



OPUR : Observatoire d'hydrologie urbaine en Île de France
Thème de recherche R3 : Gestion à la source des eaux pluviales
Action de recherche 3.3

***GESTION DES EAUX PLUVIALES PAR LES ARBRES
DE PLUIE***

Rapport de recherche OPUR

*Réalisé dans le cadre de la thèse de Hayath ZIME YERIMA intitulée « L'arbre
d'alignement comme moyen innovant pour la maîtrise des eaux pluviales en ville,
vers l'optimisation des services rendus »*

*Hayath ZIME YERIMA, Martin SEIDL, Abdelkader BENSAOUD, Emmanuel
BERTHIER et Marie-Christine GROMAIRE
05/2024*



INTRODUCTION

L'urbanisation est phénomène global grandissant dans le monde et se caractérisant par la croissance des villes, de leur population et de leur périphérie au détriment des milieux ruraux. Différents facteurs peuvent expliquer ce phénomène, mais les principaux sont : l'exode rural et l'industrialisation. Les villes sont de plus en plus développées et peuplées, les grosses industries se multiplient, la population est croissante surtout en milieu urbain. La population mondiale actuelle est de 7.7 milliards d'individus et pourrait atteindre 9.8 milliards en 2050 selon une projection de l'ONU (Moussion, 2020). L'évolution du monde et son développement ne sont pas sans conséquence sur l'environnement. Certes, l'économie bat son plein mais l'environnement et les écosystèmes en pâtissent. En effet, la pression démographique entraîne une augmentation de l'artificialisation des sols, des pollutions diverses, la dégradation des milieux, la modification des paysages...(Bourgeois, 2016; Damon, 2011; Moussion, 2020).

L'urbanisation affecte le cycle hydrologique naturel et l'écosystème à travers la réduction de la capacité de recharge des eaux souterraines, l'augmentation des grandeurs de débits de pointe, la diminution du temps de latence entre les précipitations et le ruissellement (Flores et al., 2015). Le milieu naturel est de plus en plus détruit pour donner place à des surfaces imperméables telles que les trottoirs, les chaussées, les toitures et bien d'autres qui ne favorisent pas l'infiltration des eaux pluviales. A cela s'ajoute les effets du changement climatique avec les émissions des gaz à effet de serre. On assiste à une augmentation des températures, une modification des régimes de précipitations, des événements météorologiques extrêmes. En France, le réchauffement moyen annuel est de + 0,3°C par décennie sur la période de 1959-2009 et s'explique principalement par l'augmentation des températures au printemps et en été (Gibelin et al., 2014).

Dans ce contexte, la gestion des eaux pluviales est l'un des domaines les plus affectés. L'imperméabilisation des sols entraîne une surcharge de réseaux pouvant entraîner des inondations. De plus, la qualité des eaux pluviales peut être nuisible pour les écosystèmes en raison des polluants transportés qui proviennent de l'usure des revêtements, de pertes de lubrifiants, ou encore d'autres apports du milieu environnant. Face à ces différents risques qui se présentent, les techniques alternatives ont vu le jour. Ce sont des ouvrages de stockage et de restitution qui permettent de limiter les débordements des réseaux et la pollution rejetée lors des périodes de pluie. Il s'agit par exemple des noues, des tranchées d'infiltrations, les toitures végétalisées, les jardins de pluie ou encore les arbres de pluie.

Depuis plusieurs siècles, l'arbre est devenu un composant du paysage urbain. Il se présente comme la solution la plus innovante et la mieux adaptée car il rend plusieurs services écosystémiques. Selon Gourriec (2012) l'arbre en ville est un sujet complexe auquel est associé de nombreuses disciplines telles que : la biologie, l'esthétique, la technique, l'écologie, le social et même la politique. L'arbre rend plusieurs services écosystémiques parmi lesquels on peut citer : l'abaissement de la température, la réduction de la pollution atmosphérique et l'amélioration de la qualité de l'air par fixation de certaines poussières, la protection contre les UV, l'interception de l'eau de pluie, la purification de l'air, la protection contre l'érosion due aux vents et à l'eau...(Musy et al., 2014; Vinet, 2000).

Les arbres de pluie constituent des techniques alternatives de stockage et d'infiltration permettant aujourd'hui de gérer la pluie au plus près de son point de chute, en amont des réseaux, diminuant les inondations en aval (Seidl, 2019). De récentes études ont porté sur le rôle de ces arbres, mais peu ont quantifié le potentiel des arbres de pluie et leur impact sur le bilan hydrologique urbain (IBGE 2014; Tobio, Maniquiz-Redillas, et Kim 2014; Elliott et al. 2018;).

L'objectif général de la thèse est d'optimiser les fonctions hydrologiques des arbres d'alignement, pour permettre une gestion à la source des eaux pluviales adjacentes en maintenant voir améliorant le fonctionnement eco-physiologique des arbres. Cet objectif exprime maintenant le besoin de traitement de ruissellement et le maintien de l'arbre en bonnes conditions physiologiques. Il s'agira plus spécifiquement de :

- Décrire le fonctionnement hydrologique d'un arbre de pluie à travers un dispositif expérimental, celui de SenseCity
- Décrire le comportement physiologique de l'arbre en condition d'ennoyage
- Proposer une typologie des dispositifs et des pistes pour le dimensionnement de la technique de l'arbre de pluie

Le présent rapport va débiter par une brève revue des dispositifs d'arbre de pluie, ensuite on abordera le fonctionnement du dispositif expérimental de SenseCity et on terminera par le dispositif de Baignolet.

1 Revue bibliographique générale

1.1 Impact de l'urbanisation sur l'hydrologie

1.1.1 *Impact de l'urbanisation sur le ruissellement*

La période qui a suivi la fin de la deuxième guerre mondiale est celle d'une envolée de la croissance urbaine, traduite par la multiplication des villes et des grandes métropoles dont la taille ne cesse d'accroître (Moriconi-Ebrard, 1993). L'urbanisation peut se définir comme un processus continu de développement des villes et de la croissance de la population et puise ses racines dans l'histoire.

Ce phénomène peut s'expliquer par des facteurs historiques, politiques et socioculturels. Les deux principaux facteurs sont l'exode rural et le développement tourné vers l'industrie et les services qui sont sources d'emploi. En France la population est majoritairement urbaine, environ 80 % de la population est regroupée dans les agglomérations urbaines (Rousset et Giraud 1979). L'urbanisation présente aussi bien des avantages que des inconvénients. Elle permet d'une part d'assurer au pays une autonomie économique en développant le marché intérieur et en diminuant sa dépendance vis-à-vis de ses exportations. D'autre part elle affecte le cycle de l'eau par l'imperméabilisation des sols.

Le ruissellement est un phénomène constitutif du cycle de l'eau. Jaillet et al. (2012) le définissent comme la circulation de l'eau à la surface du sol avec un aspect diffus sur des terrains ayant une topographie homogène et se concentrant lorsqu'elle rencontre des dépressions topographiques. En hydrologie, il s'agit de la part de précipitation qui s'écoule à la surface du sol (Carrier et al., 2013).

Les précipitations sont la principale origine des ruissellements. Les conditions climatiques, la géomorphologie et l'occupation des sols sont autant de paramètres qui influencent la forme du ruissellement. Le ruissellement est à l'origine de phénomènes violents tels que des inondations, de l'érosion, des glissements superficiels ou des coulées de boue (Lagadec, 2018). Le ruissellement, qu'il soit en milieu rural ou urbain impacte les enjeux humains ou structurels par les risques induits. Il est ainsi un facteur d'aggravation des pollutions agricoles liées aux engrais ou pesticides utilisés qui atteignent les cours d'eau.

1.1.2 *Impact de l'urbanisation sur les risques d'inondation*

L'urbanisation réduit les terres naturelles et impacte de différentes manières le cycle de l'eau. En effet le ruissellement en milieu urbain est source de plusieurs catastrophes et en particulier les inondations. Lors des événements pluvieux intenses, la surcharge des réseaux de drainage souterrains peut provoquer des inondations en raison d'importantes interactions entre l'écoulement de surface et l'écoulement de conduite. Elle peut aussi être causée par des pluies intenses, des crues soudaines ou des inondations côtières (Zaiem, 2012). Des études ont montré que les événements pluvieux intenses sont plus fréquents sous l'effet du changement climatique (Trenberth et al., 2003). L'activité humaine, le changement climatique, l'occupation du sol ainsi que d'autres facteurs sont à l'origine de transformation du régime hydrologique et hydraulique. Mais la principale cause de ces inondations reste l'imperméabilisation des sols, la couverture des sols par l'asphalte ou le béton ou autres matériaux entraîne une augmentation des volumes ruisselés car l'eau n'arrive plus à s'infiltrer comme le mentionne Chocat (1989) dans le cas de la France. L'imperméabilisation des sols est traduite le plus souvent en milieu urbain par les voiries, les espaces de circulation ou de stationnement et constitue de ce fait une suppression de l'infiltration de l'eau dans le sol provoquant un ruissellement quasi immédiat après le début

des précipitations (DDTM, 2014). Le temps de réponse est ainsi réduit ce qui crée une montée rapide des eaux, une augmentation du débit de pointe et un accroissement des volumes ruisselés d'où les risques d'inondations. Toutes les précipitations sont transportées vers les eaux de surface ou les systèmes d'égouts. Plusieurs villes sont touchées par ces inondations urbaines, on peut citer le cas de Nîmes, le 3 octobre 1988, le Puisserguier le 28 janvier 1996, dans l'Aude le 12 novembre 1999 ou encore dans le Gard en 2005 et bien d'autres encore (Le Quentrec et al., 2009).

Les inondations ont un impact énorme sur l'environnement et la société. Les conséquences peuvent se résumer à des pertes économiques et en vies humaines. On peut citer par exemple les événements de Nîmes en octobre 1988 qui a fait 9 victimes avec des pertes 625 millions d'euros, de Vaison la Romaine en septembre 1992 qui a fait 46 victimes avec des pertes estimées à 460 millions d'euros, ou encore celui du Gard en septembre 2002 avec 23 victimes et des pertes de 1200 millions d'euros (Nicolas, 2010). Il en est de même pour les inondations du Var, des Bouches-du-Rhône et du Vaucluse en juin 2010 qui a fait plus de 26 victimes. Les eaux de ruissellement produisant ces inondations sont aussi sources de pollution car elles transportent divers contaminants en zone urbaine.

1.1.3 Impact de l'urbanisation sur la qualité des eaux pluviales

Les eaux pluviales représentent les précipitations qui arrivent au sol ou une surface construite ou naturelle pouvant les intercepter ou les récupérer comme les chaussées, les toitures... Sur les chaussées par exemple en milieu urbain, ces eaux se retrouvent polluées par plusieurs contaminants. L'origine des polluants des eaux pluviales sont diverses, on peut citer les émissions gazeuses provenant de la combustion des carburants, l'usure des revêtements, les pertes de carburants et de lubrifiants, les toitures, les apports de produits chimiques et divers apports du milieu environnant (Boisson, 1998). En effet, l'eau de pluie lessive les surfaces imperméables et se chargent de divers polluants résultant de l'action anthropique. Les eaux pluviales sont ainsi responsables de la détérioration de la qualité des milieux récepteurs (Bressy, 2010). Des études en France ont montré que les eaux de ruissellement en milieu urbain sont chargées de différents contaminants (Gromaire, 2000; Saget, 1994). Les contaminants possibles en milieu urbain sont : les matières en suspension, la matière organique, les nutriments, les bactéries ou encore les métaux traces. Les taux et les types de contaminations varient en fonctions des surfaces lessivées. L'occupation du sol influence ainsi la qualité des eaux pluviales. Le Tableau 1 illustre cette différence de taux de contaminants selon les sites.

Tableau 1: Ordre des grandeurs des concentrations selon différents sites (Gromaire et al., 2013)

Polluants	Concentrations				
	Voiries urbaines			Autoroutes	Parkings
	Trafic faible (a)	Trafic moyen (b)	Trafic fort (c)		
MES (mg/l)	11,7 – 117 84,5	59,8 – 240 99	69,3 – 260 160	41,3 – 762 92	98 – 150 129
DCO (mg/l)	70 – 368 120			107*	50 – 199 70
Cd (µg/l)	0,4 – 1,4 0,5	0,4 – 13,8 1,9		3,0 – 3,7 3,4	1,2*
Cu (µg/l)	47 – 75,9 60,4	51,7 – 103,8 97	65,6 – 143,5 90	16,1 – 120 40	6 – 80 43
Pb (µg/l)	25 – 535 170			2,4 – 224 100	15,4 – 137 78,5
Zn (µg/l)	129,3 – 1956			70 – 660	125 – 526

	407	119	281
HAP (µg/l)	0,16 – 4,5 0,22	0,31 – 21,8 2,34	1,62 – 3,5 2,3

Suivant ce tableau, le trafic faible correspond à un trafic inférieur à 3000 véhicules par jour ; le trafic moyen entre 3000 à 10000 véhicules par jour et le trafic fort supérieur à 10000 véhicules par jour. La pollution due aux métaux traces par exemple est plus liée aux voiries sous l'effet du trafic routier.

Ces contaminants ont des effets néfastes sur l'environnement. En effet, les eaux ruisselées en milieu urbain atteignent les milieux récepteurs avec des matières minérales et organiques qui modifient les propriétés physiques, chimiques et biologiques des hydrosystèmes entraînant des phénomènes eutrophisation ou des effets toxiques (Boisson, 1998). Ces effets toxiques sont responsables de la mortalité piscicole comme ce fut le cas de la région parisienne en 1990 et en 1992 (Thévenot, 1993).

Face à ces effets du ruissellement en milieu urbain, il est nécessaire de trouver des solutions. De ce fait, la gestion des eaux pluviales de nos jours a ainsi pour objectif de limiter la surcharge des réseaux d'assainissement pour éviter les inondations et limiter la contamination des milieux récepteurs que sont les cours d'eau, les fleuves et autres. C'est dans cette optique que les techniques alternatives ont vu le jour un peu partout dans le monde.

1.2 Les espaces verts urbains

Les espaces verts en milieu urbain jouent un rôle dans l'adaptation au changement climatique dans le contexte actuel d'urbanisation croissante. En urbanisme, l'espace vert désigne « *tout espace d'agrément végétalisé (engazonné, arboré, éventuellement planté de fleurs et d'arbres et buissons d'ornement, éventuellement garni de pièces d'eau et cheminements)* » Une définition plus large suivant le projet ISAdOrA présente l'espace vert comme tout espace petit ou grand, public ou privé dans lequel la végétation est présente de façon plus au moins importante. (EHESP et al., 2020)

Selon Choay et Merlin (2010), l'espace vert désigne tout espace végétalisé, public ou privé présent dans une zone urbaine ou urbanisable et classé suivant une typologie. De ce fait, on peut différencier les espaces verts suivant leurs usages, leur degré d'entretien ou selon la formation végétale (Portalez, 2016). On peut citer : les parcs et squares, les jardins, les espaces naturels aménagés, les arbres d'alignement, les surfaces enherbées, les boisements, les massifs fleuris, etc. Tous ces espaces verts présentent des bénéfices aussi bien pour la santé que pour l'environnement.

1.2.1 La multifonctionnalité des espaces verts en ville

1.2.1.1 *Les effets des espaces verts sur le climat et l'atténuation des îlots de chaleur*

On a pu voir la différence entre le climat en milieu rural par rapport au milieu urbain qui est fortement influencé par les bâtiments, les infrastructures... Les paramètres climatologiques les plus affectés sont ainsi : la température de l'air, la vitesse de vent, l'humidité de l'air, l'intensité de lumières... Les végétaux en général agissent sur ces paramètres en rafraîchissant l'air et en atténuant les îlots de chaleur dans les villes de par leur transpiration et leur ombrage.

