

Calcul des indicateurs eaux pluviales : « Coefficient de ruissellement »

Calcul du coefficient de ruissellement :

Le calcul du coefficient de ruissellement moyen du projet, appelé aussi coefficient d'apport, permet de quantifier le ruissellement qui sera produit par toutes les différentes surfaces du projet, en y intégrant une pondération pour les surfaces perméables, imperméables, et semi-perméables.

En fonction du type de surface sur lequel tombe la pluie, la quantité d'eau qui ruisselle varie. Il existe une infinité de surfaces différentes. Afin de simplifier le choix, les surfaces sont regroupées en 3 catégories : surface imperméabilisée (S_{imp}), surface partiellement imperméabilisée (S_{P_imp}), surface perméable (S_{vert}). La répartition des surfaces est détaillée ci-dessous.

Surfaces imperméabilisées (S _{imp})	Surfaces partiellement imperméabilisées (S _{P_imp})	Surfaces perméables (S _{vert})
<ul style="list-style-type: none"> - Parking et voirie étanche : enrobé, béton, asphalte, bicouches... - Toiture, terrasse et chemin (revêtu et étanche) 	<ul style="list-style-type: none"> - tous revêtements poreux sur un sol naturel peu perméable, compacté etc (K < 1x10⁻⁵ m/s < 36 mm/h ou pente > 1 %) : - surfaces sablées - surfaces pavées perméables (joints et lit de pose en sable, enherbées) - dalles perméables (dalles engazonnées...) - surfaces minérales perméables (grave, galet ou gravier, enrobé ou béton poreux...) 	<ul style="list-style-type: none"> - pleine terre (pelouse, bois, ...) - tous revêtements poreux sur un sol naturel et perméable (K ≥ 1x10⁻⁵ m/s = 36 mm/h et pente ≤ 1 %) : - surfaces sablées - surfaces pavées perméables (joints et lit de pose en sable) - surfaces sur dalles perméables (dalles engazonnées...) - surfaces minérales perméables (grave, galet ou gravier, enrobe ou béton poreux...)

Le calcul du coefficient de ruissellement passe par le calcul d'une surface dite « active » du projet.

La **surface active (Sa)** correspond à la proportion de la surface projet qui produit du ruissellement. Elle s'exprime en multipliant chaque surface (perméable, imperméable, semi-perméable) par son coefficient de ruissellement propre (0,2 si perméable, 0,5 si semi-perméable, et 0,9 si imperméable) :

$$S_a = \sum Cr_{imp} \times S_{imp} + \sum Cr_{P_imp} \times S_{P_imp} + \sum Cr_{vert} \times S_{vert}$$

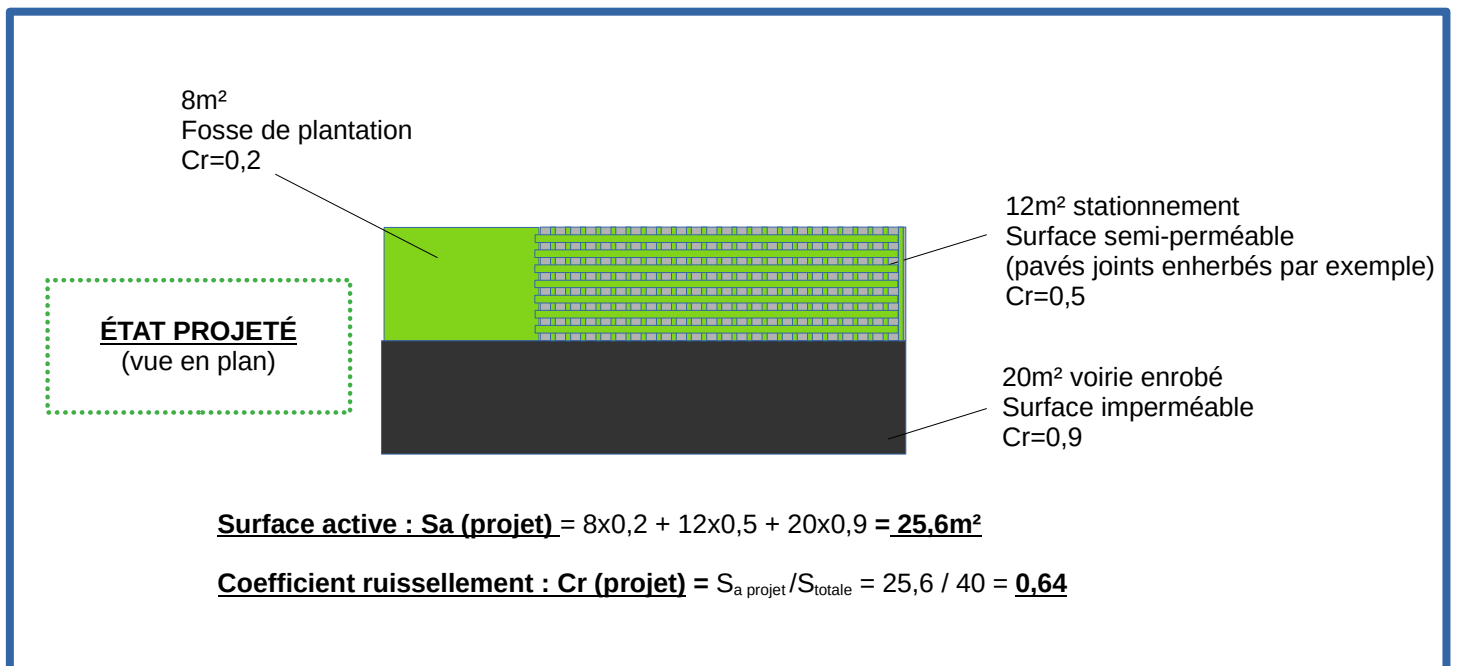
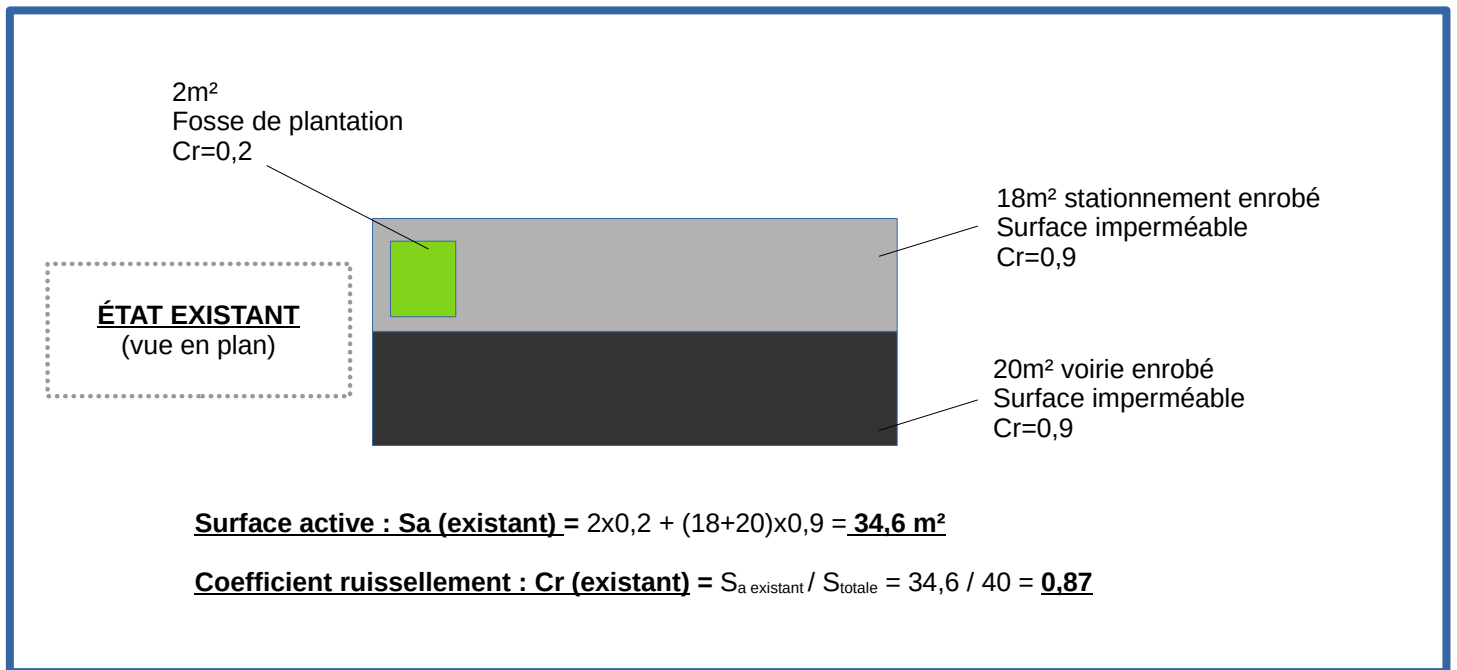
Le **coefficient de ruissellement** (ou coefficient d'apport **Ca**) du projet correspond à la surface dite « active » (Sa), divisée par la surface totale (S) du projet :

