environmental Pollution*, 110(1), pp. 19–28.

Gratani, L. and Varone, L. (2007) ‘Plant crown traits and carbon sequestration capability by Platanus hybrida Brot. in Rome’, *Landscape and Urban Planning*, 81(4), pp. 282–286.

Gregory, J.H. *et al.* (2006) ‘Effect of urban soil compaction on infiltration rate’, *Journal of Soil and Water Conservation*, 61(3), pp. 117–124.

Hall, D.O. and Rao, K. (1999) *Photosynthesis*. Cambridge University Press.

Isebrands, J.G. *et al.* (2001) ‘Growth responses of Populus tremuloides clones to interacting elevated carbon dioxide and tropospheric ozone’, *Environmental Pollution*, 115(3), pp. 359–371.

Jim, Chi Yung (1998) ‘Soil compaction at tree-planting sites in urban Hong Kong’, *The landscape below ground II: Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban Soils*, pp. 166–178.

Jim, C. Y (1998) ‘Urban soil characteristics and limitations for landscape planting in Hong Kong’, *Landscape and Urban Planning*, 40(4), pp. 235–249.

Jim, C.Y. (2003) ‘Protection of urban trees from trenching damage in compact city environments’, *Cities*, 20(2), pp. 87–94.

Kahle, H. (1993) ‘Response of roots of trees to heavy metals’, *Environmental and Experimental Botany*, 33(1), pp. 99–119.

Kharkan, J., Sayadi, M.H. and Rezaei, M.R. (2019) ‘Investigation of heavy metals accumulation in the soil and pine trees’, *Environmental Health Engineering And Management Journal*, 6(1), pp. 17–25.

Koerner, B. and Klopatek, J. (2002) ‘Anthropogenic and natural CO2 emission sources in an arid urban environment’, *Environmental Pollution*, 116, pp. S45–S51.

Kong, F. *et al.* (2014) ‘Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China’, *Landscape and Urban Planning*, 128, pp. 35–47.

Laïlle, P., *et al* (2014) 'Les bienfaits du végétal en ville', Cité Verte.

Leconte, F. (no date) ‘Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy.’, p. 274.

Li, J. -F. *et al.* (2013) ‘CO2 absorption/emission and aerodynamic effects of trees on the concentrations in a street canyon in Guangzhou, China’, *Environmental Pollution*, 177, pp. 4–12.

Logsdon, S.D., Sauer, P.A. and Shipitalo, M.J. (2017) ‘Compost Improves Urban Soil and Water Quality’, *Journal of Water Resource and Protection*, 09(04), p. 345.

Marsalek, J. *et al.* (2007) *Urban Water Cycle Processes and Interactions, Int. Hydrol. Programme*.

Mathis, C., Pépy, E., (2017) La ville végétale : Une histoire de la nature en milieu urbain (France, XVIIe-XXIe siècle)

Meyer, W.B. (1991) ‘Urban Heat Island and Urban Health: Early American Perspectives’, *The Professional Geographer*, 43(1), pp. 38–48.

Mullaney, J., Lucke, T. and Trueman, S.J. (2015) ‘A review of benefits and challenges in growing street

trees in paved urban environments', *Landscape and Urban Planning*, 134, pp. 157–166.

De Munck, C.S. *et al.* (2013) 'The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB', *Geoscientific Model Development*, 6(6), pp. 1941–1960.

Nechita, C. *et al.* (2021) 'Evidence of declining trees resilience under long term heavy metal stress combined with climate change heating', *Journal of Cleaner Production*, 317, p. 128428.

James, S., *et al* (2016).'Arbres en milieu urbain : guide de mise en œuvre', trees & designed action groupe

Nowak, D. and Mcbride, J. (1991) 'Comparison of Monterey pine stress in urban and natural forests', *Journal of Environmental Management*, 32, pp. 383–395.

Paoletti, E. (2008) 'Ozone impacts on forests.', *CABI Reviews*, 2007, p. 13 pp.

Pulford, I.D. and Watson, C. (2003) 'Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review', *Environment International*, 29(4), pp. 529–540.

Rahman, M.A. *et al.* (2020) 'Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis', *Building and Environment*, 170, p. 106606.

SANNA, D., *et al, 2021* 'Rafraichir les villes : des solutions variées'. Agence de la transition écologique. (SANNA *et al., 2021)*

Rich, C. and Longcore, T. (2013) *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press.

Sager, M. (2020) 'Urban Soils and Road Dust—Civilization Effects and Metal Pollution—A Review', *Environments*, 7(11), p. 98.

Schroeder, H. (2010) 'Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques présentent-ils un risque de neurotoxicité développementale ?'

'SESAME 85 fiches espèces' (2019) CEREMA, Ville de Metz

Škvareninová, J. *et al.* (2017) 'Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment', *Moravian Geographical Reports*, 25(4), pp. 282–290.

Stefulesco, C., (1993) *L'urbanisme végétal,* Institut pour le développement forestier, Collection Mission du Paysage.

Stewart, V. i. and Scullion, J. (1989) 'Principles of managing man-made soils', *Soil Use and Management*, 5(3), pp. 109–116.

Watson, G. *et al.* (2014) 'The Management of Tree Root Systems in Urban and Suburban Settings: A Review of Soil Influence on Root Growth', *Arboriculture & Urban Forestry*, 40(4).

Yang, J.-L. and Zhang, G.-L. (2015) 'Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils – A review', *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(sup1), pp. 30–46.

ONF : http://www.onf.fr

Ministère de la transition écologique : https://www.ecologie.gouv.fr/

Résumé :

L'arbre fait partie de l'environnement urbain depuis des siècles. Il était utilisé soit pour le statut des puissants soit pour le bien-être de la population. On le retrouve ainsi dans différentes typologies, héritage de cette histoire de l'arbre en ville. Mais la ville est un milieu hostile. Le sol est compacté, et les revêtements sont imperméables à l'eau. Le sol est aussi pollué par des éléments de toutes sortes comme les métaux lourds et des obstacles au développement racinaire sont présents en son sein. L'atmosphère est aussi polluée par les activités humaines (O3, CO2). Les arbres subissent des chocs et des blessures et la lumière des villes comme l'éclairage public perturbe leurs cycles biologiques. L'ensemble de ces contraintes ont un impact très important sur la disponibilité en eau et en nutriments. Or le dérèglement climatique nous rappelle à quel point nous avons besoin d'eux. Les phénomènes d'îlot de chaleur étouffent les villes, mais les arbres peuvent réduire les températures par l'ombrage et l'évapotranspiration. De plus le CO2, principal acteur de ce dérèglement peut être stocké par les arbres grâce à la photosynthèse.

Abstract :

The tree has been part of the urban environment for centuries. It was used either for the status of the powerful or for the well-being of the population. It is thus found in different typologies, a legacy of this history of the tree in the city. But the city is a hostile environment. The soil is compacted, and the coatings are impermeable to water. It is also polluted by elements of all kinds such as heavy metals and obstacles to root development are present within it. The atmosphere is also polluted by human activities (O3, CO2). Trees suffer shocks and injuries and the light of cities such as public lighting disrupts their biological cycles. All of these constraints have a very significant impact on the availability of water and nutrients. But climate change reminds us how much we need them. Heat island phenomena are suffocating cities, but trees can reduce temperatures through shading and evapotranspiration. In addition, CO2, the main player in this disruption, can be stored by trees through photosynthesis.