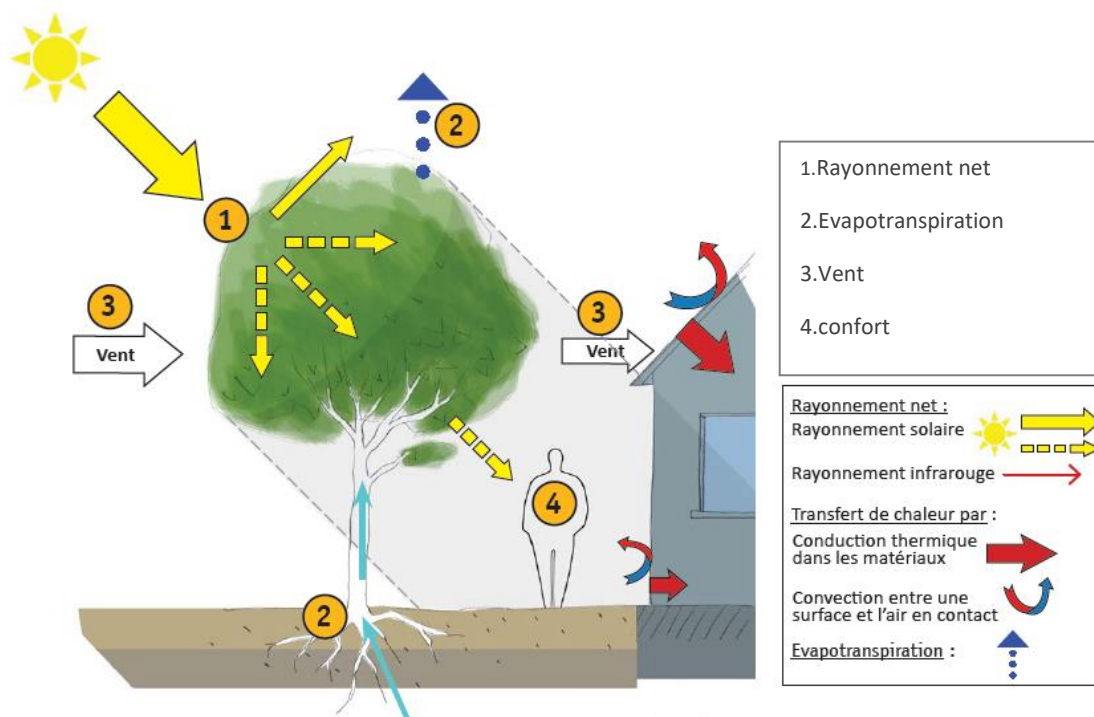


Figure 1: Schéma descriptif du fonctionnement énergétique/thermique d'un arbre en milieu urbain (Pommier et al., 2014)

1.2.1.2 Ombrage des plantes

L'ombrage des arbres permet une diminution des températures locales tout en réduisant la quantité d'énergie solaire reçue par les bâtiments. Le houppier et le tronc de l'arbre sont les parties de l'arbre qui apportent le plus d'ombrage. L'interception du rayonnement solaire dépend des propriétés radiatives des feuilles et de leur agencement dans le houppier. L'ombrage des arbres dépend de l'espèce d'où la variation de l'interception du rayonnement solaire. Les travaux de Johnston et Newton (2004) ont ainsi montré que les arbres dont le couvert est fin et léger interceptent entre 60 et 80% de la luminosité solaire et ceux dont le couvert est dense et épais interceptent jusqu'à 98%.

L'ombrage des arbres reçu par un bâtiment fait qu'il reçoit moins d'énergie par conduction thermique à travers les murs. En été les consommations d'énergies pour la climatisation sont alors moins importantes. Certes, en hiver si le feuillage est encore dominant, il peut avoir une consommation d'énergie plus importante. (Pommier et al., 2014)

1.2.1.3 Transpiration des plantes

La transpiration de la plante est un processus d'évacuation de l'eau sous forme de vapeur à partir des stomates des feuilles vers l'atmosphère. Ce mécanisme sert de moteur pour la montée de la sève en assurant le transfert des sels minéraux aux feuilles et l'équilibre hydrique. Ce processus consomme de l'énergie ce qui a un effet refroidissant sur son environnement proche et permet aussi à la plante de réguler sa température foliaire (Saudreau et al., 2015). Plusieurs facteurs influencent la transpiration d'une plante. Il s'agit entre autres de la surface foliaire, de l'humidité du sol, de l'humidité de l'air, du rayonnement... Ce rafraîchissement par transpiration des plantes n'est possible que si ces dernières disposent d'une quantité suffisante d'eau. En milieu urbain, le flux de chaleur lié à la transpiration des plantes compense l'apport de chaleur par rayonnement. Un important rayonnement est intercepté et absorbé par l'arbre lors de la transpiration et de la photosynthèse. Lorsque la plante se trouve dans les conditions

climatiques, physiologiques et pédoclimatiques adéquates, la température de la surface foliaire sera largement supérieure à celle d'une surface minérale quelconque, contribuant ainsi à faire baisser globalement des températures de la zone (Oke, 2002). D'après Johnston et Newton (2004) un arbre mature transpirant 450 litres d'eau par jour a un effet refroidissant équivalent à celui de cinq climatiseurs fonctionnant 20h/j. Sous les arbres individuels ou petits groupe d'arbres par exemple, les températures de l'air en milieu de journée à 1.5m du sol sont de 0.7 à 1.3°C plus fraîches que dans une zone ouverte (Nowak, 2002).

Toutefois, la température du milieu n'est pas la seule variable qui influence le confort thermique d'une personne et donc la température ressentie. D'autres indicateurs ont été développés : la Température Physiologique Équivalente (PET) dépendant de la température de la peau et du corps, du taux de transpiration et l'habillement ; Universal Thermal Climate Index (UTCI) dépendant des paramètres du confort thermique ou encore le Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) dépendant de l'humidité, de la température de l'air et du globe noir. L'UTCI est l'un des indicateurs les plus développés afin d'évaluer l'impact du climat sur le confort thermique des populations. Il calcule les échanges de chaleur entre le corps humain et son environnement. Il intègre des paramètres du confort thermique (la température de l'air, la vitesse de l'air, le métabolisme, l'habillement, l'humidité relative de l'air et la température des parois) (Ponsar et al., 2017). Les études ont ainsi montré que les arbres peuvent améliorer la température ressentie comme le témoignent les travaux de Coutts (et al. 2016) à Merlbourne, montrant que la présence d'arbres permet de réduire la température ressentie et donc le stress thermique de plus de 6°C.

De par la transpiration et l'ombrage, les plantes atténuent les îlots de chaleur. Leur impact varie selon les caractéristiques de la végétation, forme, feuillage ou disposition. Il est ainsi défini un sous -indice climatique (Seidl & Saifane, 2020) à partir de l'évapotranspiration et l'ombrage respectivement liés à l'indice foliaire (LAI) et à la surface de projection au sol.

De plus, la végétation extérieure améliore aussi le confort thermique dans les bâtiments par réduction du taux d'infiltration de l'air, frais en hiver et chaud en été. De ce fait, elle limite les dépenses énergétiques et les émissions polluantes, liées au chauffage et à la climatisation des locaux et permet donc une efficacité énergétique (APPA & ATMO, 2015).

1.2.1.4 Les effets des espaces verts et des arbres sur la qualité de l'air

Le milieu urbain concentre une multitude de pollutions atmosphériques provenant du trafic routier, des bâtiments ou des rues. Plusieurs études montrent que les végétaux peuvent avoir un effet positif sur la qualité de l'air par rétention des polluants suivant le métabolisme de la plante (échange entre l'atmosphère et la plante). Les arbres peuvent filtrer des substances volatiles ou des particules atmosphériques suivant leurs caractéristiques physiologiques. L'arbre élimine la pollution atmosphérique gazeuse par absorption via les stomates des feuilles où les gaz se diffusent dans les espaces intercellulaires et peuvent être absorbés par des films d'eau pour former des acides ou réagir avec les surfaces internes des feuilles (Nowak et al., 2006). Les arbres interceptent également les particules en suspension dans l'air. Les études de Nowak (2002) cité par Selmi 2014) ont ainsi montré que les arbres urbains de New York éliminent 1800 tonnes de polluants atmosphériques par m² de couvert végétal par an. En plus des feuilles, les branches peuvent retenir les particules et les racines peuvent éliminer certains polluants par infiltration. La rétention des particules dépend de la surface foliaire et donc de l'espèce et de la distance entre les arbres (Selmi 2014; Cuny et al. 2015; Seidl et Saifane 2021).

Les études ont montré par exemple que les conifères et les arbres à feuilles rugueuses retiennent plus de particules en suspension que les arbres à feuilles larges (Wania, 2007).

De plus, lors de la photosynthèse, l'arbre produit de l'oxygène et absorbe du dioxyde de carbone qui améliore aussi la qualité de l'air. La photosynthèse est la synthèse de la matière organique à partir de l'eau (H₂O) puisée par les racines dans le sol, le dioxyde de carbone (CO₂) capté par les feuilles et l'énergie solaire. L'énergie solaire est utilisée pour oxyder l'eau et réduire le gaz carbonique afin de synthétiser des substances organiques (glucides).

C'est à partir de ces sucres synthétisés que la plante fabrique sa biomasse. Les arbres sont des puits de carbone à l'échelle de la ville (Laille et al., 2014). Ils captent du CO₂ et le recyclent en matière organique (bois, feuilles, tiges). Les travaux de Selmi (2016) à Strasbourg ont ainsi montré que la séquestration annuelle brute pour un arbre est de l'ordre de 51kg/an (DBH entre 106 et 114 cm) et de 2kg/an (DBH entre 7.6 et 15.2 cm). Les arbres ne séquestrent le carbone que pendant leur phase de croissance, leur aptitude diminue à maturité et ils commencent à émettre du dioxyde de carbone. L'analyse de la forêt urbaine d'Oakland a montré un taux de stockage de 11 tonnes de carbone métrique /hectare (Nowak, 1993). D'après les statistiques de la Société de l'arbre du Québec, un arbre de 30 ans fixe en moyenne 9.4kg de carbone par an (Langlois et al., 2004).

1.2.1.5 Les effets des espaces verts sur la santé humaine et le bien-être

L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) définit la santé comme « *un état de complet bien-être physique, mental et social, [qui] ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité* » (OMS, 1946). Des études ont ainsi montré que les espaces verts influencent positivement la santé physique, mentale et le confort environnemental. (Dillen et al., 2012; García de Jalón et al., 2018; Gascon et al., 2015; Laille et al., 2014)

D'après les études de García de Jalón (et al. 2018) sur une population espagnole, la présence d'espace verts influence positivement la quantité d'activités physiques qu'elle pratique. En effet, la présence d'espaces verts, d'alignement d'arbres incite les riverains à faire du sport (le vélo, la marche, la course à pied...) de manière spontanée en plein air. (Laille et al., 2014). Il a de plus été démontré des avantages des activités physiques sur la santé humaine. Parmi ces avantages, on peut citer : la prévention de l'obésité, des maladies cardio-vasculaires ou encore de certains cancers. De plus, le feuillage des arbres permet de protéger les habitants des rayons ultraviolets. D'après (Grant et al., 2002) les lieux ombragés peuvent conserver des taux d'exposition aux UVB (rayons ultra-violets liés au bronzage et ne pénétrant que la couche protectrice de l'épiderme) importants 40 à 60% d'exposition directe.

Outre la santé physique, la végétation a une incidence positive sur le bien être psychologique et donc mental. Selon plusieurs auteurs, la vue des arbres ou massifs fleuris repose l'esprit, apaise les tensions et améliore la santé psychologique. (Laille et al., 2014; Vergriete & Labrecque, 2007; Westphal, 2003). La présence du végétal réduit le stress qui est un facteur de risque de maladie mentale. La vue d'un espace vert produit des réponses physiologiques positives indiquant un état détendu (Sugiyama et al., 2018).

Toutefois, certaines espèces peuvent être nuisibles pour les personnes allergiques aux pollens ou d'autres substances dérivées des arbres. Aussi, l'arbre peut rejeter du carbone à maturité.

Afin d'éviter tout effet néfaste sur la santé, il est nécessaire de faire un choix judicieux des essences à mettre en place suivant une analyse d'impact préalable.

1.2.1.6 Les effets des espaces verts sur le cadre de vie et la vie sociale

Les espaces verts participent à l'attractivité des villes et facilitent les interactions sociales entre résidents à proximité, rappelons l'importance d'un lien social sur la santé mentale. Ces interactions qui renforcent la cohésion sociale sont des moyens de participer à la vie communautaire et de développer un sentiment d'acceptation et d'attachement communautaire (Arnberger & Eder, 2012).

En ce qui concerne les arbres, certaines espèces revêtent une valeur patrimoniale et sociale de par leurs caractéristiques (rareté botanique, âge, lien avec le patrimoine culturel ou historique de la ville...) (Pommier et al., 2014). L'arbre est un élément structurant des paysages, ordonne et structure les espaces publics en participant à la richesse des ambiances des villes. De plus son implantation en alignement produit de la continuité, focalise le regard et ponctue les promenades.(Delfanne et al., 2017)

1.2.1.7 Les effets des espaces verts sur l'hydrologie, la protection des sols et des cours d'eau

La végétation peut constituer un levier de protection des sols en luttant contre l'érosion hydrique. Elle réduit ainsi l'énergie de l'érosion pluviale en interceptant les précipitations par ses parties aériennes. L'interception dépend de la densité du feuillage et réduit l'énergie cinétique de la pluie atténuant ainsi l'effet splash. Dans un couvert forestier les précipitations inférieures en 2mm sont presque entièrement interceptées (Geddes & Dunkerley, 1999; Giordano, 1994). De plus les espaces verts constituent un barrage au ruissellement en favorisant l'infiltration de l'eau. D'après Giordano (1994) les sols forestiers par exemple présentent de meilleures propriétés physiques et chimiques et sont plus poreux ce qui favorise l'infiltration. Sa comparaison de ruissellement de terrains nus et de forêt a montré une diminution du ruissellement en forêt et une augmentation du temps d'écoulement..

Un maintien des sols est aussi assuré par les systèmes racinaires de la végétation en améliorant la cohésion des sols et en renforçant leurs propriétés mécaniques.les systèmes racinaires favorisent aussi la sédimentation des particules par le piégeage des sédiments (Rey et al., 2004). Ces différents effets peuvent varier suivant la nature de l'espace vert.

Les eaux de ruissellement lessivent les substrats et se chargent de polluants qui rejoignent par la suite les cours d'eau. Les espaces verts représentent des surfaces perméables et donc des zones d'infiltration réduisant le ruissellement et protégeant ainsi la qualité des cours d'eau. De plus la ripisylve permet une stabilisation des berges des cours d'eau.

1.3 Les arbres d'alignement classiques

1.3.1 Généralités sur les arbres en ville

Les arbres d'alignement sont des espèces d'arbres couramment plantées de manière linéaire et régulière le long des routes et des rues pour les orner et les ombrager. Selon Larcher et Gelgon (2000), ils correspondent à des plantations d'arbres sur une ou plusieurs lignes, le plus souvent mono spécifiques, parfois avec une alternance de deux espèces ou plus. Ils sont présents dans les villes en bordure des principales voies de communication, rues, avenues, boulevards, quais, sur les places, promenades, mails et en dehors des villes en bordure des routes, chemins et canaux. Ces structures sont utilisées pour souligner une circulation, donner du rythme, créer un

fond, offrir un ombrage. Des différentes définitions, on peut noter qu'au-delà de l'esthétique, les arbres d'alignement assurent diverses fonctions.

L'histoire des plantations d'alignement, qui furent un des fleurons du paysage français est née il y a plus de quatre siècles, sous François Ier, qui obligea, par voie de règlement, les seigneurs et les habitants des campagnes à planter des ormes le long des grands chemins et des routes royales (Derinck, 1992). A Paris, l'arbre est devenu une composante du milieu urbain. Les premiers arbres d'alignement sont réalisés au mail de l'Arsenal en 1597 et se répandront dans la ville avec l'urbanisme haussmannien. Aujourd'hui, la ville de Paris compte plus de 100000 arbres d'alignement avec plus de 150 espèces différentes (APUR, 2010). Les espèces les plus rencontrées sont les platanes (38%), les marronniers (15%), et les tilleuls (10%).

La terre parisienne est peu propice au vivant en raison du sol qui est généralement constitué de détritiques, de toutes sortes, impropres et souvent hostiles à la végétation (Pellegrini, 2012). Dans la suite aux travaux de constructions, de nivellements, de déblais ou remblais, le sol naturel n'existe plus sur les emplacements destinés aux plantations. Un sol convenable pour les plantations d'alignement, pour assurer leur durée suffisante, doit présenter les deux conditions essentielles suivantes : être favorable à la végétation par sa nature, c'est-à-dire sa composition minérale et organique, et présenter un volume suffisant (Chargueraud, 1896). De ce fait la plantation des arbres nécessite des précautions particulières pour assurer le développement harmonieux des espèces.