$$C_a = S_a / S$$

	Indicateur	définition	Valeur	unité
A remplir : surfaces du projet	Surface imperméabilisée (S _{imp})		S _{imp} = 80	m ²
	Surface partiellement imperméabilisée (S _{P_imp})		S _{P_imp} = 10	m ²
	Surface perméable (S _{vert})		S _{vert} = 10	m ²
Résultat :	Surface totale du projet (S)	S = S _{imp} + S _{P_imp} + S _{vert}	100	m ²
Constantes : coefficients de ruissellement (Cr)	Coefficient imperméabilisée (C _{r_imp})		C _{r_imp} = 0,9	
	Coefficient partiellement imperméabilisée (C _{r_P_imp})		C _{r_P_imp} = 0,5	
	Coefficient non imperméabilisée (C _{r_vert})		C _{r_vert} = 0,2	
Résultats :	Surface active (Sa)	S _a = ∑ Cr _{imp} × S _{imp} + ∑ Cr _{P_imp} × S _{P_imp} + ∑ Cr _{vert} × S _{vert}	79,0	m ²
	Coefficient de ruissellement total Ou Coefficient d'apport (Ca)		C _a = S _a / S	0,79

Types de surfaces	Exemples d'illustrations	Coefficient de ruissellement – Pluie 10 à 50 ans
Surfaces perméables		0,2
Espace de pleine terre (source : SEPIA Conseils)		
Surfaces partiellement imperméabilisées		0,5
Surface pavée à joints en sable ou végétalisés sur sol naturel. Source : SEPIA Conseils		
		
Surface de voirie étanche ou poreuse avec structure réservoir d'infiltration (ou toiture végétalisée stockante) d'au moins 16 mm de volume libre Source : A partir d'un schéma de l'ADOPTA		
Surfaces imperméabilisées		0,9
Toitures classiques		
		
Revêtements étanches		

EXEMPLE : projet de surface totale 40m²



→ **sur le critère du ruissellement**, le projet sera passé d'une **d'ambition « très faible »** ($Cr > 0,8$) à **« moyenne »** (Cr entre 0,5 et 0,7)

Calcul des indicateurs eaux pluviales :

% de la surface projet déconnectée du réseau d'eaux pluviales, par infiltration vers des espaces végétalisés à ciel ouvert

On considère qu'une surface est « déconnectée » du réseau d'eaux pluviales, lorsque le ruissellement généré par une pluie « courante » ne va pas au réseau et est infiltré dans le sol.

Dans le cadre de ce guide dédié à la création d'îlots de fraîcheur, et afin d'encourager l'infiltration à ciel ouvert et l'évapotranspiration des végétaux, on considérera qu'une surface est déconnectée quand le ruissellement généré par celui-ci sera infiltré dans un sol qui bénéficiera à espace végétalisé.

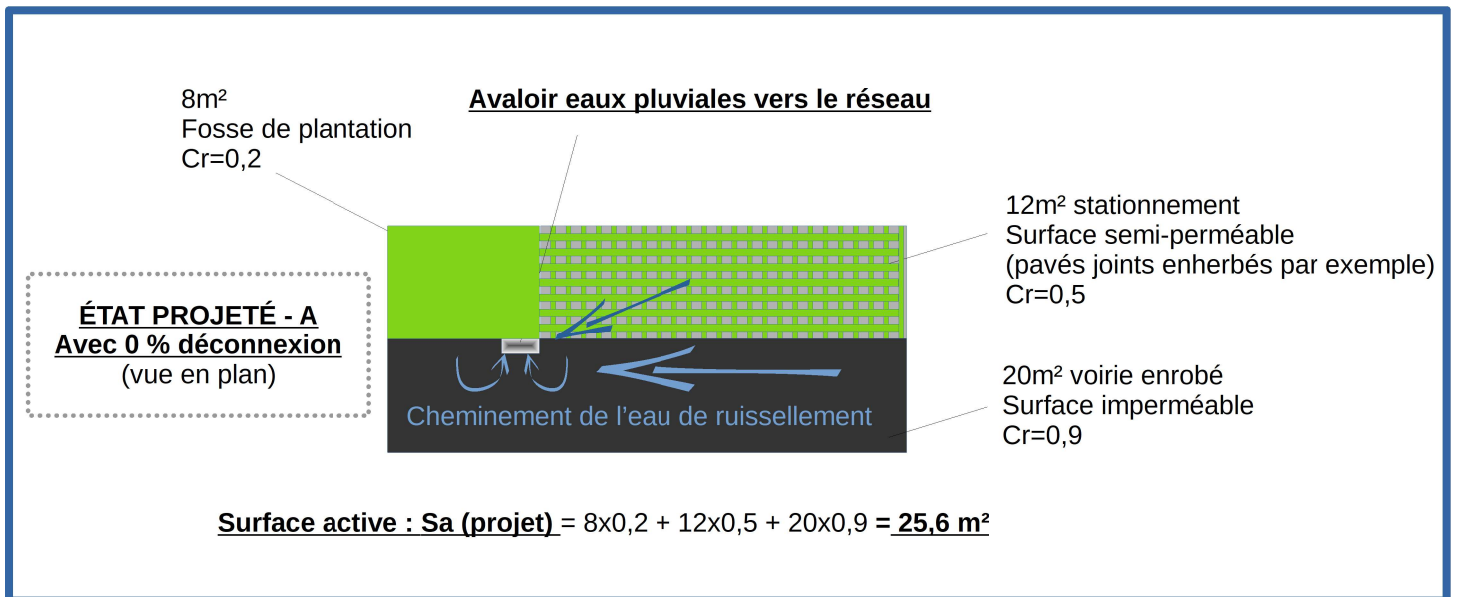
Un dispositif de déconnexion peut donc être un fossé, une noue, un bassin type jardin de pluie, une tranchée d'infiltration bénéficiant à un arbre (arbre de pluie), un espace planté en creux etc...

Pour être considéré comme déconnectée, une surface doit donc ruisseler dans un dispositif capable d'infiltrer un certain volume utile d'eau correspondant à une « pluie courante ». Ce volume de pluie courante à infiltrer est défini en fonction du secteur d'assainissement :

- **En secteur de collecte unitaire**, la pluie courante à infiltrer est la pluie mensuelle d'1 heure, soit **6 L/m² de surface active (=6mm)**
- **En secteur de collecte séparative** : la pluie courante à infiltrer est la pluie bi-annuelle d'1 heure, **soit 16 L/m² de surface active (=16mm)**

Au delà, pour des pluies générant un ruissellement supérieur aux valeurs ci-dessus, le volume de ruissellement excédentaire peut cheminer en surface jusqu'au réseau de collecte.

EXEMPLE : projet de surface totale 40m², sur le secteur séparatif



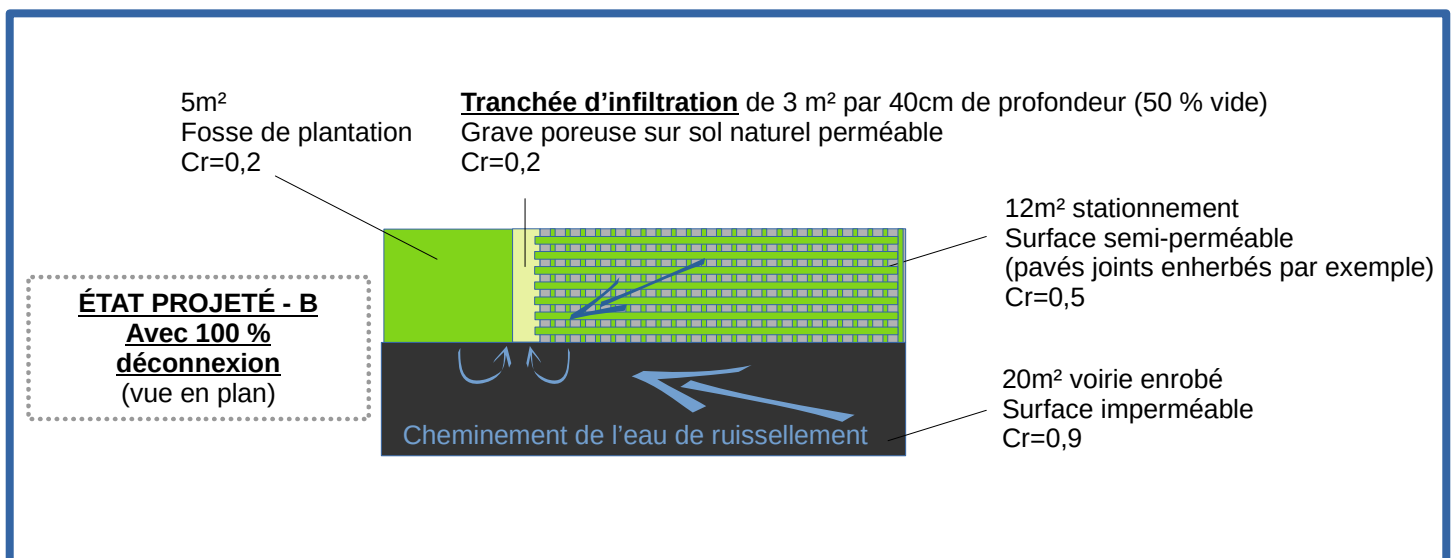
Sur le secteur unitaire, le volume à déconnecter est de 16 L/m² de surface active.

Pour déconnecter 100 % de la surface de ce projet, le volume d'eau à infiltrer/déconnecter est donc
= 16 L/m² x 25,6 m² = 410 Litres

On propose d'infiltrer les eaux pluviales dans une tranchée d'infiltration, constituée de béton concassé 20/40mm avec un indice de vide de 50%.

Une telle tranchée, que l'on propose de réaliser sur une surface de 3 m², par 30cm de profondeur, constitue un **volume utile = 3 x 0,3 x 50 % = 450 litres**

Ce dispositif permet d'infiltrer les 16 L/m² de surface active et est donc retenu pour déconnecter la surface projet. On propose de modifier le nivellement de la voirie projetée et du stationnement pour que les eaux de ruissellement s'écoulent dans la tranchée d'infiltration.



→ le projet sera passé d'un indicateur d'ambition « très faible » (0 % de déconnexion) à « forte » (100% de déconnexion)

Calcul des indicateurs eaux pluviales : aide au calcul : volume utile

Le volume utile correspond au volume d'eau que le dispositif (noue, arbre de pluie, tranchée d'infiltration, structure réservoir etc) est capable de stocker avant infiltration dans le sol.

Le calcul du volume utile dépend du dispositif :

- tranchée d'infiltration uniquement

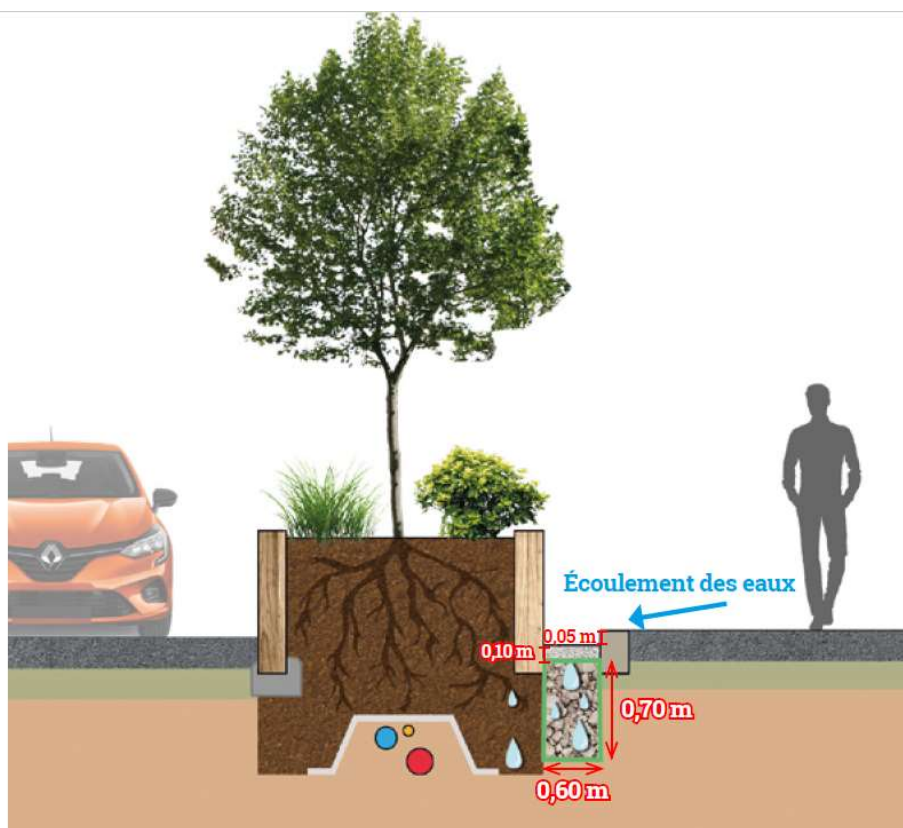
→ **Volume utile = (volume tranchée) x (% porosité matériau*)**

Exemple d'une tranchée de 0,7m x 0,6m x 1m en cailloux de béton concassé 20/40mm (porosité 50%)

Volume tranchée = $0,7 \times 0,6 \times 1 = 0,42 \text{ m}^3$

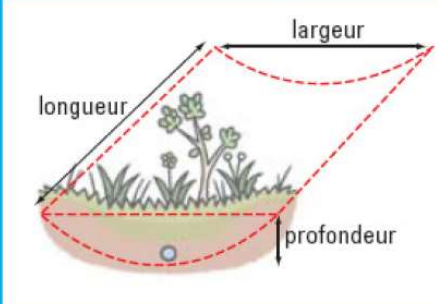
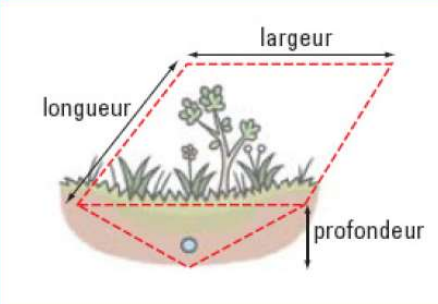
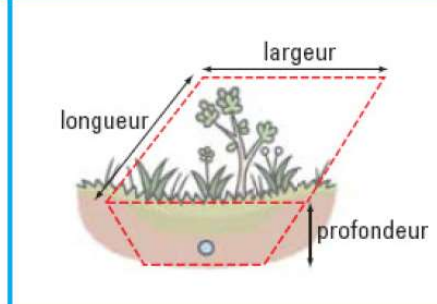
Volume utile = $0,42 \text{ m}^3 \times 50 \% = 0,21 \text{ m}^3$ d'eau = 210 litres

* porosité du matériau = % de vide remplissable par l'eau



Exemple d'une tranchée d'infiltration servant d'irrigation à un bac à plantation
(crédits : Livret Technique « les arbres de pluie » Métropole Grand Lyon)

- espace vert en creux uniquement (type noue)

Section courbe	Section triangulaire	Section trapézoïdale
		
<p>Ces formules permettent de calculer le volume de stockage dans ces 3 cas :</p>		
$\text{longueur} \times \text{Largeur} \times \text{profondeur} \times (3,14/4)$	$\text{longueur} \times (\text{largeur}/2) \times \text{profondeur}$	$\text{longueur} \times \text{profondeur} \times (\text{largeur} + \text{base})/2$

CALCUL DU VOLUME POUVANT ETRE STOCKE DANS L'OUVRAGE (SOURCE GRAND LYON)