En effet, les arbres d'alignement constituent une stratégie d'adaptation à certains effets du changement climatique en zone urbaine. Mais tous les arbres ne sont pas adaptés en raison de différentes contraintes qui peuvent se présenter. Certaines contraintes peuvent être générales comme la saisonnalité. La saisonnalité par exemple qui implique un effet positif en été (fraicheur) et un effet négatif en hiver (assombrissement en hiver, feuilles mortes à l'automne). Certaines sont plus spécifiques et concernent leurs caractéristiques physiques (hauteur, circonférence, diamètre, racines...), leur rusticité, leur gestion ou entretien et les contraintes du sol. Le choix de l'essence doit tenir compte de l'espace vital disponible pour une croissance optimale de l'arbre sans pour autant nuire aux usagers et aux infrastructures aux alentours (bâtiments, mobilier urbain...) (CD92, 2018). En effet les racines des arbres peuvent abîmer les trottoirs, les canalisations ou fissurer les murs. Il est donc nécessaire de trouver des espèces qui s'adaptent à l'environnement direct. Le choix des espèces est aussi fonction des dimensions de la voirie urbaine. Vogt (2017) identifie plusieurs facteurs impactant le choix des espèces. On peut citer entre autres : les conditions climatiques, les conditions du sol, les techniques de mise en œuvre, les exigences humaines comme présenté sur la figure 2.

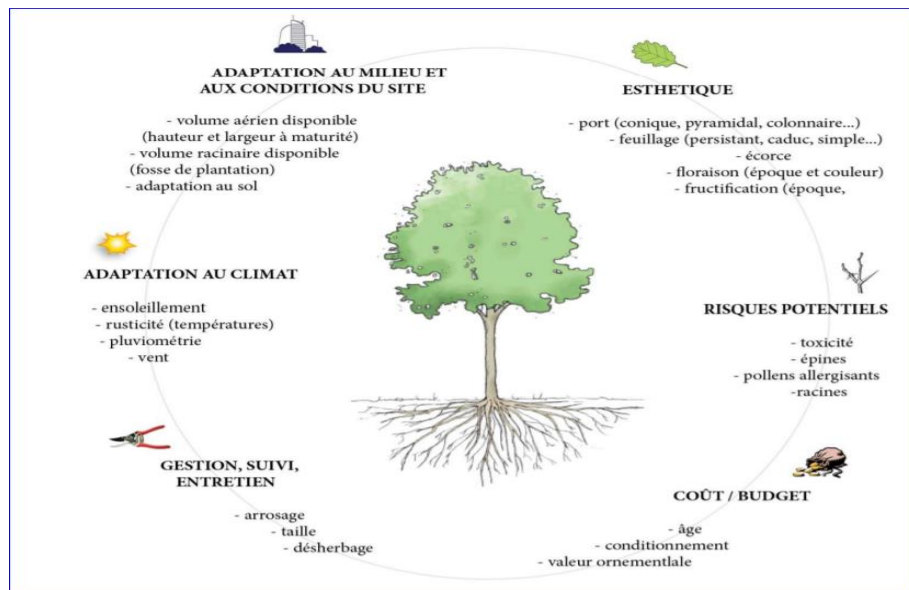


Figure 2: Critère de choix de l'arbre en milieu urbain (Gourrierc 2012)

En général, les végétaux disponibles se composent d'essences locales existant dans les forêts ou campagne, des végétaux exotiques et de nouvelles variétés créées et multipliées par les pépiniéristes (Haddad et al. 2007). En France, le choix des espèces a qualifié le visage de certaines régions ; on associe ainsi les platanes à la Provence, les mirabelliers à la Lorraine, les chênes à la Bretagne... (Fournier 2005). Selon différents auteurs, les arbres les plus adaptés à la zone urbaine tempérée sont : les platanes (*Platanus*), les marronniers (*Aesculus hippocastanum*), les tilleuls (*Tilia*), les saules (*Salix*), les peupliers (*Populus*), les châtaigniers (*Castanea sativa*), les chênes (*Quercus*), les liquidambars (*Liquidambar styraciflua*), les sorbiers (*Sorbus aria*)... (Juillerat et Vögeli 2004; Subburayalu et Sydnor 2012; Gourrierc 2012; Swoczyna et al. 2015; TDAG 2016; CEREMA 2019).

De toutes ces différentes espèces, le platane est celui qui arrive le mieux à résister à l'imperméabilisation des sols et au déficit hydrique (CD92, 2018). Dans le Grand Lyon par exemple, l'espèce la plus représentée en 2013 est le platane (TDAG, 2016).

Au-delà du choix de l'espèce, la plantation de l'arbre est une opération importante qui tient compte du sol et de la technique. Le sol doit assurer la stabilité des arbres, l'oxygénation des racines et l'approvisionnement en eau et en élément minéraux nécessaire, à la croissance. En raison de l'artificialisation des sols en zone urbaine, la plantation des arbres d'alignement doit être complétée par un apport de substrat adéquat pour les plantes et un drain permettant l'évacuation des eaux. Les arbres d'alignement doivent présenter à leur pied une surface perméable spacieuse. La terre dans la fosse de plantation doit présenter une structure physique équilibrée (sable, argile, limons, gravier) dépendant de l'espèce et riche en engrais organique. Il faut noter que l'opération de plantation en elle-même doit tenir compte des conditions climatiques (hors période de gel...).

1.3.2 Mise en place des plantations

1.3.2.1 Fosses de plantation

L'espace vital des arbres d'alignement étant souvent très restreint, il convient de respecter la surface et le volume des fosses de plantation et de n'y installer aucun ouvrage ni mobilier urbain (CD92, 2018). L'absence de réflexion dans le choix de la structure de l'alignement (distances de plantation, type de fosses...) est la source de nombreux problèmes de développement pour les arbres d'alignement, parce que l'on oublie le caractère évolutif du végétal (Haddad, 1997). « La fosse de plantation est l'espace souterrain aménagé qui permet l'ancrage et l'alimentation hydrique et minérale des arbres. Elle doit le plus souvent être préparée avec des travaux de décompaction des parois et du fond de forme afin de permettre une bonne colonisation racinaire. Sur sol imperméable, on prévoit généralement une couche drainante en fond de fosse sur une vingtaine de centimètres » (Gourriec, 2012b).

Ces fosses peuvent être de forme carrée (place suffisante) ou rectangulaires (plantation d'alignement en rue). Dans son article sur la politique des arbres, Lopez (2014) classe les arbres suivant quatre classes en fonction de leur grandeur. Ainsi il identifie des arbres de 1ère grandeur, 2ème grandeur, 3ème grandeur et 4ème grandeur qui présentent des hauteurs respectives de plus de 20m, de 15 à 20m, de 10 à 15m et de moins de 10m. Il fixe ainsi le volume minimal d'une fosse à 12 m³ pour les plus grands arbres de 1ère et de 2ème grandeur et à 9 m³ pour les arbres moyens de 3ème et 4ème grandeur. La profondeur minimale est de 1 à 1.5 m. En général, la majorité des racines des arbres en ville se trouvent dans les 1,3 m de sol (Lopez, 2014). En plus des fosses, l'espacement entre les arbres eux même et les bâtiments sont des paramètres non négligeables. Chargueraud (1896) indique que les arbres sont plantés à 3m au moins des bâtiments avec une distance minimale de 1m entre les branches et le bâtiment.

Les Tableau 2 Tableau 3 présentent un résumé des dispositions à respecter selon plusieurs auteurs. Selon le type d'arbre ou l'espèce, les paramètres de plantation varient.

Tableau 2:Résumé des dispositions des essences les plus fréquentes

Espèces	Hauteur maximale (m)	Espacement entre arbres (m)	Profondeur plantation (= de la fosse ?) (m)	Auteurs
Platane (<i>Platanus</i>)	20-30	8		(Chargueraud 1896)
	20-30	8-10	1.3-1.5	(Lefebvre, 1897)
Marronniers rouge (<i>Aesculus x carnea</i>)	12-15	6	1.3-1.5	(Lefebvre, 1897)
Marronniers d'Inde (<i>Aesculus hippocastanum</i>)	15-20	6	1.3-1.5	(Lefebvre, 1897)
Marronniers	15-20	7	/	(Chargueraud 1896)
Marronnier à fleurs rouge (<i>Aesculus x carnea</i>)	10	6.5	/	(De Saint-Lambert, 2013)
Erable plane (<i>Acer platanoides</i>)	10-14	5.5	1.3-1.5	(Lefebvre, 1897)
	10-15	6	/	(Chargueraud, 1896)
Erable sycomore (<i>Acer pseudoplatanus</i>)	18-20	6	1.3-1.5	(Lefebvre, 1897)

Tilleul (Tilia)	15-20	5	1.3-1.5	(Lefebvre, 1897)
	15-20	7	/	(Chargueraud 1896)

Tableau 3: Disposition selon ((Lopez, 2014; TDAG, 2016)

Types d'arbres	Hauteur (m)	Fosse (m³)	Profondeur de la fosse ?(m)	Espacement entre les arbres (m)	Espacement du bâti (m)	Exemples d'espèces
Arbre à petit développement	5-10	5-9	1.2	5	3-5	Lilas des Indes, Sorbier des oiseleurs
Arbre à moyen développement	10-15	5-9	1.2	6-8	3-5	Poirier Caleriana, Bouleau verruqueux
Arbre à grand développement	+15	8-12	1.2	8-10	5-10	Platane commun, Noisetier de Byzance

Il est nécessaire de maintenir un espacement suffisant entre l'espace d'enracinement et les réseaux à proximité (canalisation, électricité, télécommunication.) afin d'éviter le danger que pourrait constituer le système racinaire. En France, la norme AFNOR NF P 98-332 les « Règles de distance entre les réseaux enterrés et règles de voisinage entre les réseaux et les végétaux » impose une distance minimale de deux mètres entre l'arbre et les réseaux enterrés. Ainsi pour protéger les réseaux, on munit la fosse d'un film anti racinaire (type Root Control, géotextile, plaques en polypropylène ...) ou d'une coque en polyéthylène. Il doit être prévu une couche drainante lorsque le sous-sol est imperméable.

1.3.2.2 Substrat

Le substrat est un support dans lequel se développe l'arbre et qui permet d'améliorer la capacité de portance des espaces d'enracinement. Il peut être constitué de roches, sable, terre, bois ou compost constitué de résidus de jardinage ou de déchets solides autres que des résidus industriels. Ainsi le substrat peut être de la terre végétale, un mélange terreux et amendements ou encore un mélange de terre et de pierres. On peut classer les substrats en trois grandes catégories: 1) les substrats à base de sable, 2) les mélanges terre-pierre « classiques » et 3) le mélange terre-pierre de Stockholm aussi appelé « système de Stockholm » proposé par Björn Embren. (TDAG, 2016).

1) Les substrats à base de sable

Les substrats à base des sables ont été développés au Pays-Bas et sont composés de 90% de sable de silice dont les particules ont 0.22 mm de taille moyenne, d'argile et enrichis de matières organiques représentant 4 à 5% du poids total. Le mélange est installé en couche et il est recommandé l'installation d'un système d'aération autour de la motte racinaire ou au fond du trou. L'inconvénient avec ce type de substrat est sa faible capacité de rétention qui peut induire un risque de stress hydrique. Les variantes de ce substrat ont été développées avec des

proportion plus élevées de sables plus grossiers afin de fournir plus de vide d'air.(Woods-Ballard et al., 2007)

2) Les mélanges terre-pierre « classiques »

Le mélange terre-pierre a l'avantage d'offrir une meilleure aération au système racinaire en raison du réseau de vide interstitiel qu'il constitue. La pierre généralement utilisée dans ce type de substrat peut être du granite ou un agrégat poreux dont la taille peut varier de 25-35 mm à 10-100 mm. La terre qui représente environ 20 à 30 % du mélange est constituée d'argile, de sable et de compost. Il faut noter que le mélange terre pierre en général assure l'enracinement des arbres en créant un sol incompressible répondant aux exigences de voirie.

3) Le système de Stockholm

Ce type de substrat est privilégié pour la qualité de l'échange gazeux et sa grande résistance mécanique. Le système est composé d'une matrice de grosses pierres angulaires (granite, blocs de béton recyclés) de 100 à 150 mm de calibre et surmontée d'une couche d'aération à base de pierres plus petites de 63 à 90 mm. Un géotextile recouvre la couche d'aération pour éviter que des particules fines des couches de fondation ne pénètrent et ne bouchent la couche d'aération. (TDAG, 2016). Ce système est pourvu d'entrées permettant à l'eau et à l'air de pénétrer librement dans le substrat. Généralement le système de Stockholm présente un espace vide de 10 à 25% permettant ainsi l'écoulement des eaux et la croissance des racines. Son avantage réside dans le fait qu'il supporte des charges de trafic plus lourdes que les systèmes précédents. (Woods-Ballard et al., 2007)

L'arbre est ensuite placé dans un substrat filtrant dont l'épaisseur peut varier de 30 à 100 cm. Ce mélange peut être composé de 60 à 75% de sable grossier de 0.6 à 2mm, un minimum de 12% de gravier fin de 5mm, d'argile et de limon à environ 30%, 2 à 5% de matières organiques (compost) (Flanagan et 2017). En ce qui concerne les arbres d'alignement, le substrat est généralement constitué de terre végétale. La terre végétale désigne en générale la couche supérieure d'un sol, née de la décomposition des matières organiques. Elle se distingue par la présence d'une activité microbienne. Elle doit présenter une qualité spécifique concernant les paramètres physiques, chimiques et biologiques. Constituée le plus souvent d'amendement (terreau de feuilles grossier, régénérateur microbien) et de fumure. Elle devra être homogène, exempte de corps étrangers et de désherbants sélectifs ou totaux (CD92, 2018). Sa structure physique doit être caractérisée par 30% de sable minimum, 70% de limons et argiles maximum et 5% pierres et graviers maximum. En ce qui concerne les propriétés chimiques, le pH doit varier de 6 à 7,5 (CAUE44 2009; Haddad et al. 2007)

1.4 Gestion des eaux pluviales par les ouvrages de gestion à la source en France

1.4.1 Evolution des systèmes d'assainissement pluvial

Au début de la mise en place des réseaux d'assainissement urbains, les eaux pluviales étaient considérées comme générant un risque sanitaire et devant de ce fait être évacuées rapidement hors de la ville. Les réseaux d'assainissement étaient conçus selon le principe du tout à l'égout qui consistait à une évacuation des eaux suivant un réseau unitaire en mélangeant les eaux usées et les eaux pluviales pour les acheminer dans une station d'épuration par des canalisations enterrées. A partir du XX^{ème} siècle les limites de ce principe ont commencé à se présenter ce qui a conduit au principe du système séparatif, c'est-à-dire une séparation des eaux usées et pluviales sur un bassin versant. En effet le principe du tout à l'égout engendrait une concentration des flux d'eau et de pollution, de même qu'une augmentation du risque d'inondation. De plus l'urbanisation croissante qui se traduit par une forte imperméabilisation des sols réduit l'infiltration de l'eau et entraîne une augmentation des volumes ruisselés accentuant ainsi les risques d'inondation. Dans ce contexte, une approche hydraulique (Desbordes, 1987) a vu le jour avec pour but d'optimiser l'utilisation des réseaux d'évacuation et les compléter par des bassins de rétention. Cette approche ne sera pas suffisante face à sa limite d'évacuation des débits de ruissellements pour des orages entraînant ainsi des inondations (Wagner et al., 2018). Elle sera alors complétée par une approche environnementale avec la naissance des techniques dites « alternatives » face aux flux d'eau et rejets de polluants par les espaces urbains. L'objectif de cette approche est la compensation de la capacité d'évacuation des réseaux d'assainissement surchargé en raison du développement urbain. Les différentes préoccupations environnementales ont conduit à une évolution de paradigme avec le développement de meilleures pratiques de gestion permettant de réguler les flux d'eaux rejetés et piéger les polluants (Cherqui et al., 2013; Chocat, 2008; Gromaire, 2020; Wagner et al., 2018).

1.4.2 Définition, état des lieux des ouvrages de gestion à la source

Les techniques alternatives (TA) ou Best Management Practices (BMP) en anglais, représentent une nouvelle approche de gestion des eaux pluviales qui s'oppose au principe du tout au réseau (Chocat 1997) et se base sur le principe de gestion à la source, au plus près du point de chute des précipitations . Elles ont été développées afin d'atténuer les effets de l'urbanisation sur le ruissellement des eaux pluviales (Robillard, 2011). Elles permettent de réguler le ruissellement par des ouvrage de stockage et/ou d'infiltration et d'évapotranspiration afin de les restituer au sol, à l'atmosphère, ou à faible débit dans le réseau de collecte (Gromaire, 2020). Ces techniques reposent sur deux fonctions principales que sont l'infiltration et le stockage. C'est une approche plus naturelle à travers la connexion au sol et l'entrée de la nature en ville.