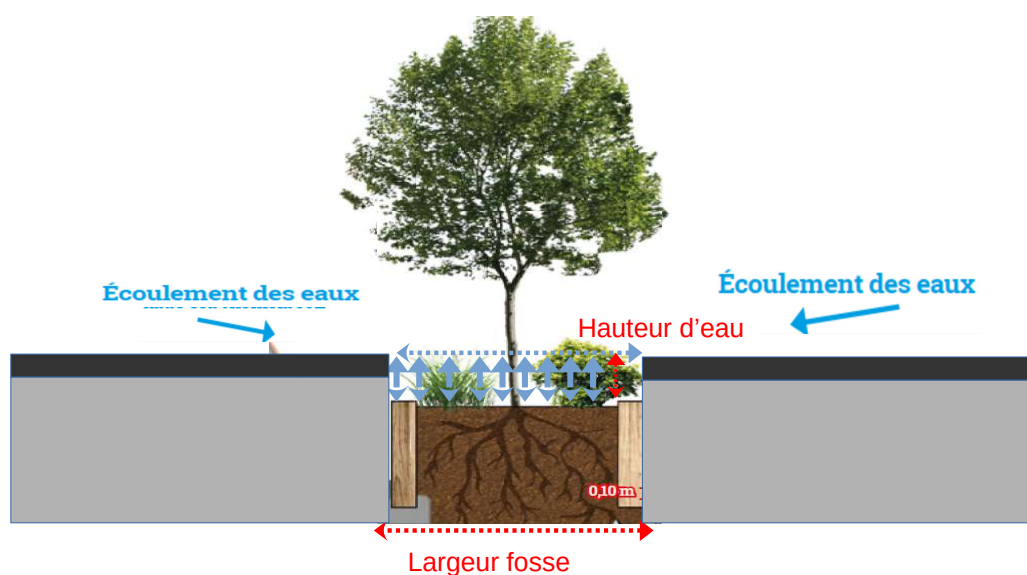
Exemple d'une noue triangulaire de

- L longueur 1 m
- l largeur 2 m
- profondeur 0,3 m

→ $\text{volume utile} = h \times L \times l/2 = 0,3 \times 1 \times 2/2 = 0,3 \text{ m}^3 = 300 \text{ litres}$

- espace vert en creux uniquement (fosse d'arbre)

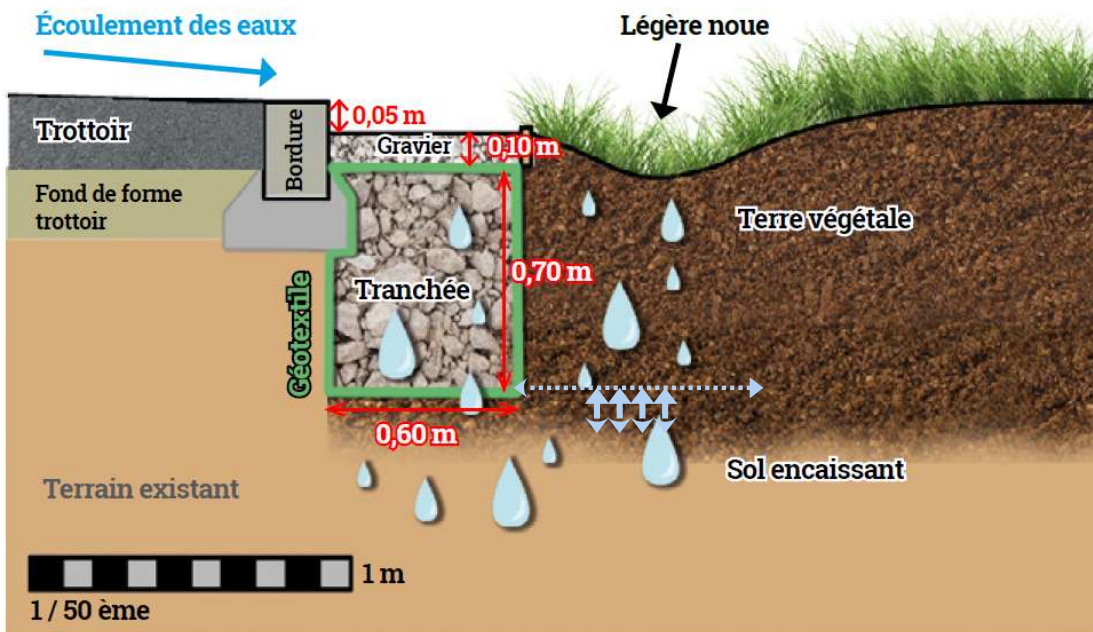
→ $\text{Volume utile} = (\text{surface au sol fosse}) \times (\text{hauteur d'eau})$
 $= \pi \times (\text{largeur}/2)^2 \times \text{hauteur}$ (fosse circulaire)
 $= \text{largeur}^2 \times \text{hauteur}$ (fosse carrée)



- tranchée d'infiltration + espace vert creux

Volume utile

= volume utile tranchée d'infiltration + volume utile espace creux



*Exemple d'une tranchée d'infiltration en bordure de noue
(crédits : Livret Technique « les arbres de pluie » Métropole Grand Lyon)*

Calcul des indicateurs eaux pluviales : aide au calcul : perméabilité et temps de vidange

Pour tous ces dispositifs, le facteur limitant dans la conception est la capacité du sol à infiltrer l'eau en un temps donné. C'est la perméabilité du sol (mesurée en mm/h ou m/s) qui va limiter la capacité du dispositif à absorber l'eau accumulée. Couplée à la hauteur d'eau (mm ou cm), la perméabilité impose donc un temps de vidange (s ou h).

$$\text{Temps de vidange (h)} = \text{hauteur d'eau (mm)} / \text{perméabilité (mm/h)}$$

$$= (\text{volume utile}/\text{surface d'infiltration})/\text{perméabilité}$$

Sur le territoire de Nantes métropole, on considère comme acceptable un temps de vidange inférieur à 24h, voir 48h maximum.

Exemple : une fosse d'arbre de 10cm de profondeur remplie d'eau, avec un sol argileux (perméabilité 6 mm/h) aura un temps de vidange de $100/6 = 17h$

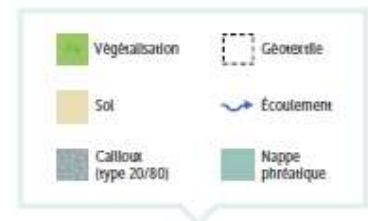
Cas pratique - On considère :

- une pluie 16mm (= 16 litres / m²), d'occurrence 2 ans.
- une surface imperméable de 111m²
- un sol argileux (perméabilité 6 mm/h)

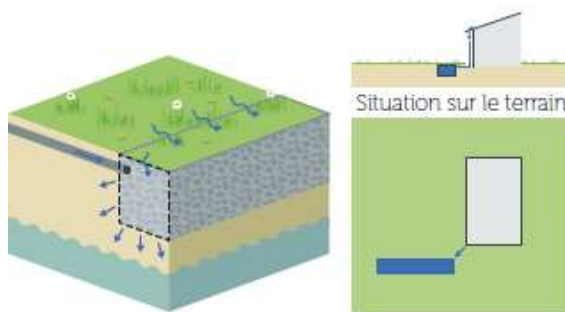
→ la surface active correspond à cette surface = $0,9 \times 111 = 100 \text{ m}^2$

→ pour 100m² de surface active, le ruissellement produit sera au maximum de $100 \text{ m}^2 \times 16 \text{ litres} = 1,6\text{m}^3$

Parmi le large choix de techniques de gestion des eaux pluviales, quelques exemples pour stocker et infiltrer 1,6 m³ correspondant à une surface imperméabilisée de 100 m²



Tranchée d'infiltration



Dimension type : Largeur : 1 m - Profondeur : 0,7 m
(remplie de cailloux à 30 % de vide)
Dimension utile : 8 m de long

Puits d'infiltration



Dimension type : Diamètre : 1,2 m - Profondeur : 0,7 m
Dimension utile : 2 puits

Jardin de pluie



Dimension type : Largeur : 3 m - Profondeur : 0,2 m
Dimension utile : 3 m de long

Noue



Dimension type : Largeur : 2 m - Profondeur : 0,3 m
Dimension utile : 6 m de long

pour infiltrer ce volume utile de 1,6 m³ dans les ouvrages ci-dessus, il faudra :

→ Tranchée d'infiltration=(volume utile/surface d'infiltration)/perméabilité
=1,6 m³/8 m²/ 0,006 m/h = 33h

→ noue
=1,6 m³/12 m²/ 0,006 m/h = 22h

pour infiltrer ce volume utile de 1,6 m³ dans une fosse d'arbre carrée de 2m sur 2m, on obtient :

-hauteur utile = 1,6m³ / 4m² = 40 cm de profondeur
-temps de vidange = 1,6 m³ / 4m² / 0,006 m/h = 66h

→ il faut augmenter la surface d'infiltration pour diminuer le temps de vidange.

Avec une fosse d'arbre de 3x2m, soit 6m² de surface d'infiltration, on obtient :

-hauteur utile = 1,6m³ / 6m² = 27 cm de profondeur :
-le temps de vidange sera = 1,6 m³ / 6m² / 0,006 m/h = 44h

Calcul de l'indice de canopée

L'indice canopée est déterminé pour une hauteur de 3m. Il n'y a pas de valeur de référence quant à la hauteur qui détermine l'indice canopée. Certaines études utilisent 3 m, d'autres 5 m.

Un arbre avec des branches de 4m de long développe une canopée de 50 m².

Catégorie	A la création	A 20 ans
Arbre de petit développement	0,75m ²	10m ²
Arbre de moyen développement (jeune plant)	0,03m ²	50m ²
Arbre de moyen développement (baliveau)	0,3m ²	
Arbre de moyen développement (arbre tige)	2,50m ²	
Arbre de grand développement (jeune plant)	0,03m ²	100m ²
Arbre de grand développement (baliveau)	0,3m ²	
Arbre de grand développement (arbre tige)	3m ²	

Petit développement : arbre de 4^e grandeur – hauteur adulte < 10m

Moyen développement : arbre de 2^e ou de 3^e grandeur – 10m < hauteur < 20m

Grand développement : arbre de 1^{ère} grandeur – hauteur adulte > 20m

Évaluation de la canopée dans les projets

Niveau 0 : absence d'arbres

Niveau 1 : indice canopée < 10 %

Niveau 2 : 10 % < indice canopée < 30 %

Niveau 3 : indice canopée > 30 %

Mesure de la canopée des arbres existants

La canopée est mesurée de la façon suivante :

Le houppier est assimilé à une forme géométrique régulière et symétrique : une sphère. De ce fait, la projection au sol du houppier est un disque.

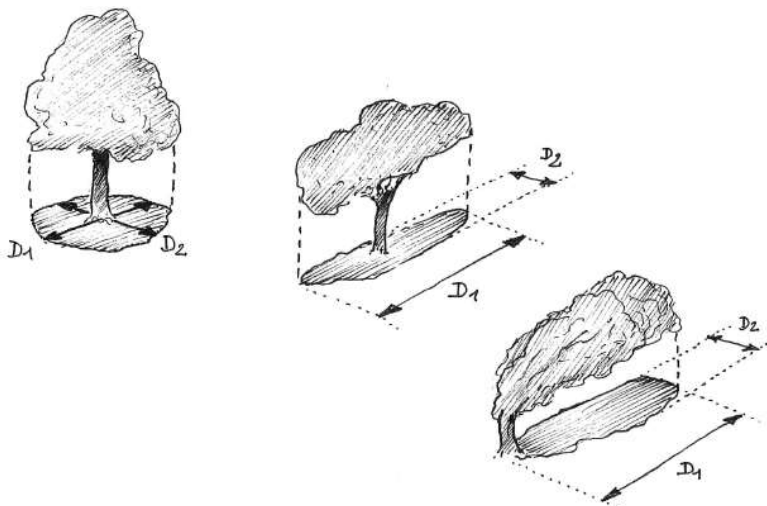
La surface de ce disque est calculée à partir de la mesure du diamètre du houppier.

Le diamètre du houppier est mesuré (soit au pas, soit avec un décimètre) selon deux diamètres perpendiculaires (dont on calcule la moyenne).

Puis on applique la formule de la surface d'un cercle : $S = \text{Pi} \times D^2/4$

avec $D = (D_1 + D_2) / 2$

et D1 et D2 les deux diamètres mesurés sur le terrain.



Calcul de l'indice de canopée

Présentation ci-dessous de la feuille d'aide au calcul (sous excel)

CALCUL INDICE CANOPEE			
	Nombre	A la livraison du projet	A 20 ans
<i>Taille de l'arbre</i>			
Arbre de petit développement	Éléments à renseigner	Résultats calculés	
Arbre de moyen développement (jeune plant)			
Arbre de moyen développement (baliveau)			
Arbre de moyen développement (arbre tige)			
Arbre de grand développement (jeune plant)			
Arbre de grand développement (baliveau)			
Arbre de grand développement (arbre tige)			
TOTAL	Résultats calculés		

	Calcul de l'existant*	A la livraison du projet	A 20 ans
Surface canopée (en m ²)	Éléments à renseigner	Résultats calculés	
Surface de l'aménagement (en m ²)			
Indice de canopée	Résultats calculés		

GLOSSAIRE

MICRO-CLIMAT

Canicule : se réfère à un épisode pendant lequel les températures moyennes diurnes et nocturnes dépassent les seuils départementaux pendant plus de trois jours et trois nuits consécutifs. En Loire-Atlantique, ces seuils sont de 20°C (nuit) et 34°C (jour) en 2021.

Effet d'îlot de chaleur urbain : phénomène de grande échelle rendant des zones urbaines et péri-urbaines en moyenne plus chaudes la nuit que le milieu rural périphérique : dans ces zones, la température de l'air, des surfaces et/ou du sol sont plus élevées : on parle de surchauffe urbaine. Il est causé par le cumul de phénomènes liés à la morphologie urbaine, aux surfaces fortement minérales, aux apports de chaleur **anthropologique (= liée à l'action humaine directe ou indirecte)**.

Vague de chaleur : se réfère à un épisode pendant lequel les températures moyennes sont anormalement élevées, et constituent un risque sanitaire.

Îlot de fraîcheur urbain : ces espaces n'ont pas été définis de manière scientifique ou réglementaire, ni normalisés. En l'absence de définition précise et opérationnelle, on peut considérer qu'il s'agit d'espaces frais à l'échelle de l'utilisateur, dont la surface est de l'ordre de plusieurs mètres carré ou d'un linéaire d'une dizaine de mètres au moins pour les parcours frais. Ce sont des espaces où en conditions de fortes chaleurs, le ressenti de la fraîcheur et l'accès à cette fraîcheur sont garantis, apportant confort et satisfaction aux usagers.

Microclimat : ensemble de conditions météorologiques locales sous diverses influences (topographie, végétation, géologie...) et significativement distinctes du climat général de la région.

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES ET TRANSFERTS DE CHALEUR

Albédo (valeur de 0 à 1) : capacité à réfléchir – ne pas absorber – l'énergie solaire. Un matériau clair (fort albédo) a une température plus faible en surface le jour, induit une augmentation du rayonnement réfléchi le jour mais restitue moins la chaleur la nuit. Au contraire, un matériau foncé a une température de surface plus élevée en journée avec un faible rayonnement réfléchi mais restitue la nuit fortement la chaleur accumulée en journée, par forte inertie.

Capacité thermique : caractérise la quantité de chaleur à accumuler dans un volume pour le faire monter d'un degré. Cette dernière est relativement homogène entre les différents revêtements de voirie et augmente avec le taux d'humidité.

Conduction : transfert de chaleur à travers un revêtement ou un mobilier.

Conductivité : caractérise la vitesse du transfert de la chaleur dans un volume.

Convection : transfert de chaleur généré par la circulation de l'air. La convection désigne l'échange de chaleur entre l'air en mouvement et la surface d'un revêtement (sol, façade,...)

Emissivité (valeur de 0 à 1): capacité d'une surface à réémettre l'énergie accumulée sous forme de rayonnement.

Radiosité : somme du rayonnement solaire réfléchi et du rayonnement émis et réfléchi dans l'infrarouge par le revêtement

Rayonnement : transfert de chaleur d'un corps à un autre, sans aucun contact entre eux, par déplacement d'ondes dans l'espace. Dans le cas d'une rue, on peut distinguer deux émetteurs de rayonnement : le soleil et les revêtements.

Lorsque le rayonnement solaire atteint la rue, l'énergie qu'il transporte se divise en deux flux :

- Une partie du rayonnement est réfléchi (c'est-à-dire qu'elle « rebondit » sur la surface).
- L'autre partie du rayonnement est absorbée par la surface ensoleillée, et implique une augmentation de la température du matériau absorbant.

Plus la surface ensoleillée est claire, moins elle absorbera d'énergie et plus elle réfléchira le rayonnement solaire. Le taux d'énergie réfléchi est appelé l'albédo : plus l'albédo d'une surface est élevé (plus la surface est claire) moins la surface absorbera d'énergie.

Quant à l'énergie absorbée par la surface ensoleillée, elle est ensuite évacuée de plusieurs manières :

- Par convection : la surface échange sa chaleur avec l'air ambiant,
- Par conduction : l'énergie est transportée dans le sous-sol,
- Par rayonnement : la surface elle-même émet un rayonnement de chaleur (dit infrarouge) dans l'espace de la rue.

CHALEUR ET SANTÉ

Confort : état de satisfaction que l'individu exprime vis-à-vis des caractéristiques de son environnement. On parle de **confort thermique** pour décrire l'évaluation que peut faire l'individu des caractéristiques thermiques de son environnement.

Équilibre thermique : état dans lequel la température du corps humain reste stable et acceptable.