Basées sur la nature et le plus souvent végétalisées, les TA sont de plus en plus développées en raison des différents bénéfices hydrauliques et écosystémiques. Elles jouent un rôle dans la réalimentation du sous-sol et des nappes phréatiques en eau, sur le confort thermique des riverains à travers sa végétation (de Dianous, 2019). En plus d'être moins onéreuses, elles ne nécessitent pas de grands travaux de terrassement pour leur mise en place (Maigne, 2006).

1.4.3 Aspect réglementaire de la gestion des eaux pluviales par les ouvrages de gestion à la source

Plusieurs réglementations encadrent la gestion des eaux pluviales et concernent le secteur de l'eau et de l'urbanisme. La législation nationale en France est dispersée dans plusieurs codes à savoir, le code civil, le code de l'urbanisme, le code de l'environnement... La réglementation repose essentiellement sur la loi sur l'Eau 2006 qui spécifie que les aménagements doivent limiter l'imperméabilisation des sols et ne pas aggraver le risque d'inondation et soumet les rejets importants d'eaux pluviales à une procédure.

La Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) aussi impose la mise en place d'outils pour atteindre l'objectif du bon état général des eaux souterraines et superficielles.

- Cadre réglementaire lié aux écoulements

Les législations concernant les écoulements des eaux pluviales sont présentées dans le code civil ou le code de l'urbanisme qui réglemente les servitudes d'écoulement et l'utilisation des eaux pluviales à travers les articles 640, 641 et 681.

L'article 640 : « Tout propriétaire a le droit d'user et de disposer des eaux pluviales qui tombent sur son fonds. »

L'article 641 : Suivant l'article 640, « si l'usage de ces eaux ou la direction qui leur est donnée aggrave la servitude naturelle d'écoulement établie par l'article 640, une indemnité est due au propriétaire du fonds inférieur »

Les articles 640 et 641 prévoient que les communes délimitent « les zones où des mesures doivent être prises pour limiter l'imperméabilisation des sols et pour assurer la maîtrise du débit et de l'écoulement des eaux pluviales et de ruissellement », ainsi que « les zones où il est nécessaire de prévoir des installations pour assurer la collecte, le stockage éventuel et, en tant que de besoin, le traitement des eaux pluviales et de ruissellement lorsque la pollution qu'elles apportent au milieu aquatique risque de nuire gravement à l'efficacité des dispositifs d'assainissement. »

L'article 681 : « Tout propriétaire doit établir des toits de manière que les eaux pluviales s'écoulent sur son terrain ou sur la voie publique ; il ne peut les faire verser sur le fonds de son voisin.»

- Cadre réglementaire lié aux rejets

Le rejet des eaux pluviales était régi par l'instruction technique de 22 juin 1977 avant la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 qui implique la maîtrise des eaux pluviales par les collectivités locales. Suivant l'article L 372-3 code des communes : « Les communes délimitent après enquête publique :

- Les zones où les mesures doivent être prises pour limiter l'imperméabilisation des sols et pour assurer la maîtrise du débit et l'écoulement des eaux pluviales et du ruissellement,
- Les zones où il est préférable de prévoir des installations pour assurer la collecte, le stockage éventuel et en tant que de besoin, le traitement des eaux pluviales et de

ruissellement lorsque la pollution qu'elles apportent risque de nuire gravement à l'efficacité des dispositifs d'assainissement. »

Du point de vue réglementaire, les OGS relèvent de plusieurs préconisations et de dispositions régionales. La première réglementation est liée à la limitation de débit des eaux pluviales admis dans le réseau collectif. A cela s'ajoute des préconisations au niveau régional régies par les services comme le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), Schéma d'Aménagement et de Gestion des eaux (SAGE), SDRIF.

Aussi la Loi sur l'Eau du 3 janvier 1992 établit pour les collectivités territoriales de réaliser un zonage d'assainissement suivant l'Article 35 de la Loi sur l'Eau n°92-3/Art. L.2224-10 du Code général des collectivités territoriales. Le zonage pluvial est un outil de planification des dispositions politiques dans la maîtrise de l'imperméabilisation des sols et la gestion des eaux pluviales. Les collectivités territoriales fixent par exemple les débits maximums admis au réseau collectif (Gromaire, 2020; Robillard, 2011). Une réglementation locale est transcrite dans les documents d'urbanisme comme le Plan Local d'Urbanisme (PLU) ou le Schéma de cohérence territoriale (SCoT) qui imposent des règles aux aménageurs publics ou privés et aux constructeurs et pour la maîtrise des eaux pluviales.

1.5 L'arbre d'alignement à l'arbre de pluie

1.5.1 Configuration des dispositifs d'arbres de pluie

Des études ont montré que les arbres d'alignement pouvaient jouer un rôle autres que celui de l'esthétique. Les arbres d'alignement peuvent détourner les eaux pluviales de 3 manières : Les arbres de pluie détournent les eaux pluviales urbaines de trois (3) manières : les feuilles et les branches retiennent directement l'eau de pluie (interception), la structure de l'arbre canalise l'eau vers la base du tronc (écoulement de la tige), et l'eau pénètre dans le sol via la surface du sol de la fosse (infiltration)(Elliott et al., 2018b). Des études menées en Caroline du Nord aux Etats-Unis ont montré que l'interception des arbres en zone urbaine variait entre 19,9 à 21,4% du total des précipitations lors d'orages(Berland et al., 2017). Ces différents avantages ont permis en effet de revoir la conception des arbres d'alignement afin qu'ils constituent des ouvrages de gestion des eaux pluviales à travers les arbres de pluie.

L'arbre de pluie est un arbre d'alignement dont la fosse de plantation est alimentée par le ruissellement des surfaces environnantes (trottoirs, chaussée...) avec pour objectifs de gérer quantitativement et/ou qualitativement les eaux pluviales ou encore optimiser les services écosystémiques des arbres. Plus développé dans le milieu anglosaxon sous divers noms (« tree box pit », « tree box filter », « stormwater tree », « tree well filter », « tree planting », « tree box », « Raingarden tree pits » ...), Il diffère de l'arbre d'alignement par la conception de la fosse de plantation et des différents constituants de celle-ci. Il existe différentes configurations des arbres de pluie que nous verrons par la suite qui offre diverses solutions autant pour la gestion du ruissellement que pour le bien-être et la longévité de l'arbre. On peut résumer les différences entre les arbres d'alignement classiques et les arbres de pluie à ces différents points :

- Un système pour diriger le ruissellement vers les arbres,
- Un sol spécialement conçu pour accueillir le ruissellement et le développement des racines (pour de nouvelles plantations) ;
- Une conception pour le stockage et le traitement des flux entrant ;

- Un système de drainage pour évacuer le volume excédentaire ;

L'arbre de pluie est une nouvelle technique développée depuis une dizaine d'année. Peu d'articles scientifiques ont étudié cette technique, la plupart portent essentiellement sur les arbres d'alignement dont la conception est différente de celle de l'arbre de pluie. De ce fait nous nous sommes dirigés vers la littérature grise où nous avons eu plus d'éléments. Une dizaine de dispositifs d'arbre de pluie ont été identifiés dans des guides, des rapports et quelques articles. La majorité provient des milieux anglosaxons notamment les Etats-Unis, la Nouvelle-Zélande, l'Australie... et sont élaborés par des instituts de recherche en collaboration avec des collectivités ou des bureaux d'études. L'analyse de plus d'une dizaine de guides a montré une variété de dispositifs d'arbre de pluie qui peuvent être distingués suivant leur fonctions de service. On peut ainsi avoir des arbres de pluie conçus pour :

- Maîtrise du ruissellement (en volume et débit)
- Maîtrise des flux polluants
- Développement de l'arbre et services écosystémiques
- Maintien du cycle de l'eau

Certains dispositifs peuvent combiner plusieurs objectifs de gestion, les ouvrages les plus répandus portent en effet sur la maîtrise du ruissellement et des flux de polluants. L'analyse des différents guides a montré que la configuration de l'arbre de pluie n'est pas fixe et présente une grande diversité. Suivant la possibilité ou non d'exfiltration par exemple, on peut résumer suivant 3 formes les dispositifs d'arbre de pluie :

- Des fosses ouvertes avec des sols structurels ou des cellules alvéolaires((CRWA, 2009),(Day & Dickinson, 2016), (SPW, 2020), (EPA, 2016), (LANDCOM, 2008),(EPA, 2017), GREENBLUE URBAN 2018);
- Des fosses à fond ouvert et confiné sur les parois latérales(CRWA, 2009),(Burack et al., 2008), (Stone et al., 2014),(Matlock & al, 2021),(Rector et al., 2013),(UACDC, 2010), (UNHSC, 2012),(BWSC, 2013), (M Stone et al. 2015) ;
- Des fosses entièrement confinées(CONTECH, 2022), (Peterson et al., s. d.), (UAS, 2018),(Lenhart et al., 2010), (Choi et al., 2013),(DNREC, 2019),(Hirsch, 2018),(Oldcastle, 2018) ;

Autres que ces 3 formes, l'arbre de pluie peut se présenter comme une modification d'un arbre d'alignement à travers des travaux mineurs comme la création d'une tranchée d'infiltration vers la fosse d'arbre(Metropole Grand Lyon, 2022).

En effet, la configuration de l'ouvrage dépend de la fonction de service visé. Pour des ouvrages axés sur le développement de l'arbre et de ses services écosystémiques par exemple, les fosses sont conçues avec des sols structurels ou de cellules alvéolaires afin d'augmenter le volume d'enracinement et favoriser l'aération dans le sol. C'est le cas aussi des ouvrages axés sur une restauration bilan hydrologique qui présentent des fosses ouvertes pour favoriser l'exfiltration dans le sous-sol et donc la recharge des nappes.

Afin que la technique puisse assurer ses fonctions, il est nécessaire que l'arbre soit sain et se développe dans les meilleures conditions. Pour ce fait il faut donc que les paramètres de

conception tiennent compte donc des volumes récupérables par l'ouvrage (dépendant de la pluviométrie et de la surface d'apport), des besoins en eau, éléments minéraux et volume de sol pour l'arbre et bien d'autres. Différents paramètres sont ainsi considérés dans le dimensionnement des dispositifs d'arbre de pluie.

1.5.2 Dimensionnement des dispositifs d'arbres de pluie

Suivant les différents guides, la méthode de dimensionnement de l'ouvrage peut dépendre des fonctions visées. Pour par exemple assurer le bien-être des arbres, on opte pour des volumes de substrat plus élevés. Le dimensionnement est tout de même basé le plus souvent sur le volume de stockage mais aussi sur des méthodes empiriques ou encore sur un objectif de performance lié aux flux de polluants ou aux flux hydriques. Suivant les guides différents paramètres peuvent être considérés pour le dimensionnement des ouvrages. Ces critères ont été détaillés dans le rapport sur la typologie des arbres de pluie.

1.6 Conclusion partielle

Ce chapitre traite de l'impact de l'urbanisme sur le cycle hydrologique en milieu urbain. La forte urbanisation a conduit à un changement de paradigme dans la gestion des eaux pluviales avec l'émergence d'infrastructures favorisant l'infiltration et le stockage. L'arbre de pluie est l'un de ces ouvrages qui permet de collecter le ruissellement des surfaces environnantes pour une gestion quantitative et ou qualitative tout en favorisant la croissance de l'arbre. La revue bibliographique a montré une diversité de dispositifs d'arbre de pluie à travers leur configuration ou leur mode de conception. Une analyse approfondie de cette revue va permettre de faire une classification et d'aboutir à une typologie des arbres de pluie.

2 Fonctionnement hydrologique du dispositif de SenseCity

Ce chapitre traite du fonctionnement hydrologique du dispositif expérimental de SenseCity qui a été conçu pour gérer le ruissellement d'une chaussée. Il est question ici d'étudier le dispositif expérimental de SenseCity en décrivant les différents processus hydrologiques face à un événement et par la suite à l'échelle annuelle. Il va donc falloir étudier l'impact de l'arbre de pluie ainsi que sa configuration sur la récupération des eaux pluviales.

2.1 Présentation du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental de SenseCity (Figure 3) est conçu pour la gestion du ruissellement de la voirie avec une mesure en continue des flux entrants et sortant. De nombreux capteurs sont utilisés pour mesurer les débits et les stocks d'eau dans les différents compartiments du système. Les volumes de ruissellement entrants sont mesurés par des débitmètres électromagnétiques de diamètre 25 mm et 50 mm (Optiflux Krohne), montés en parallèle afin de mesurer une large gamme de débits. Le débit du drain souterrain est mesuré par un auget basculant de 2x1 litre (Précis Mécanique) et la teneur en eau du sol est mesurée par des sondes TDR (Soilvue Campbell) placées au pied de l'arbre, à des profondeurs de 5, 10, 20, 30, 40 et 50 cm. Le flux de sève de chaque arbre est mesuré par un capteur à dissipation thermique (Implex Edaphic) à 1 m au-dessus du sol. La teneur en eau et le flux de sève sont enregistrés à des intervalles de temps de 15 minutes, tandis que les apports sont mesurés toutes les minutes. De plus, les paramètres météorologiques sont surveillés à 8 mètres de hauteur (Vaisala), tandis que les précipitations sont également enregistrées au milieu de la route à 1 m de hauteur.

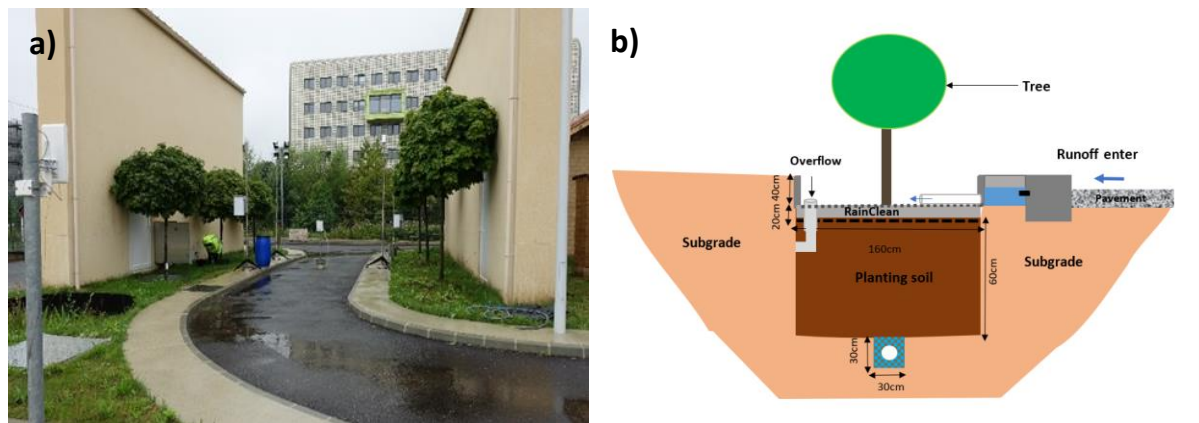


Figure 3: a) Vue nord-sud de la rue Canyon, avec les arbres pluviaux à gauche et les arbres de référence à droite ; b) Configuration des arbres pluviaux de SenseCity

2.2 Quantification des erreurs et incertitudes liées aux mesures

2.2.1 Comparaison entre les pluviomètres

Les premiers tests ont porté sur la vérification de la hauteur de pluie enregistrée par basculement du pluviomètre à 1m du sol. Ce pluviomètre a donc été équipé d'un réservoir afin de comparer les hauteurs de pluies au volume collecté dans le réservoir. Les différences entre les pluies enregistrées et celles collectées sont faibles. La relation entre la pluie collectée et celle enregistrée s'est traduite par une relation linéaire avec un coefficient proche de 1 ce qui montre que le pluviomètre enregistre assez bien les précipitations sur la chaussée.

Une comparaison a été faite entre les mesures des deux pluviomètres, à 1m et à 8m du sol.

Tableau 4: Caractéristiques des mesures

	Pluviomètre bas(mm)	Pluviomètre haut(mm)
Moyenne	3.89	4.85
Ecart-type	5.46	6.98
Ecart-type/Moyenne	1.4038	1.46

Ecart-type entre les mesures des 2 pluviomètres	1.9904
Pente	1.23
Intervalle de confiance	[1.22 ; 1.24]
Incertitude	0.01

La relation est présentée sur la Figure 4

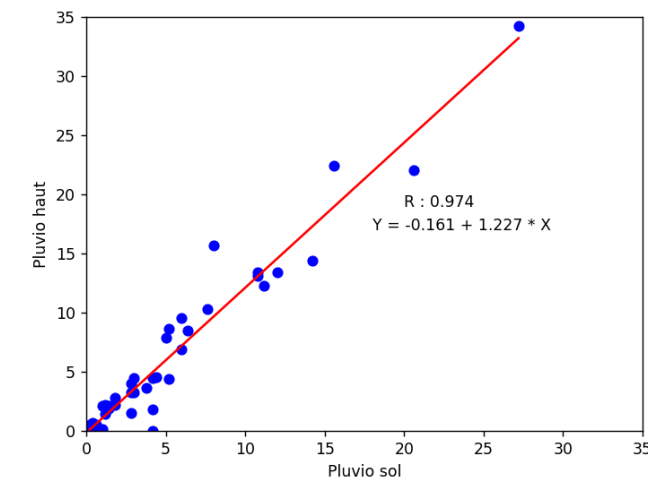


Figure 4: Relation entre les 2 pluviomètres.

La relation entre les 2 mesure traduit une relation linéaire avec une pente de 1.23. Bien que la comparaison des mesures entre les 2 pluviomètres présente des similarités, il y a tout de même une variation. On constate ainsi une sous-estimation d'environ 20% du pluviomètre au sol. L'écart- type entre les pluviomètres est évalué à 1.9904 avec une pente de 1.23.

Dans notre étude nous utiliserons les données du pluviomètre à 1m qui représente le mieux le positionnement des arbres entre les 2 murs et donc les précipitations reçues. La surestimation du pluviomètre à 8m s'explique en effet par le manque d'obstacle autour du pluviomètre ce qui n'est pas du pluviomètre au sol.

2.2.2 Erreur de mesure sur les débitmètres

Afin de vérifier le fonctionnement des débitmètres, des débits ont été injectés à l'aide d'une colonne d'eau fonctionnant suivant le principe de la vase de Mariotte. La vase de Mariotte est un dispositif qui permet d'obtenir un débit constant. Cette méthode consiste à injecter un débit en mesurant le temps d'écoulement entre deux hauteurs et en notant le débit enregistré par les débitmètres après remplissage de la colonne. Le débit injecté est par la suite calculé suivant les dimensions de la colonne et le temps d'écoulement entre deux hauteurs. Pour les débits les plus élevés ils ont été injectés à partir du robinet.

Nous avons comparé en un premier temps l'ensemble des débits injectés à ceux mesurés comme l'illustre le graphique suivant :

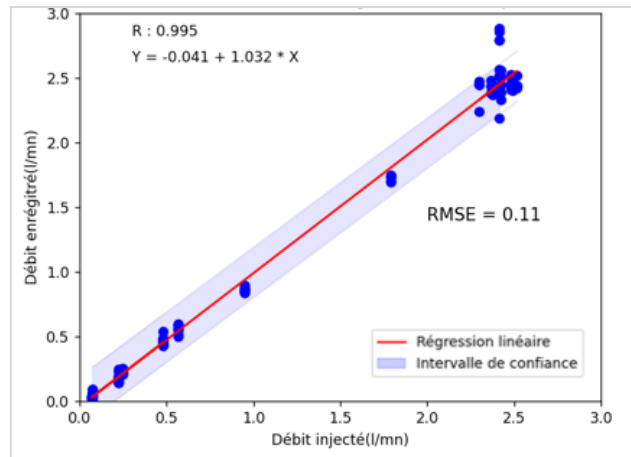


Figure 5: Représentation de l'intervalle de confiance dans la relation entre les débits injectés et mesurés

On constate que la relation entre les débits injectés et les débits mesurés semblent décrire une relation linéaire. On essaiera de déterminer sur cette relation l'intervalle de confiance (CI) en considérant la loi normale

$$CI = z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Avec σ l'écart-type, n l'effectif total, z (valeur critique de la distribution) le fractile d'ordre $1 - \alpha/2$ lié au coefficient α de la loi de Student. Le choix de α détermine le niveau de confiance souhaité. On considèrera ici un intervalle de confiance de 95% soit $\alpha = 5\%$ et suivant la table z correspond à 1,96.

On déterminera aussi l'Erreur quadratique moyenne (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{(\sum (y_{\text{measure}} - y_{\text{reference}})^2) / N}$$

Où N est le nombre total de points de données. La RMSE est sensible aux valeurs aberrantes car élève les erreurs au carré.

En considérant l'ensemble des données on constate bien la similitude des 2 données avec un écart type de 0.071. On constate en général un écart faible entre les débits injectés et ceux enregistrés par les débitmètres avec pour la plupart une sous-estimation du débit enregistré par le débitmètre.

La variation de la mesure est de ± 0.19 sur les débits enregistrés.

En comparant par exemple l'erreur absolue

($Ea = |y_{\text{measure}} - y_{\text{reference}}|$), sur chaque paire de données, on a une variation de 0.001 à 0.466. On a ici une valeur moyenne assez de proche de 0 (0.00213) ce qui indique une erreur faible de mesure globale.

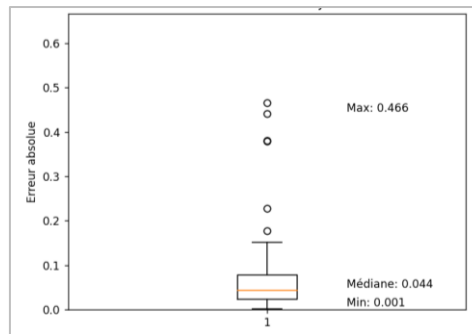


Figure 6: Variation de l'erreur absolue entre les mesures

On a pu constater une plus grande variation pour des débits injectés les plus faibles. En séparant les gammes de débits, débits faibles (inférieurs à 0.5l/mn) et les débits plus élevés (supérieurs à 0.5l/mn), les écarts sont plus importants.

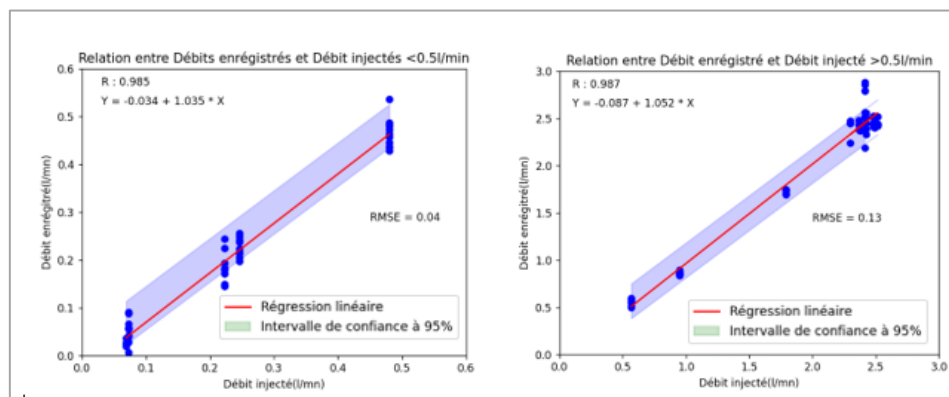


Figure 7: Relations entre les débits injectés et enregistrés

En comparant les intervalles de confiance, on constate qu'il est plus étroit pour les débits supérieurs à 0.5l/min, ce qui voudrait dire qu'on a une estimation assez précise de la pente qui est de 1.052 et donc la plage de valeurs possibles pour la pente est mince. L'intervalle de confiance représente en effet une plage de valeurs plausibles pour la pente de la relation linéaire.

2.2.3 Erreur de mesure des capteurs de sol Soilvue

Des profils de sol ont été prélevés aux pieds des 3 arbres à proximité des capteurs. Le Rainclean étant un substrat particulier, il a présenté de forte variation entre les mesures du Soilvue conçu pour une utilisation dans les sols. Il est constitué d'un mélange organique, de sable, d'argile, de pierre, de zéolithe et de charbon actif et présente une forte perméabilité (9×10^{-4} m/s) qui implique une grande capacité d'infiltration. Nous avons donc considéré les profondeurs occupées par le sol qui sont celles à 20, 30, 40 et 50cm, étant donné que le capteur est conçu pour des mesures dans le sol en place. Les caractéristiques des mesures sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5: Caractéristiques des teneurs en eau mesurées et calculées

	Teneur SoilVue	Teneur calculée
Moyenne	32.29	33.92
Ecart type	7.45235189	6.05097145
Ecart type/moy	0.23079264	0.178738

Les teneurs en eau déterminées dans les cylindres sont similaires sur chaque capteur pour chacune des profondeurs. Par contre il existe des différences entre la mesure SoilVue et celle au laboratoire essentiellement avec des variations de 10% sur la profondeur à 50cm. Selon les concepteurs, l'exactitude de la mesure de la teneur en eau est de $\pm 1,5\%$ pour la plupart des sols. ((Campbell Scientific, 2020)

Les relations entre les mesures Soilvue et celles déterminées au laboratoire sont présentées ci-dessous :

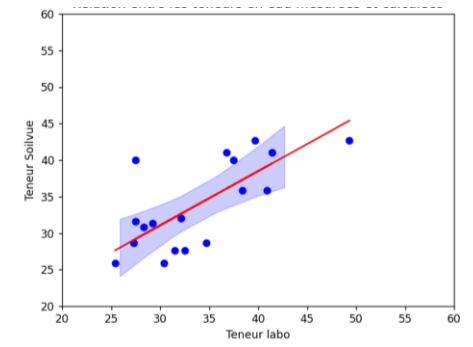


Figure 8: Relations entre les teneurs en eau

On remarque ici que la relation entre ces 2 mesures n'est pas très forte avec une pente de 0.67 et que les valeurs sont très dispersées autour de la droite de régression avec tout de même un coefficient de relation de 0.7. L'intervalle de confiance est large et que toutes les mesures n'appartiennent pas à cet intervalle de confiance. Il y a donc une incertitude quant à l'estimation précise des valeurs mesurées par le capteur à partir de celles déterminées au laboratoire.

2.3 Résultats préliminaires

2.3.1 Définition des évènements hydrologiques

Afin d'évaluer les performances de l'ouvrage, il est nécessaire de définir les évènements pluvieux pour analyser les impacts des précipitations sur le système. Le début d'un événement est défini comme le début des précipitations, tandis que la fin d'un événement survient lorsque le débit du drain devient négligeable lorsqu'il y a un drainage ou lorsque la hauteur de pluie devient inférieure à un seuil. Le début d'un événement est identifié lorsque l'intensité de la pluie dépasse un seuil fixe I_{seuil} . Si, à un pas de temps donné t , l'intensité passe en dessous du seuil, les précipitations et les débits sont analysés sur une période définie DT_{fin} . L'événement est considéré comme terminé si deux conditions sont satisfaites pendant cette période. La première condition est que les précipitations cumulées pendant le DT_{fin} soient inférieures à une hauteur cumulée fixe H_{fin} . La deuxième condition est que le volume cumulé drainé pendant le DT_{fin} soit inférieure à une fraction $Frac$ du volume cumulé drainé depuis le début de l'événement, ou que le débit maximum au pas de temps t pendant le DT_{fin} soit inférieur au débit au début de l'événement (Kanso, 2021).

Les paramètres d'identification I_{seuil} , DT_{fin} , H_{fin} , $Frac$ ont été fixés respectivement à 0.4 mm/h, 60 minutes, 0.2 mm et 0.5 %. Le basculement du pluviomètre correspond à 0.2 mm, et les événements sont définis comme commençant avec le premier basculement. La période DT_{fin} de 60 minutes représente le temps moyen nécessaire pour que l'écoulement commence

dans le drain après le début des précipitations. Une analyse de sensibilité a été conduite pour déterminer les ensembles optimaux de paramètres en se fondant sur divers critères

- La proportion de précipitation cumulée des événements hydrologiques par rapport au cumul de précipitation sur la période totale (proche de 100%) ;
- La proportion des débits cumulés attribuée aux événements hydrologiques par rapport au cumul des débits sur l'ensemble de la période de suivi (proche de 100%).

2.3.2 *Caractérisation des événements hydrologiques*

Les événements hydrologiques ont été caractérisés sur une période d'un an, d'avril 2022 à mars 2023. Au cours de cette période, un total de 520 mm de précipitations a été enregistré. Un événement hydrologique a été défini comme débutant avec le premier basculement du pluviomètre et se terminant soit à la fin de l'écoulement des eaux de ruissellement (pour les événements qui n'ont généré aucun débordement du drain), soit à la fin de l'écoulement du drain souterrain. Seuls les événements avec une hauteur de pluie supérieure ou égale à 1 mm ont été pris en compte. Au cours de cette période, un total de 112 événements ont été enregistrés, dont 69 étaient supérieurs à 1 mm. Il y avait une variabilité en termes d'intensité, de hauteur et de durée des précipitations entre les différents événements. La plupart des événements étaient associés à des hauteurs de pluie relativement faibles (médiane de 4,3 mm), représentatives des événements pluvieux courants dans la région parisienne, avec une période sèche médiane entre deux événements de 2,6 jours. L'événement le plus important a eu lieu le 8 mars, avec une hauteur de 34 mm et une durée d'environ 15 heures. La période la plus sèche a été enregistrée en février 2023, avec une durée de plus de 50 jours.

	Nombre événements hydrologiques	Nombre événements hydrologiques ≥ 1 mm	Nombre événements hydrologiques avec volume drainé	Hauteur totale d'événements hydrologiques (mm)
Total	112	69	29	501

	Médiane	Minimum	Maximum
Hauteur d'événements hydrologiques (mm)	4.3	1	33.8
Intensité maximum d'événements hydrologiques (mm/h)	12.2	0.6	120
Durée d'événements hydrologiques (h)	3.48	0.3	171
Période sèche (j)	2.6	0.1	50.7

L'intensité maximale des événements pluvieux au-dessus de 0,1 mm de précipitations variait d'un minimum de 0,6 mm/h à un maximum de 120 mm/h par paliers d'une minute. La durée moyenne des événements était de 2 heures. La Figure 2 montre les fréquences de certains paramètres d'événements hydrologiques avec et sans écoulement. Les événements hydrologiques peuvent durer jusqu'à 171 heures, la majorité d'entre eux durant moins de 3 heures.

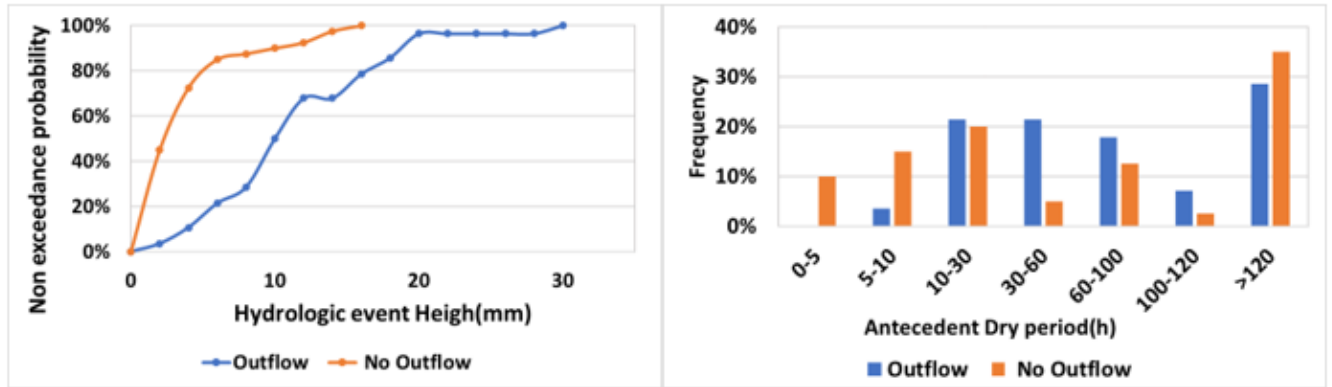


Figure 9: Fréquence de distribution des événements et des périodes sèches

Les événements avec moins de 5 mm représentent plus de 50 % des observations. La majorité (80 %) des événements sans écoulement étaient des pluies ordinaires de moins de 6 mm de hauteur, avec une intensité maximale entre 5 et 25 mm/h. L'intensité maximale (120 mm/h) a été enregistrée en mars 2023 pour un épisode de pluie de 17,6 mm durant 2 heures. La hauteur maximale de pluie était de 12 mm pour les événements sans écoulement et de 34 mm pour les événements avec écoulement. Aucun événement avec une hauteur de plus de 14 mm n'a provoqué d'écoulement. Les hauteurs de pluie pour les événements avec écoulement sont généralement plus élevées que pour les événements sans écoulement, mais les valeurs moyennes d'intensité et les durées sont dans la même fourchette. Cependant, la durée des périodes sèches est plus longue pour les événements sans écoulement, environ le double des événements avec écoulement en considérant les valeurs maximales. Les longues périodes sèches antécédentes entraînent une réduction de la teneur en eau du sol, augmentant ainsi la rétention des nouveaux volumes de pluie dans le sol de la fosse. La majorité des événements avec écoulement ont eu lieu en hiver, avec environ 65 % d'entre eux entre novembre et mars. Cela peut s'expliquer par des pluies fréquentes saturant le sous-sol et l'incapacité d'éliminer les volumes par transpiration en raison de l'absence de feuilles pendant cette période, ainsi que par une exfiltration limitée dans le sous-sol en raison des conditions de saturation. Par conséquent, la majorité des événements sans écoulement se produit en été.