Stress thermique : état dans lequel la température tend à trop fluctuer et implique l'activation des processus thermorégulateurs pour maintenir l'équilibre dans lequel la température du corps humain reste stable et acceptable (ex : transpiration,...).

Détresse thermique : état dans lequel la température n'est pas à l'équilibre et un écart s'installe produisant des impacts sérieux sur la santé de l'individu.

Indice universel du climat thermique (en anglais Universal Thermal Climate Index, **UTCI**) : évalue le stress thermique ressenti par l'homme en combinant plusieurs paramètres comme la température, l'humidité ou la pression de la vapeur de l'eau, la vitesse du vent et la radiation thermique.

GESTION DE L'EAU PLUVIALE

Arbre de pluie : similaire aux arbres traditionnels, à la différence que l'espace d'enracinement est conçu de manière à recevoir, stocker et infiltrer les eaux de ruissellement des surfaces attenantes. Cette installation répond à des objectifs de gestion intégrée et de réduction des quantités d'eau de ruissellement envoyées au réseau d'assainissement. L'arbre de pluie peut être conçu de différentes manières pour la collecte et le stockage de l'eau :

- en creux, en contre-bas des surfaces imperméabilisées dont on veut collecter le ruissellement (le volume de stockage de l'eau correspond au volume à ciel ouvert)
- à niveau ou en surplomb, entouré/couplé à une ou des tranchées d'infiltration qui alimentent l'espace d'enracinement
- via des drains
- via des revêtements perméables autour et au droit de l'arbre
- une combinaison de ces différents dispositifs

Bassin d'infiltration : bassin perméable dans lequel la vidange se fait (l'eau s'évacue) dans le sol par infiltration.

Bassin de rétention (stockage, retenue) : bassin de stockage des eaux pluviales, à sec ou en eau, permettant de réguler le débit de rejet au milieu naturel ou au réseau d'assainissement.

Capacité d'infiltration d'un sol : aptitude à laisser l'eau à s'écouler. La capacité d'infiltration est un débit (volume infiltré dans un temps donné) par unité de surface, qui s'exprime en $m^3/s/m^2$.

Coefficient d'imperméabilisation (CIMP) : rapport entre la surface imperméabilisée d'un projet et sa surface totale.

Coefficient de ruissellement (CR) : coefficient moyen traduisant le rapport entre volume ruisselé et le volume précipité sur une surface pour une pluie donnée.

Colmatage : action de se boucher plus ou moins complètement ce qui empêche l'écoulement des eaux. Obstruction d'un ouvrage hydraulique par des sédiments, des particules, des déchets...

Déconnexion : technique permettant d'intercepter les écoulements d'eau pluviale des surfaces amont et de soustraire ainsi les rejets d'eau pluviales existants au réseau d'assainissement.

Exutoire : issue par laquelle s'écoulent les eaux vers le milieu qui les recevra. Il peut s'agir du milieu naturel (le sol en cas d'infiltration, un cours d'eau, un fossé...) ou d'un ouvrage (réseau de canalisation, station d'épuration...).

Gestion intégrée des eaux pluviales (GIEP) : ensemble de techniques conciliant l'aménagement du territoire et bon fonctionnement du grand cycle de l'eau, via l'infiltration, la déconnexion et la régulation des eaux pluviales. Ces techniques contribuent à améliorer la qualité des rejets en milieu naturel, à limiter les îlots de chaleur urbain, à préserver la biodiversité en ville et à améliorer le cadre de vie.

Infiltration : technique permettant d'évacuer les eaux pluviales par pénétration dans le sol. Elle permet de gérer les eaux pluviales au plus près de là où elles tombent et d'éviter les rejets au réseau.

Imperméabilité : Incapacité d'un matériau à se laisser imprégner par l'eau.

Imperméabilisation : action anthropique associée à l'urbanisation et due à la couverture des sols par des revêtements imperméables qui ne permet plus l'infiltration de l'eau dans le sol.

Infiltration : passage lent de l'eau à travers un matériau poreux, tel que le sol.

Jardin de pluie, espace vert en creux ou espace vert d'infiltration : légères dépressions (sèches ou en eau) assimilées à des modelages de terrain permettant de collecter, de stocker voire d'infiltrer les eaux pluviales. Cette technique alternative « douce » est recommandée car elle conjugue à la fois l'agrément du végétal, le cadre de vie des habitants, la nature en ville (...) et la gestion des eaux pluviales. Un jardin de pluie est généralement associé à l'aménagement d'un jardin d'habitation constitué d'une petite zone de stockage à l'aire libre plantée de végétation aquatique. L'espace vert creux est plutôt associé à l'aménagement d'une ZAC ou d'un lotissement avec un bassin de stockage peu profond et multifonctionnel sous la forme d'un parc ou d'un espace vert temporairement inondable. L'espace vert d'infiltration englobe l'ensemble des espaces végétalisés en creux pouvant recueillir les eaux pluviales des surfaces minérales voisines.

Mare de rétention (ou bassin) : la mare de rétention comporte deux niveaux. Un premier niveau Toujours en eau correspond à la mare permanente qui participe au paysage et agrmente l'environnement avec sa faune et sa flore aquatique. Le second niveau sert à réguler les débits. Il stocke temporairement les eaux de ruissellement lors des pluies et se vide progressivement grâce au dispositif de régulation . La partie de stockage temporaire est ainsi libérée pour la pluie suivante.

Noue : large fossé, peu profond avec des pentes de berges douces (3 pour 1,30 % maximum) retenant temporairement des eaux de ruissellement et permettant d'associer différents usages (paysagé, jeux, loisirs...).

Ouvrage de rétention : ouvrage retenant temporairement des eaux de ruissellement, aussi appelé ouvrage de stockage, de retenue, de régulation, tampon (ex : jardins de pluie, noues, chaussées à structure réservoir, tranchées d'infiltration, etc.)

Perméabilité (conductivité hydraulique) : Aptitude d'un milieu poreux à laisser circuler l'eau. Il s'agit d'une vitesse K qui s'exprime en m/s. Elle permet notamment de déterminer la capacité d'infiltration d'un dispositif de gestion des eaux pluviales à savoir le volume d'eau susceptible de s'infiltrer dans un ouvrage par unité de surface et par unité de temps.

Pluie décennale : la pluie de période de retour de 10 ans ce qui signifie qu'elle a une chance sur 10 de se produire chaque année ou qu'elle revient en moyenne une fois tous les 10 ans. Ce n'est pas le délai à attendre pour qu'un événement similaire se produise car c'est bien une statistique ; une pluie décennale peut se produire plusieurs fois la même année ou jamais pendant 20 ans. Il existe aussi plusieurs pluies décennales de durées différentes (exemple une pluie de 8,4 mm en 6 min, de 29 mm en 1h ou de 56 mm en 24 h).

Réseau : ensemble de canalisations reliées entre elles pour former par exemple le système d'assainissement pluvial.

Régulation : technique permettant l'infiltration et le stockage temporaire des eaux pluviales pour les rejeter à débit régulé dans le milieu naturel ou le réseau d'assainissement . Permet de maîtriser le risque de ruissellement et d'inondation.

Ruissellement : écoulement des eaux sur une surface à la suite d'une pluie. Les eaux de ruissellement sont les eaux pluviales de surface qui n'ont pas pu s'infiltrer et qui s'écoulent en suivant la pente. Durant leur trajet, elles lessivent les sols et surfaces, entraînent les polluants et peuvent provoquer l'érosion du sol.

Surface active : surface d'apport d'eau de ruissellement dépendant de son niveau d'imperméabilisation et permettant de déterminer le volume d'un dispositif de stockage.

Techniques alternatives : techniques de gestion des eaux pluviales dont le concept s'oppose au principe du « tout tuyau ». Leur objectif est non d'évacuer les eaux de ruissellement le plus loin et le plus vite possible, mais de les retarder et/ou les infiltrer (tranchée d'infiltration, jardin de pluie, bassin de stockage, toiture stockante,...).

Tranchée de rétention et d'infiltration (ou drainante) : cette technique alternative de gestion des eaux pluviales est recommandée par Nantes Métropole. Il s'agit d'un ouvrage superficiel et linéaire rempli de matériaux drainants (ballast, galets...) permettant le stockage des eaux pluviales avant rejet. On distingue deux types de tranchées. La tranchée d'infiltration avec un rejet dans une couche de sol perméable non saturée par l'eau de la nappe phréatique. Une couche de terrain d'au moins 1m est indispensable pour filtrer, favoriser l'épuration naturelle de l'eau et garantir un fonctionnement optimal. La tranchée drainante (lorsque l'infiltration dans le sol est insuffisante), avec un rejet régulé vers un exutoire.

Volume utile de stockage : volume disponible dans un ouvrage pour stocker de l'eau. Il tient compte de plusieurs paramètres comme la porosité du matériau de remplissage pour les ouvrages enterrés, la pente du fond de l'ouvrage, (...). Ex : volume de vide dans un espace végétalisé en creux. A ne pas confondre avec la réserve utile du sol (notion agronomique), qui correspond à la quantité d'eau qu'un sol peut absorber et redistribuer à la végétation.

VÉGÉTALISATION

Arbuste : plante ligneuse vivace dont la taille est inférieure à 7 mètres à l'état adulte.

Canopée : couverture feuillée de la végétation. C'est ce que l'on voit depuis le ciel. C'est un indicateur utilisé couramment pour décrire la présence des arbres sur un site, ou un territoire, donné. Le plus souvent, la canopée est calculée à partir de la projection de la surface occupée par les houppiers des arbres à une hauteur de 3 mètres. La surface ainsi décrite est donnée en mètres carrés.

Essence : nom générique qualifiant une espèce, une variété ou un genre d'arbre. On la qualifie de secondaire quand elle n'est pas dominante dans un peuplement forestier.

Évapotranspiration : désigne l'évaporation de l'eau en surface ou contenue dans le sol ainsi que la consommation et la transpiration d'eau par un végétal. L'eau se transforme en vapeur d'eau et consomme de l'énergie, contribuant ainsi au microclimat local (îlot de fraîcheur).

Herbacé : qualifie une plante non ou peu lignifiée qui a la consistance souple et tendre de l'herbe ou une communauté végétale majoritairement composée de plantes herbacées.

Houppier (ou couronne) : ensemble des branches et des feuilles d'un arbre.

Indice de canopée : rapport de la surface de la canopée couverte par rapport à la surface du site. Il s'exprime en pourcentage.

Plante indigène : plante qui vit dans son aire de répartition naturelle. Synonymes : natif, autochtone.

Plantations multi-strates

Une plantation multi-strates correspond à une plantation de végétaux de différentes hauteurs (végétaux bas, buissonnants, arborés).

Strate végétale : décrit les niveaux d'étagement vertical de la végétation. On peut considérer trois strates végétales : arborescente, arbustive, herbacée.

Vivace : qualifie une plante vivant plusieurs années, fleurissant et fructifiant plusieurs fois.

Volume d'enracinement : partie du sol travaillée en vue d'accueillir l'implantation d'un ou plusieurs arbres. Ce terme est choisi pour maximiser l'espace trop souvent réduit lorsqu'on désigne une fosse de plantation qui laisse une place congrue au bon développement racinaire.

SOL

Artificialisation : altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique, par son occupation ou son usage.

Désartificialisation : action de restauration d'un sol ou d'amélioration de sa fonctionnalité écologique, ayant pour effet de transformer un sol artificiel en un sol vivant.

Désimperméabilisation : action de transformer une surface imperméable en une surface perméable.

Imperméabilité : incapacité d'un matériau à se laisser imprégner par l'eau.

Artificialisation : altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique, par son occupation, sa transformation, son recouvrement ou son usage.

Désartificialisation : action de restauration d'un sol ou d'amélioration de sa fonctionnalité écologique, ayant pour effet de transformer un sol artificiel en un sol vivant (action de renaturation).

Désimperméabilisation : action de transformer une surface imperméable en une surface perméable.

Imperméabilité : incapacité d'un matériau à se laisser imprégner par l'eau.

Pleine terre : un espace de pleine terre est caractérisé par une absence de revêtement en surface, une continuité verticale en profondeur et une continuité horizontale du sol (trame brune). Un espace de pleine terre est également défini par ses caractéristiques physico-chimiques et biologiques, ainsi qu'une perméabilité du sol, assurant une fonction de support pour la faune et la flore qui s'y développent et favorisant le cycle naturel de l'eau (infiltration, alimentation des nappes phréatiques)

Renaturation : restauration écologique permettant à un écosystème de se rétablir après une dégradation et de retrouver des fonctionnalités écologiques.

Sol encaissant (ou encaissant) : ensemble du sol, souvent des sols anthropisés ou anthroposols qui entoure de toute part la partie travaillée et préparée pour la plantation d'un arbre.

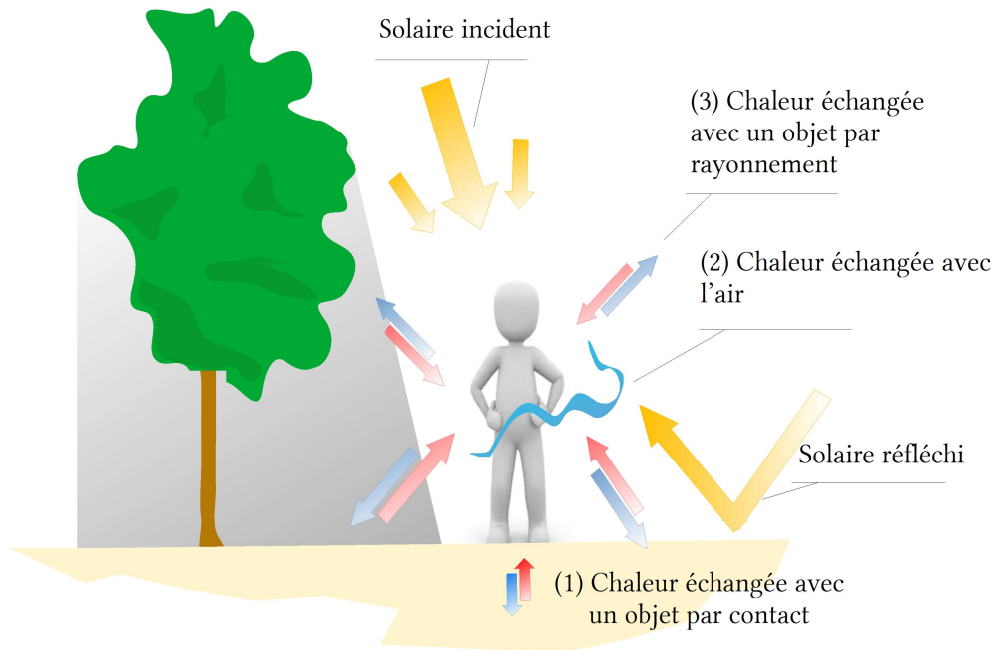
Trame brune : continuité des sols terreux, essentielle au fonctionnement des écosystèmes (support de la végétation, biodiversité, cycle de l'eau, absorption et stockage du CO₂,...).

Volume d'enracinement : espace où le système racinaire de l'arbre pourra se développer = sol encaissant + volume travaillé. Les structures de voirie et les réseaux sont d'autant de contraintes qui fractionnent l'espace d'enracinement de l'arbre, donc l'espace vital de l'arbre.

Volume travaillé : volume de terre fertile en place ou apporté, idéalement de plusieurs m³, pour faciliter les premières années de vie de l'arbre ou de végétaux récemment plantés.

Chaleur : pourquoi a-t-on chaud ?

Objectif : Comprendre quels phénomènes physiques influencent le ressenti de fraîcheur, et quels paramètres sont ainsi utilisés pour caractériser objectivement la fraîcheur d'un espace.



La chaleur ressentie par un individu provient de son environnement immédiat. En contact ou à distance, l'individu échange de la chaleur avec l'air et les objets qui l'entourent par différents phénomènes. La chaleur totale est la somme de ces phénomènes de réchauffement ou de refroidissement :

- > le réchauffement provoqué par l'exposition au rayonnement solaire ;
- > la chaleur apportée ou emportée par
 - > (1) les objets avec lesquels il est en contact (un banc par exemple)
 - > (2) par l'air qui l'entoure, si l'air ou si l'individu est en mouvement
 - > (3) par les objets proches depuis lesquels tout ou partie de son corps est visible (l'échange de chaleur s'effectue alors par rayonnement infra-rouge).

Cette chaleur, en s'accumulant sur l'individu, provoque un inconfort et si elle n'est pas dissipée, l'apparition de risques sanitaires. Elle s'ajoute aussi à la chaleur issue de l'effort de l'individu : chaque effort provoque un apport interne de chaleur supplémentaire. C'est pour cela qu'un espace peut être frais pour une activité et pas pour une autre. La probabilité d'inconfort augmente à mesure que la transpiration s'intensifie (on parle de stress thermique).