2.3.3 Indicateurs de performance

Pour évaluer les performances hydrologiques et hydrauliques de la fosse à arbres pour les eaux pluviales, nous utilisons des indicateurs issus du « Guide méthodologique pour l'évaluation des performances des structures de contrôle des eaux pluviales à la source » (Flanagan et al., 2019), tels que le taux de réduction du volume basé sur les événements (correspondant au ratio entre le volume sortant des drains et le volume entrant) et le temps de réaction (temps entre le début de l'écoulement entrant et le début de l'écoulement sortant).

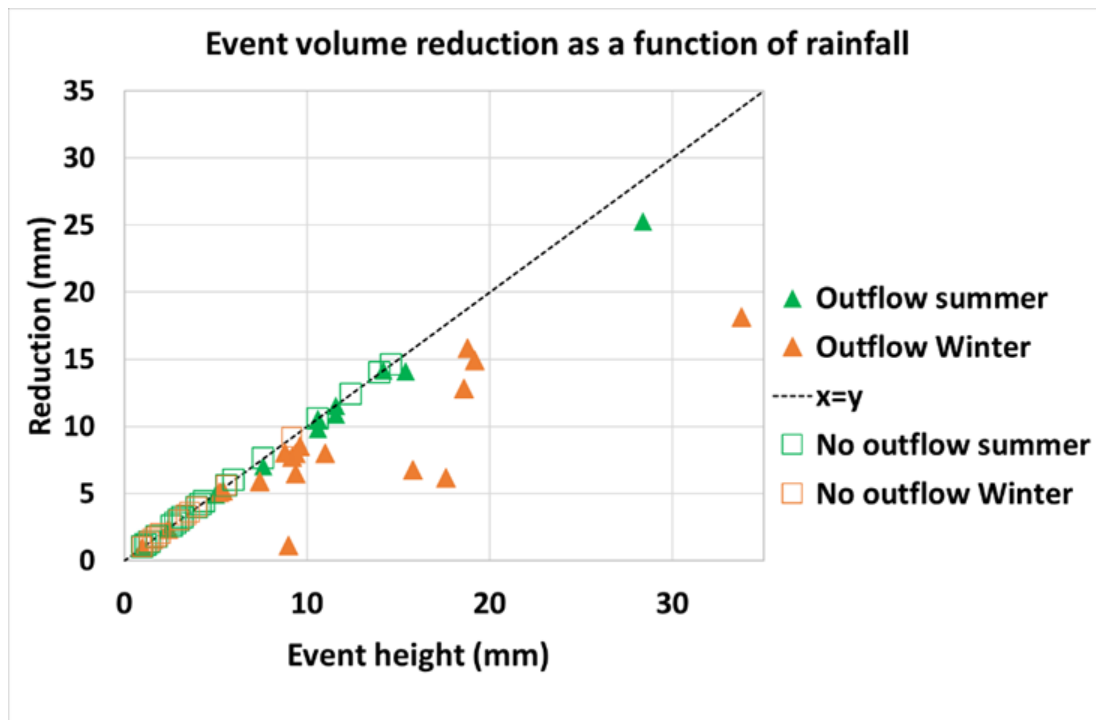


Figure 10: Hauteur d'abattement en fonction de la hauteur de pluie

La Figure 10 montre les réductions de volume en fonction des hauteurs de pluie et indique que, pour l'ensemble des événements, la réduction n'a pas dépassé 25 mm pour les événements avec écoulement. Les événements sans drainage se trouvent sur la ligne $x=y$. On peut constater que, pour des précipitations inférieures à 10 mm, les valeurs de réduction de volume sont proches de la ligne $y=x$. La majorité des événements (65 %) avec un volume drainé surviennent pendant l'hiver.

La réduction du volume à l'échelle de l'événement variait de 12 % à 100 % avec une moyenne de 92 %, ce qui illustre la grande capacité de la technique à réduire le volume. Ces taux sont obtenus pour un ratio de surface de 6,4 % (zone d'infiltration sur la zone de drainage). À l'échelle de toute la période d'étude, la réduction du volume par rapport au total entrant est attribuée à 53 % à l'exfiltration, à 27 % à la transpiration des arbres et au drainage de 18 %. La variation du stock est presque nulle sur la période (ZIME YERIMA et al., 2023). Pour comparaison, les résultats de (Gray et al., 2018) ont montré une réduction de 90 % du ruissellement annuel provenant des arbres de pluie sur des surfaces d'entrée allant de 100 à 480 m² pour des ratios d'infiltration/surface de drainage allant de 2,5 à 8 %. Le temps de réaction, qui représente la durée entre le début de l'écoulement dans le drain et le début du ruissellement, variait entre 1 minute et 8 heures. Ce paramètre reflète la capacité de notre structure à retarder l'écoulement, qui a été en moyenne d'une heure. Les temps de réaction courts sont causés par des événements pluvieux antérieurs. Par exemple, le temps de réaction le plus court d'une minute a été observé après un événement de 22 mm, deux heures auparavant. Ces indicateurs peuvent être influencés par la nature du sol de plantation ou l'humidité du sol précédent.

2.4 Conclusion partielle

L'objectif de ce chapitre est de comprendre le fonctionnement du dispositif de SenseCity à travers la description des processus hydrologiques en se basant sur les flux mesurés (écoulement, stockage, drainage, transpiration...). Les travaux menés ont porté sur la quantification des erreurs de mesures, en ce qui concerne le pluviomètre au sol, de nouvelles mesures seront faites afin de comparer les précipitations réelles dans le réservoir à celles enregistrées. Ce sera aussi le cas du capteur de flux de sève où n'avions pas des mesures de références pour les comparer à celles du capteur Implexx Sapflow.

En ce qui concerne le traitement des données les futurs résultats vont porter sur l'analyse des événements pluvieux ainsi que le bilan hydrologique qui sera traité sur les futures années. Les premiers résultats ont montré des taux d'abattement du volume ruisselé pouvant atteindre les 90%. On abordera aussi les relations sol/arbre, notamment la variation de la teneur en eau/réserve utile et la transpiration de l'arbre. La suite de ce chapitre va consister à modéliser les arbres de pluie de SenseCity avec l'outil OpenHydroQual (GIFMod) afin de représenter correctement les données hydrologiques hydrologique collectées en vue d'un outil d'aide à la conception d'un arbre de pluie.

3 Optimisation des fonctions de l'arbre de pluie à travers un démonstrateur (Dispositif de Bagnolet)

Il est important que les arbres de pluie puissent résister aux extrêmes hydrologiques (sécheresse ou ennoyage) qui peuvent se présenter dans le contexte de changement climatique. Deux expérimentations vont essayer de répondre à ces besoins, le dispositif de Bagnolet pour palier à la sécheresse et le dispositif d'écophysiologie pour étudier l'ennoyage. Le dispositif de Bagnolet a été conçu dans le but d'optimiser les fonctions de stockage et d'assurer une meilleure résilience des arbres face aux périodes de sécheresse.

3.1 Présentation du dispositif expérimental de Bagnolet

Le dispositif expérimental de Bagnolet a été conçu pour la gestion du ruissellement mais aussi pour améliorer la résilience des arbres surtout en période estivale. Il est mis en place à Bagnolet sur la Rue Robespierre. La configuration de ce dispositif est différente de celle de SenseCity de par la présence d'une couche de stockage de 50cm en profondeur sur un fond imperméable. Les eaux de ruissellement de la chaussée et du trottoir sont dirigées vers le tube collecteur pour alimenter la couche de stockage.

Les travaux de mise en place ont été suivi régulièrement sur le chantier des travaux de terrassement (débuté le 21/11/2022) à la plantation des arbres (20/02/2023). L'expérimentation porte sur 6 arbres, 3 arbres de pluie (AP1, AP2 et AP3) et 3 arbres témoins (AT1, AT2 et AT3) dont les profils sont représentés sur la *Figure 11*. Les arbres de pluie ont été équipés de colonnes de capillarités afin de faire remonter la réserve d'eau de la couche de stockage vers le sol de plantation.

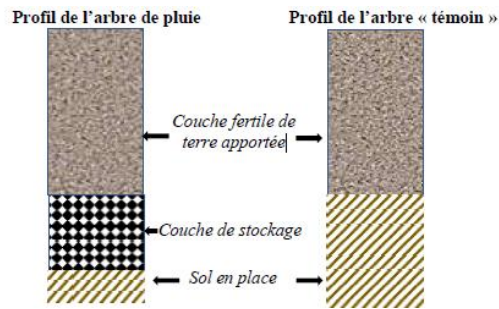


Figure 11: Profil des arbres

Suite à la plantation, différents dispositifs de mesure sont mis en place pour permettre de suivre la croissance des arbres (micro dendromètres), la disponibilité en eau dans le sol (tensiomètre) et le contrôle du niveau de remplissage de la couche de stockage (capteur de niveau d'eau) suivant le schéma suivant :

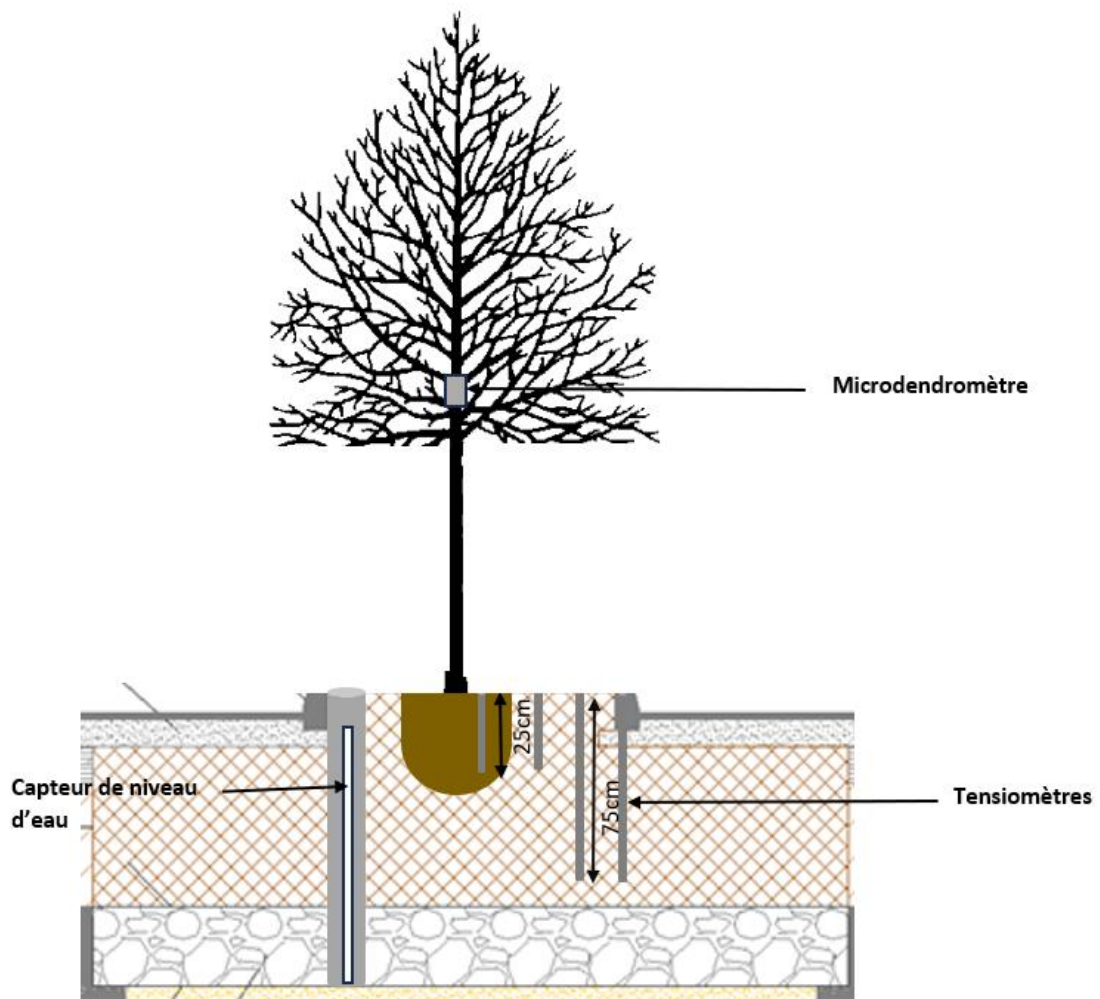


Figure 12: Schéma d'instrumentation des arbres



Figure 13: Arbres de pluie Rue Robespierre à Bagnolet

3.2 Résultats préliminaires

3.2.1 Evolution microdendrometrique des diamètres d'arbre

La variation du diamètre des arbres a été mesurée en continue à 2m environ sur le tronc de chacun des arbres. Les différentes variations sont présentées sur la Figure 14 :

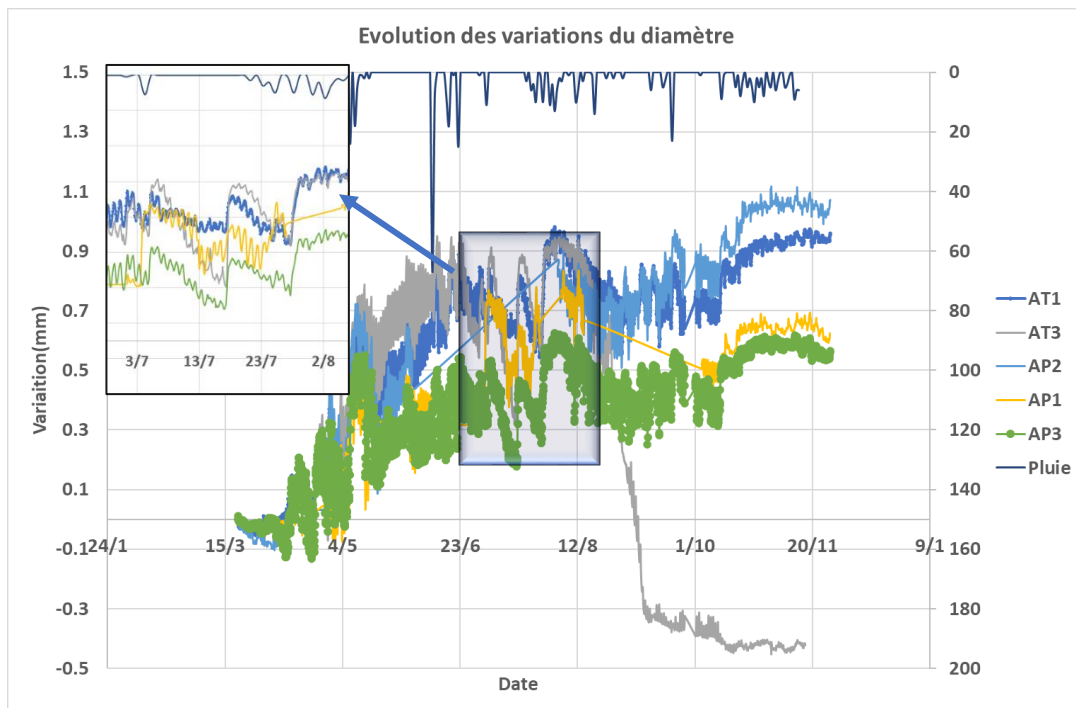


Figure 14: Evolution des diamètres

On peut constater une variation similaire des fluctuations sur les différents arbres jusqu'à la date du 06/08/2023 où on constate décroissance de l'arbre AT3. Ceci est en adéquation avec l'assèchement de ses feuilles qu'on a pu observer lors des visites sur site. Le AP2 semble montrer une meilleure croissance par rapport à tous les arbres. Sur ces évolutions, on peut de courte période de décroissance qui peuvent s'expliquer par des pluies ou des arrosages.

A partir de ces variations on peut déterminer des indicateurs tels que l'AMC (Amplitude maximale de Contraction) qui correspond à la différence entre la variation maximale et la variation minimale d'une journée ainsi que la CJ (Croissance Journalière) qui correspond à la différence entre la variation maximale du jour n par rapport au jour n-1. La Figure 15 représente les variations de l'AMC des arbres.

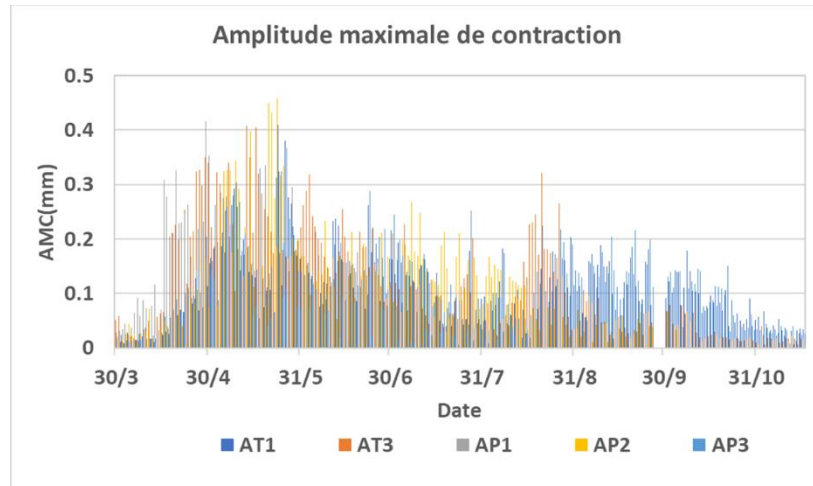


Figure 15: Variation de l'AMC

On constate des variations similaires entre les arbres de pluies et les témoins avec une dominance sur les arbres de pluie notamment le AP3 qui se démarque assez clairement des autres à partir du 17/08. Les arbres de pluies montrent généralement des AMC supérieurs aux témoins.

3.2.2 Evolution du potentiel hydrique dans le sol

Le potentiel hydrique dans le sol est mesuré à différentes profondeurs et positions (Figure 12). L'évolution est représentée comme suit :

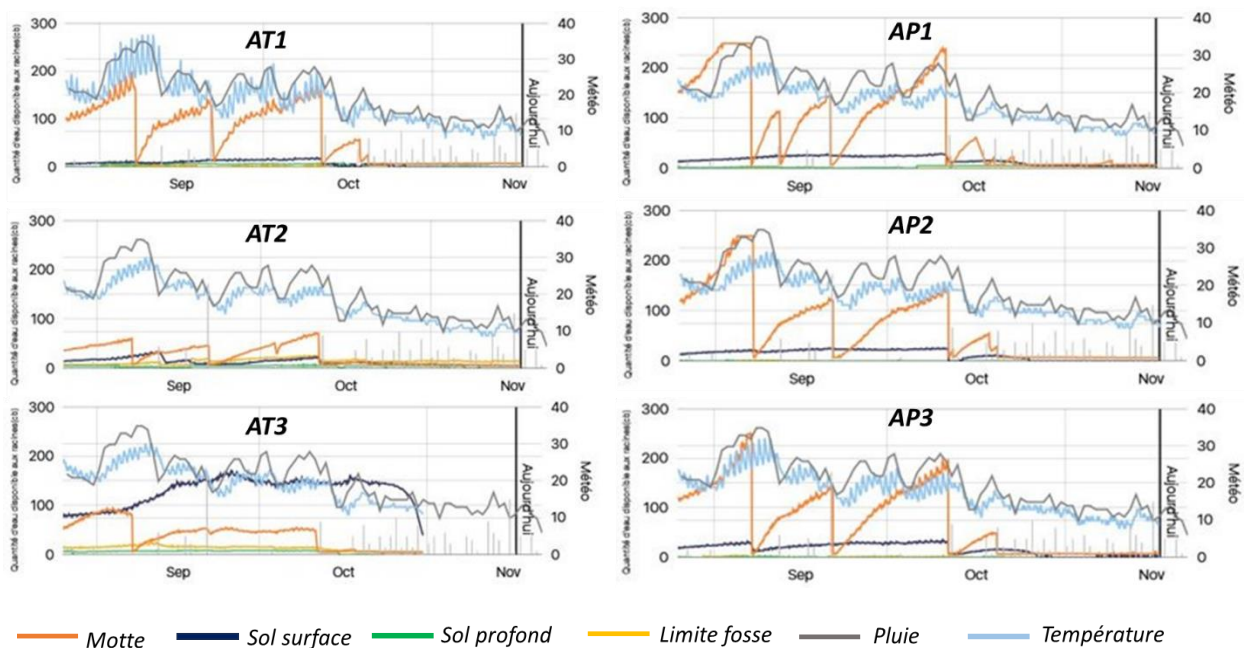


Figure 16: Variation du potentiel hydrique du sol

On peut constater sur les 6 arbres que la tension est plus faible à 25cm dans la motte, ce qui pourrait s'expliquer par la forme compactée de la motte. Des chutes dues aux arrosages ou à la pluie sont observées sur ces courbes. Le sol est plus humide en profondeur comme le témoignent les 2 sondes à 75cm où la tension ne dépasse pas les 10 cbars (Sol profond) et 30 cbars pour la Limite fosse. Plus les tensions sont élevées plus le sol est sec.

3.2.3 Variation du niveau d'eau dans le réservoir

La variation du niveau d'eau est mesurée avec les capteurs E-Tape

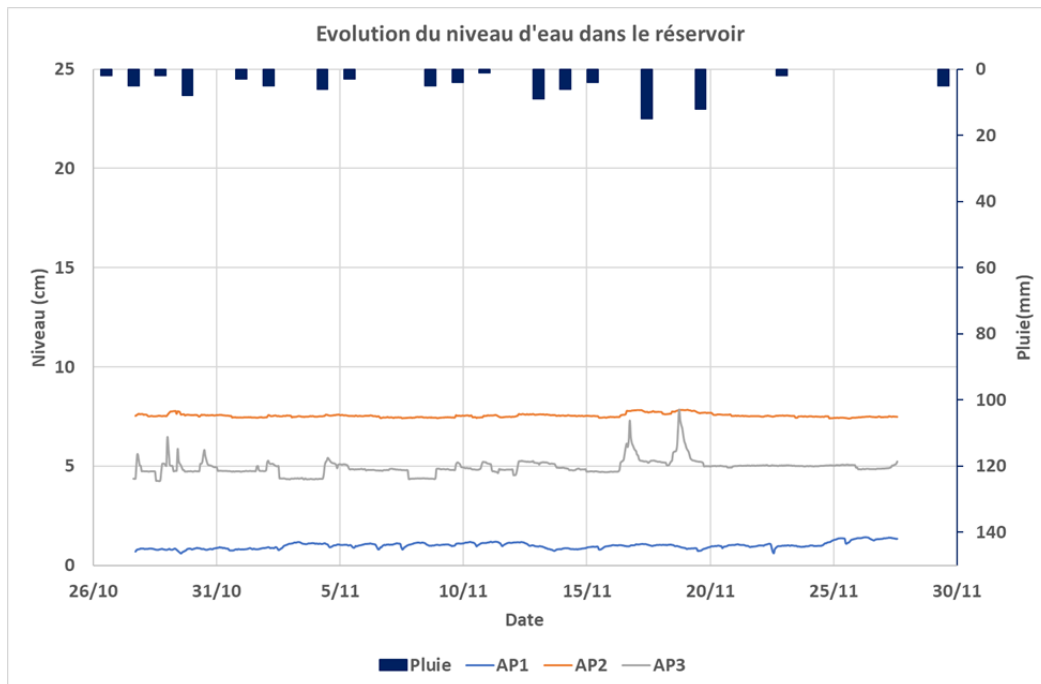


Figure 17: Variation du niveau d'eau dans le réservoir

On constate des variations de niveau d'eau constantes sur les 3 arbres avec un niveau plus élevé sur le AP2 (1cm) suivi du AP3(5cm) et enfin du AP1(7.5cm). Les pics de niveau sont marqués par les pluies et le niveau redescend aussitôt.

La profondeur du réservoir étant estimée à 35cm, avec les différentes variations on constate que les réservoirs ne se remplissent pas (35cm). Cela pourrait s'expliquer par des fissures au niveau de la bâche étanche ou encore à un colmatage au fond du réservoir (particules fines transportées ou celle du béton recyclé constituant le réservoir).

3.3 Conclusion partielle

La présente expérimentation s'inscrit dans le cadre d'une gestion plus durable des eaux pluviales en ville avec deux objectifs principaux. D'une part, réduire la charge du réseau pluvial en déconnectant le ruissellement vers les fosses d'arbre et d'autre part, alimenter l'arbre notamment en période estivale afin que les différents services associés soient assurés.

Conclusion

Le présent rapport a porté essentiellement sur le fonctionnement des dispositifs d'arbre de pluie de 2 dispositifs celui de SenseCity et celui de Bagnolet. Les principaux résultats portent sur la performance du dispositif de Sense-City en termes d'abattement de ruissellement par exfiltration et par transpiration. En ce qui concerne celui de Bagnolet où les variables mesurées ne sont pas les mêmes, nous avons observé de faibles différences en termes de croissance radiale des troncs des arbres de pluie 'légèrement plus élevés) par rapport aux témoins. La suite des travaux sur les prochains mois va porter sur le deuxième objectif de thèse qui traite de la physiologie des arbres en condition d'ennoyage.

Bibliographie

- APPA, M., & ATMO. (2015). *CLIMAT URBAIN SAIN ET DURABLE ÉNERGIE*. 6.
- APUR. (2010). *Essai de bilan sur le développement des arbres d'alignement dans Paris*. 83.
- Arnberger, A., & Eder, R. (2012). The influence of green space on community attachment of urban and suburban residents. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2011.11.003>
- Berland, A., Shiflett, S. A., Shuster, W. D., Garmestani, A. S., Goddard, H. C., Herrmann, D. L., & Hopton, M. E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 162, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.017>
- Boisson, J.-C. (1998). *Impacts des eaux de ruissellement de chaussées sur les milieux aquatiques État des connaissances*. 9.
- Bourgeois, M. (2016). *Impacts écologiques des formes d'urbanisation : Modélisations urbaines et paysagères*. 380.
- Bressy, A. (2010). *Flux de micropolluants dans les eaux de ruissellement urbaines : Effets de différents modes de gestion à l'amont*. 333.
- Burack, T., Walls, M., & Stewart, H. (2008). *Post-Construction Best Management Practices : Selection and Design* (New Hampshire Stormwater Manual 2; New Hampshire Stormwater Manual, p. 220). <https://www.des.nh.gov/sites/g/files/ehbemt341/files/documents/2020-01/vol2-cl-toc.pdf>
- BWSC. (2013). *Stormwater Best Management Practices : Guidance Document*. Boston Water and Sewer Commission.
- Campbell Scientific. (2020). *SoilVUE10—Capteur de profil d'humidité du sol TDR*. <https://www.campbellsci.fr/soilvue10>
- Carrier, S. B., Poulard, C., & Breil, P. (2013). *Cartographie de l'aléa ruissellement. Inventaire des éléments de validation* (p. 127) [Report]. irstea. <https://hal.inrae.fr/hal-02599053>
- CAUE44. (2009). *PLANTATION DE L'ARBRE. Fiche arbres n° 5*. <http://www.caue44.com/IMG/pdf/fiche5-plantation.pdf>
- CD92. (2018). *Arbre, guide technique*. Conseil départemental des Hauts-de-Seine. http://applis.hauts-de-seine.net/v3fichiers/07_guide_arbre_annexes.pdf
- CEREMA. (2019). *Services écosystémiques rendus par les arbres, modulés selon l'essence* (p. 163).
- Chargueraud, A. (1849-1898) A. du texte. (1896). *Traité des plantations d'alignement et d'ornement dans les villes et sur les routes départementales : Installations, culture, taille, élagage, entretien, remplacement, rendement, dépenses, législation / par A. Chargueraud,...* <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k56063841>
- Cherqui, F., Baati, S., Bentarzi, Y., Chocat, B., Le, P., Granger, D., Loubière, B., Nafi, A., Patouillard, C., & Tourne, A. (2013). *Quels enjeux pour la gestion des eaux urbaines ? Contribution à la formulation des services à rendre par le système de gestion des eaux urbaines*. 10.
- Choay, F., & Merlin, P. (2010). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*. Presses universitaires de France.
- Chocat, B. (1989). Urbanisation et Inondation, phénomènes de ruissellement, causes naturelles et facteurs d'aggravation. *Aménagement et nature*.
- Chocat, B. (1997). *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. Tech. & Doc.
- Chocat, B. (2008). *Etat de l'art sur la gestion urbaine des eaux pluviales et leur valorisation*. 36.
- Choi, J., Son, Y., Lee, S., Lee, Y., & Kim, L. H. (2013). Development of tree box filter LID system for treating road runoff. *Journal of wetlands research*, 15(3), 407-412.
- CONTECH. (2022). *Filtterra—Stormwater Biofiltration*. <https://www.conteches.com/stormwater-management/biofiltration-solutions/filtterra>
- Coutts, A. M., White, E. C., Tapper, N. J., Beringer, J., & Livesley, S. J. (2016). Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and applied climatology*, 124(1), 55-68.
- CRWA. (2009). *Stormwater, Trees, and the Urban Environment*. https://www.crwa.org/uploads/1/2/6/7/126781580/crwa_stormwater_trees_urban_environment.pdf
- Cuny, M.-A., Verrougstraete, L., Thibaudon, M., Bonhême, L., Besancenot, J.-P., & Cuny, D. (2015). Les effets de la végétation urbaine sur le climat, la pollution atmosphérique et la santé. *Environnement, Risques & Santé*, 14(6), 482-489.
- Damon, J. (2011). L'urbanisation mondiale en perspective positive. *Etudes*, Tome 414(6), 739-749.
- Day, S., & Dickinson, S. (2016). *La gestion urbaine durable des eaux pluviales grâce aux arbres et aux sols structuraux*.
- DDTM. (2014). *Guide méthodologique pour la gestion des eaux pluviales dans les projets d'aménagement* (p. 112).
- De Saint-Lambert, V. (2013). *GUIDE MUNICIPAL DU CHOIX D'ARBRES À PLANTER*.

- de Dianous, F. (2019). *La gestion intégrée des eaux pluviales : Peut-on la confier aux seulls urbanistes ?* (p. 66). <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02389275/document>
- Delfanne, F., Freytet, F., Gagnaire, E., & Koch, S. (2017). *L'arbre en ville*. <https://www.adu-lille-metropole.org/wp-content/uploads/2021/05/cahier6arbreville.pdf>
- Derinck, J.-P. (1992). Paysage routier, arbres d'alignement. *Géographes associés*, 10(1), 95-95.
- Desbordes, M. (1987). *Contribution à l'analyse et à la modélisation des mécanismes hydrologiques en milieu urbain*. ANRT.
- Dillen, S. M. E. van, Vries, S. de, Groenewegen, P. P., & Spreeuwenberg, P. (2012). Greenspace in urban neighbourhoods and residents' health : Adding quality to quantity. *J Epidemiol Community Health*, 66(6), e8-e8. <https://doi.org/10.1136/jech.2009.104695>
- DNREC. (2019). *Delaware Post Construction Stormwater BMP Standards & Specifications*. DELAWARE. <https://documents.dnrec.delaware.gov/Watershed/Sediment-Stormwater/Regulatory-Guidance/BMP%20Std%20and%20Spec%20-%20EFF%20FEB%202019.pdf>
- EHESP, a'urba, FNAU, DGS, & ADEME. (2020). *Espaces verts- ISAdOrA* (12; p. 33).
- Elliott, R. M., Adkins, E. R., Culligan, P. J., & Palmer, M. I. (2018a). Stormwater infiltration capacity of street tree pits : Quantifying the influence of different design and management strategies in New York City. *Ecological Engineering*, 111, 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.003>
- Elliott, R. M., Adkins, E. R., Culligan, P. J., & Palmer, M. I. (2018b). Stormwater infiltration capacity of street tree pits : Quantifying the influence of different design and management strategies in New York City. *Ecological Engineering*, 111, 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.003>
- EPA. (2016). *Stormwater Trees : Technical Memorandum*. 21.
- EPA. (2017). *Large Volume Storms and Low Impact Development*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-10/documents/lid_fs10_rainfall_epa_508.pdf
- Flanagan, K., Ah-Leung, S., Bacot, L., Bak, A., Barraud, S., Branchu, P., Castebrunet, H., Cossais, N., Gouvello, B., Deroubaix, J.-F., Garnier, R., Gromaire, M.-C., Honegger, A., Neveu, P., Paupardin, J., Peyneau, P.-E., Ramier, D., Rodriguez, F., Ruban, V., & Varnède, L. (2019). *Un guide méthodologique pour l'évaluation des performances des ouvrages de maîtrise à la source des eaux pluviales*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16209.68969>
- Flanagan, K., Branchu, P., & Gromaire, M.-C. (2017). Les ouvrages de biorétention : Synthèse des guides internationaux de conception et de maintenance des filtres plantés pour le traitement à la source des eaux de ruissellement urbaines. *Techniques Sciences Méthodes*, 12, 89-126. <https://doi.org/10.1051/tsm/201712089>
- Flores, P. E. D., Maniquiz-Redillas, M. C., Tobio, J. A. S., & Kim, L.-H. (2015). Evaluation on the hydrologic effects after applying an infiltration trench and a tree box filter as low impact development (LID) techniques. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(1), 12-18.
- García de Jalón, S., Chiabai, A., Quiroga, S., Suárez, C., Ščasný, M., Máca, V., Zvěřinová, I., Marques, S., Craveiro, D., & Taylor, T. (2018). The influence of urban greenspaces on people's physical activity : A population-based study in Spain. *Landscape and Urban Planning*, 215, 104229. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104229>
- Gascon, M., Triguero-Mas, M., Martínez, D., Dadvand, P., Forn, J., Plasència, A., & Nieuwenhuijsen, M. J. (2015). Mental health benefits of long-term exposure to residential green and blue spaces : A systematic review. *International journal of environmental research and public health*, 12(4), 4354-4379.
- Geddes, N., & Dunkerley, D. (1999). The influence of organic litter on the erosive effects of raindrops and of gravity drops released from desert shrubs. *Catena*, 36(4), 303-313.
- Gibelin, A.-L., Dubuisson, B., Corre, L., Deaux, N., Jourdain, S., Laval, L., Piquemal, J.-M., Mestre, O., Denetière, D., & Desmidt, S. (2014). Evolution de la température en France depuis les années 1950 : Constitution d'un nouveau jeu de séries homogénéisées de référence. *La Météorologie*.
- Giordano, A. (1994). L'érosion et la lutte contre l'érosion en forêt méditerranéenne. *Forêt méditerranéenne*.
- Gourrierc, S. L. (2012a). *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]. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00739439/document>
- Gourrierc, S. L. (2012b). *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]. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00739439/document>
- Grant, R. H., Heisler, G. M., & Gao, W. (2002). Estimation of Pedestrian Level UV Exposure Under Trees¶. *Photochemistry and Photobiology*, 75(4), 369-376.
- Gray, V., Livesley, S. J., Fletcher, T. D., & Szota, C. (2018). Tree pits to help mitigate runoff in dense urban areas. *Journal of Hydrology*, 565, 400-410. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.038>
- Gromaire, M.-C. (2000). La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire- Caractéristiques et origines. *La Houille Blanche*, 2, 66-70.

- Gromaire, M.-C. (2020). *Gestion durable des eaux de ruissellement et Techniques Alternatives*.
- Gromaire, M.-C., Veiga, L., Grimaldi, M., & Aires, N. (2013). *Outils de bonne gestion des eaux de ruissellement en zones urbaines ; Agence de l'eau Seine-Normandie*. 63.
- Haddad & Et al. (2007). *Plantation et entretien de jeunes arbres*.
- Haddad, Y. (1997). *Les arbres d'alignement urbains. Un enjeu pour des partenaires multiples*. <https://doi.org/10.3406/aru.1997.3126>
- Hirsch, C. (2018). *Milton Continues to Invest in Stormwater Improvements*. Neponset River Watershed Association. <https://www.neponset.org/happenings/milton-continues-to-invest-in-stormwater-improvements/>
- IBGE. (2014). *Outil de gestion de l'eau de pluie à l'échelle du quartier—Recommandation pratique, les arbres de pluie—GEQ08* (GEQ08; Evaluation des techniques alternatives pour une gestion des eaux pluviales sur l'espace collectif, Numéro GEQ08). http://www.environnement.brussels/sites/default/files/user_files/geq08_arbrespluie.pdf
- Jaillet, C., Poulard, C., & Breil, P. (2012). *Méthode de cartographie du ruissellement (au sens D.I.). Synthèse des méthodes de cartographie des inondations par ruissellement en France*.
- Johnston, J., & Newton, J. (2004). A guide to using plants on roofs, walls and pavements. *Mayor of London. Greater London Authority*.
- Juillerat, L., & Vögeli, M. (2004). *Gestion des vieux arbres et maintien des Coléoptères saproxyliques en zone urbaine et périurbaine*. CSCF.
- Kanso, T. (2021). *Mesure et modélisation du bilan hydrologique de dispositifs rustiques de gestion à la source des eaux de ruissellement de chaussées* [These de doctorat, Paris Est]. <http://www.theses.fr/2021PESC1100>
- Lagadec, L.-R. (2018). *Evaluation et développement de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement. Application au contexte ferroviaire*. 351.
- Laille, P., Provendier, D., & Colson, F. (2014). *les bienfaits du végétal en ville—Plante & Cité*. https://www.plante-et-cite.fr/ressource/fiche/95/beneveg_les_bienfaits_du_vegetal_en_ville_rapport_et_publication
- LANDCOM. (2008). *Street tree design guidelines*.
- Langlois, M., Bonneville, K., & Blais, P. (2004). Guide de bonnes pratiques—La réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'aménagement du territoire. *aménagement du territoire*, 71.
- Larcher, J.-L., & Gelgon, T. (2000). *Aménagement des espaces verts urbains et du paysage rural*.
- Le Quentrec, M., Ravard, J.-L., & Verdeaux, P. (2009). *Le ruissellement urbain et les inondations soudaines* (p. 73).
- Lefebvre, G. (1897). *Plantations d'alignement : Promenades, parcs et jardins publics*. P. Vicq-Dunod.
- Lenhart, J. H., deRidder, S. A., & Allen, V. (2010). The Urban Green BioFilter: An Innovative Tree Box Application. In *Low Impact Development 2010 : Redefining Water in the City* (p. 218-233).
- Lopez, M. (2014). *Comment mettre en œuvre une politique de l'arbre dans une commune périurbaine?* Ville de Roncq, Mairie de Roncq, 18 rue du docteur Galissot, 59223 Roncq.
- Maigne, J. (2006). *LA GESTION DURABLE DES TECHNIQUES ALTERNATIVES EN ASSAINISSEMENT PLUVIAL*. 14.
- Matlock, D., & al. (2021). *Stormwater Technical Guidance 3rd Revision*. https://www.cleanwaterprogram.org/images/uploads/C.3_Technical_Guidance_Version_7.1_20210208.pdf
- Metropole Grand Lyon. (2022). *Livret technique Les arbres de pluie*. Metropole Grand Lyon.
- Moriconi-Ebrard, F. (1993). *L'urbanisation du monde depuis 1950*. FeniXX.
- Moussion, M. (2020). *Réflexions sur l'augmentation de la démographie mondiale et ses conséquences*. https://www.nantes-citoyennete.com/wp-content/uploads/2020/06/200622_Contrib_Moussion.pdf
- Musy, M., Bozonnet, E., Briottet, X., Gutleben, C., Lagouarde, J.-P., Launeau, P., Lemonsu, A., Maro, D., Rodriguez, F., & Sabre, M. (2014). *Rapport final Projet ANR-09-VILL-0007 VegDUD Programme Villes Durables 2009*.IRSTV FR CNRS 2488.
- Nicolas, M. (2010). *Étude expérimentale et numérique du ruissellement de surface : Effets des variations d'intensité de la pluie. Application à une parcelle de vigne en Cévennes-Vivarais*. [Phdthesis, Université Joseph-Fourier - Grenoble I]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00480779>
- Nowak, D. J. (1993). Atmospheric carbon reduction by urban trees. *Journal of environmental management*, 37(3), 207-217.
- Nowak, D. J. (2002). The effects of urban trees on air quality. *USDA Forest Service*, 96-102.
- 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*, 4(3), 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007>
- Oke, T. R. (2002). *Boundary layer climates*. Routledge.
- Oldcastle. (2018). *BIOPOD™ BOX FILTERS Help Reclaim a Lost Neighborhood*. https://oldcastleinfrastructure.com/wp-content/uploads/2018/11/OSS_CaseStudy_BioPod_College-Park-GA_Apr-2017-FINAL-11.16.18.pdf

- OMS. (1946). *Préambule à la Constitution de l'Organisation mondiale de la Santé, tel qu'adopté par la Conférence internationale sur la Santé, New York, 19-22 juin 1946.* https://www.who.int/governance/eb/who_constitution_fr.pdf
- Pellegrini, P. (2012). Pieds d'arbre, trottoirs et piétons : Vers une combinaison durable? *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, 3(2).
- Peterson, J., Dupere, A. J., & Houle, J. J. (s. d.). *Treating Stormwater with a Tree Box Filter in a Coastal New England City : A Field Study of Effectiveness and Community Guidance for Installations*. 29.
- PHILIPP, M.-A., & RNIER, J. F. (2005). *ALIGNEMENTS D'ARBRES: QUEL RÔLE DANS LA VILLE?*
- Pommier, G., Provendier, D., Gutleben, C., & Musy, M. (2014). *Impact du végétal en ville*. Plante et cité. https://www.plante-et-cite.fr/ressource/fiche/85/vegudud_impact_du_vegetal_en_ville
- Ponsar, L., Couturier, B., Jary, P., & Pouvelse, C. (2017). *Confort thermique en milieu urbain Quelques outils disponibles pour l'aide à la décision* (p. 17). https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/09/carnets_fevrier2016_vf_cle7a1f49.pdf
- Portalez, F. (2016). *RECOMMANDATIONS POUR UNE GESTION DURABLE DES ESPACES VERTS EN BOURGOGNE*. https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/8994/Portalez_Florent_MEnv_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rector, P., Obropta, C., & Brown, J. (2013). *FS1209 : Green Infrastructure Practices: Tree Boxes (Rutgers NJAES)*. <https://njaes.rutgers.edu/fs1209/>
- Rey, F., Ballais, J.-L., Marre, A., & Rovéra, G. (2004). Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes Rendus Geoscience*, 336(11), 991-998. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.03.012>
- Robillard, J. (2011). *Les techniques alternatives d'assainissement : Quelle efficacité en termes de lutte contre les inondations ?* 48.
- Rousset, J., & Giraud, J. R. (1979). Rapport V-1 Impacts de l'urbanisation des bassins versants sur les eaux superficielles. *Journées de l'hydraulique*, 15(2), 1-6.
- Saget, A. (1994). *Base de données sur la qualité des rejets urbains de temps de pluie : Distribution de la pollution rejetée, dimensions des ouvrages d'interception*. Ecole nationale des ponts et chaussées-ENPC PARIS/MARNE LA VALLEE.
- Saudreau, M., Kastendeuch, P., Ngao, J., Najjar, G., & Ameglio, T. (2015). Régulation du climat thermique urbain par les arbres : Ombrage et température du couvert. *Innovations Agronomiques*, 45, 23. <https://doi.org/10.15454/1.4622648823879841E12>
- Seidl, M. (2019). L'arbre de pluie pour la gestion du ruissellement urbain. *Journée SenseCity le 26 Novembre 2019*.
- Seidl, M., & Saifane, M. (2020). A green intensity index to better assess the multiple functions of urban vegetation with an application to Paris metropolitan area. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01293-4>
- Selmi, W. (2014). *Services écosystémiques rendus par la végétation urbaine Application d'approches d'évaluation à la ville de Strasbourg* [Phdthesis, Université de Strasbourg]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01136771>
- Selmi, W. (2016). *Évaluation des services écosystémiques rendus par les arbres urbains Etude de l'effet des arbres sur l'environnement urbain Résultats de l'application du modèle i-Tree Eco à la ville de Strasbourg*. Laboratoire Image, Ville, Environnement à Strasbourg.
- SPW. (2020). *Arbre_de_pluie.pdf*. https://jesuishesbignon.be/wp-content/uploads/2020/03/fiche_07_arbre_de_pluie.pdf
- Stone, M., Christensen, P., & Couling, K. (2014). *Christchurch Stormwater Tree Pit Design Criteria : Detailed Report* (p. 101). <https://www.ccc.govt.nz/assets/Documents/Environment/Water/waterways-guide/Christchurch-Stormwater-Tree-Pit-Design-Criteria-Detailed-Report-prepared-for-Avon-SMP-Blueprint.pdf>
- Stone, M., Christensen, P., Couling, K., & Wehrmann, P. (2015). *FROM VISION TO REALITY: STORMWATER TREE PITS IN CENTRAL CHRISTCHURCH*.
- Subburayalu, S., & Sydnor, T. D. (2012). Assessing street tree diversity in four Ohio communities using the weighted Simpson index. *Landscape and Urban Planning*, 106(1), Article 1. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.02.004>
- Sugiyama, T., Carver, A., Koohsari, M. J., & Veitch, J. (2018). Advantages of public green spaces in enhancing population health. *Landscape and Urban Planning*, 178, 12-17. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.05.019>
- Swoczyzna, T., Kalaji, H. M., Pietkiewicz, S., & Borowski, J. (2015). Ability of various tree species to acclimation in urban environments probed with the JIP-test. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(3), Article 3. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.05.005>

- TDAG. (2016). *Arbres en milieu urbain Guide de mise en œuvre*. www.tdag.org.uk
- Thévenot, D. R. (1993). *POLLUTION DES EAUX PLUVIALES URBAINES : ORIGINE, NIVEAUX ET MOBILITÉ DES POLLUANTS*. 15.
- Tobio, J. A. S., Maniquiz-Redillas, M. C., & Kim, L. H. (2014). Evaluation of Various Design Configurations of a Tree Box Filter Treating Urban Runoff using SWMM. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 14(4), 361-368.
- Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205-1218.
- UACDC,. (2010). *LID Low Impact Development design manual for urban areas*. UNIVERSITY OF ARKANSAS PRESS A COLLABORATION.
- UAS. (2018). *UAS-Tree-Pit-Technical-Specifications-2018.pdf*. URBAN ASSET SOLUTIONS. <https://urbanassetsolutions.com.au/wp-content/uploads/UAS-Tree-Pit-Technical-Specifications-2018.pdf>
- UNHSC. (2012). *University of New Hampshire Stormwater Center 2012 Biennial Report* (p. 36). University of New Hampshire Stormwater Center. <https://extension.unh.edu/stormwater-center>
- Vergriete, Y., & Labrecque, M. (2007). *Rôles des arbres et des plantes grimpantes en milieu urbain : Revue de littérature et tentative d'extrapolation au contexte montréalais* (p. 36).
- 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*. Université de Nantes.
- Vogt, J., Gillner, S., Hofmann, M., Tharang, A., Dettmann, S., Gerstenberg, T., Schmidt, C., Gebauer, H., Van de Riet, K., Berger, U., & Roloff, A. (2017). Citree : A database supporting tree selection for urban areas in temperate climate. *Landscape and Urban Planning*, 157(Supplement C), Article Supplement C. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.06.005>
- Wagner, R., Finck, J. S., Gerolin, A., Berthier, E., & De Bortoli, J. C. (2018). *Retour d'expériences national sur les bassins de stockage sur réseau unitaire* (p. 80). https://modeleau.fsg.ulaval.ca/fileadmin/modeleau/documents/Publications/PhD_s/tiksovana_phd_compresse.pdf
- Wania, A. (2007). *Urban vegetation : Detection and function evaluation for air quality assessment*. Université Louis Pasteur (Strasbourg)(1971-2008).
- Westphal, L. M. (2003). Social aspects of urban forestry: Urban greening and social benefits: A study of empowerment outcomes. *Journal of Arboriculture* 29 (3): 137-147, 29(3).
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). *The SUDS manual*. CIRIA.
- Zaiem, J. (2012). *Analyse de la réponse hydrologique lors de pluies intenses : Cas d'application du bassin de drainage du collecteur de la Savane (Ville de Québec)*. [Masters, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique]. <http://espace.inrs.ca/id/eprint/1747/>
- ZIME YERIMA, H. Z., Seidl, M., Gromaire, M.-C., Bensaoud, A., & Berthier, E. (2023, juillet 3). *Potential of « stormwater trees » for sustainable urban runoff management : Overall assessment of an experimental device within SenseCity*. Novatech 2023. <https://enpc.hal.science/hal-04083207>