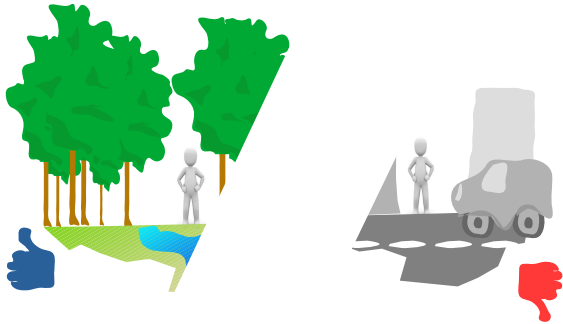
Quels paramètres étudier ? La fraîcheur s'évalue par des mesures physiques. Le sens des échanges de chaleur dépend de qui, de l'individu ou de l'objet, a la température la plus élevée. Leurs intensités dépendent de la différence de température et du positionnement de l'individu vis à vis de ces objets. Les paramètres importants sont :

- > la température de l'air ambiant et la vitesse relative entre l'individu et l'air ;
Exemple : un air immobile plus froid de 10°C rafraîchit peu, mais si l'individu court ou si le vent se lève, le rafraîchissement s'intensifie.
- > le degré de visibilité et de proximité de l'individu avec des objets selon leur température ;
Exemple : la proximité ou le contact avec une façade de température élevée, ou à l'inverse, faible.
- > le degré d'exposition au soleil

Pourquoi l'humidité joue-t-elle un rôle ? Lorsqu'un individu accumule trop de chaleur, la transpiration lui permet de dissiper ce surplus de chaleur et ne pas l'accumuler : l'eau sécrétée à la surface de la peau s'évapore, transformant ainsi la chaleur accumulée en vapeur, évacuée par le vent. Si l'apport de chaleur est trop intense (trop élevé, au cours d'un temps faible), la transpiration ne suffit pas pour empêcher l'accumulation de chaleur. De plus, les capacités de transpiration peuvent être dégradées, soit par déshydratation de l'individu, soit lorsque l'air ambiant est trop humide. En effet, lorsque l'humidité est trop importante (parce que l'espace est mal ventilé, ou parce que les grandes masses d'air circulant sur le territoire sont humides) la forte quantité de vapeur d'eau dans l'air limite l'évaporation de l'eau sur la peau. **Une humidité trop élevée renforce donc l'inconfort thermique, en dégradant les capacités de transpiration de l'individu, et donc de dissipation de la chaleur qu'il accumule.** Une forte humidité peut ainsi créer des conditions atmosphériques invivables en période de fortes chaleurs.

Chaleur : pourquoi a-t-on chaud ?

Objectif : Comprendre quelles autres caractéristiques liées à la perception de l'espace influencent le ressenti de fraîcheur et peuvent être utilisés pour caractériser objectivement la fraîcheur d'un espace.



L'encadré précédent précise que l'inconfort thermique est fortement lié à l'intensification de la transpiration. **Mais le risque d'inconfort thermique est aussi lié à certaines caractéristiques de l'espace qui impactent l'individu sur le plan psychologique (et non physiologique).** C'est au travers de sa perception que l'individu évalue l'espace, soit par la perception visuelle de l'espace, soit par son ressenti, ses sensations.

L'expérience de l'espace dans son ensemble joue ainsi un rôle non négligeable sur le confort thermique. L'ambiance, créée par les éléments de l'espace et leurs caractéristiques (végétation, couleur des surfaces,...) vont accentuer ou diminuer dans une certaine mesure la sensation de fraîcheur perçue par l'individu.

L'organisation de l'espace joue aussi un rôle : les emplacements confortables thermiquement doivent l'être en lien avec les activités qui s'y déroulent. L'aménagement doit être pensé pour améliorer le confort dans son ensemble.

L'effet d'îlot de chaleur urbain et le stockage de la chaleur

Objectif : Comprendre le phénomène d'îlot de chaleur urbain et ses conséquences.



Ce phénomène de grande échelle est le résultat de l'aménagement de la ville. Dans certains quartiers, le rayonnement solaire est piégé, de manière plus ou moins importante selon la hauteur et la densité des bâtiments. Les revêtements minéraux, exposés au soleil, réfléchissent peu ce rayonnement. Ils accumulent et diffusent donc la chaleur absorbée dans le sol, dans les bâtiments. L'absence d'eau ou de plantes empêche la dissipation de la chaleur absorbée. Les vents sont réduits ou bloqués. La ventilation et l'évacuation de la chaleur sont ainsi limitées par la forme urbaine. Les émissions de chaleur par les activités humaines exacerbent le phénomène.

La surchauffe urbaine est la conséquence observable de cette accumulation, et elle est démultipliée lors des fortes chaleurs. Cette surchauffe s'observe de jour, par des différences frappantes de températures de surface entre certaines zones, mais c'est sa forme nocturne qui pose problème en terme de confort : de nuit, les différences de température d'air peuvent atteindre, selon les villes, plusieurs degrés entre certains quartiers et comparativement à l'extérieur du tissu urbain. **Plus il fait chaud, plus l'écart de température entre la ville et la campagne est important.**

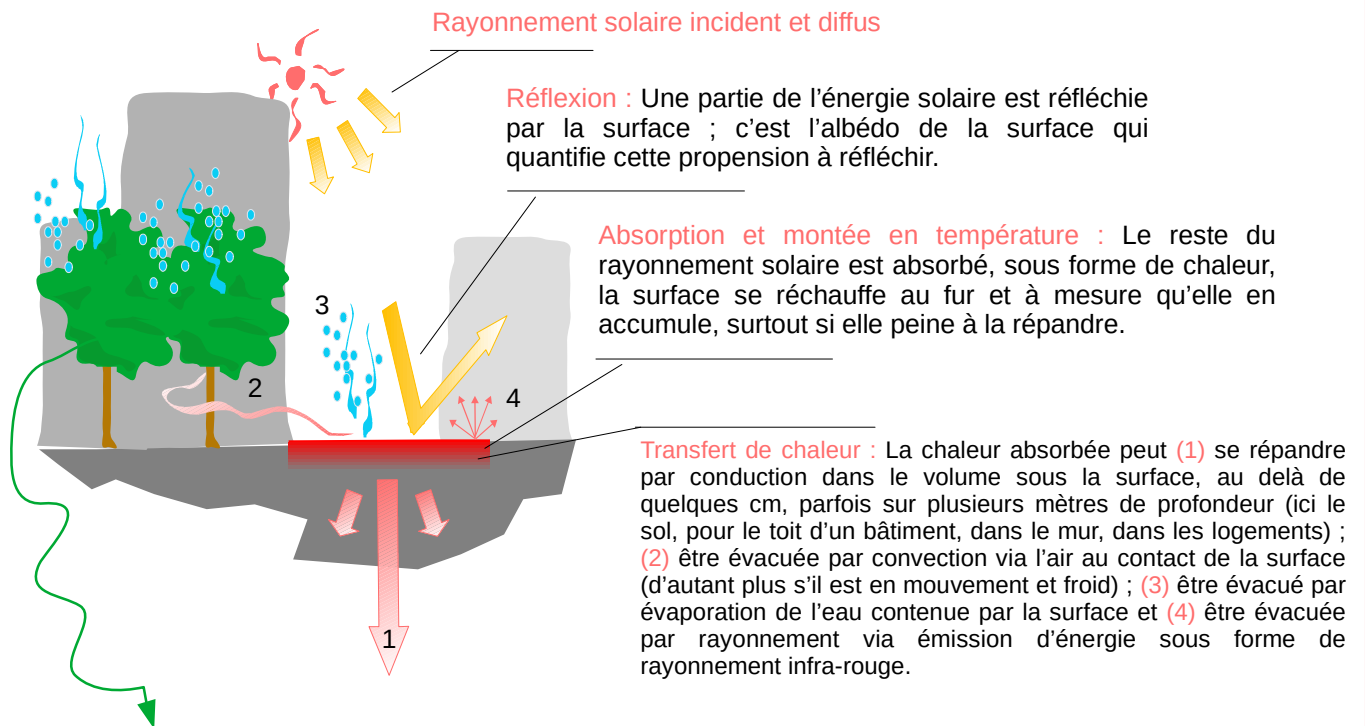


L'aménagement de l'espace public contribue à cet effet, mais il n'est pas le seul. C'est un phénomène de grande échelle, qui concerne aussi l'agencement même des quartiers, des espaces entre eux au sein de ces quartiers, la forme et la composition des bâtiments. Une action cloisonnée, limitée à l'espace public peut ainsi être vaine, voire contre-productive, si on ne prend pas en compte l'ensemble des éléments du tissu urbain dans la réflexion et l'action.

L'effet d'îlot de chaleur urbain et le stockage de la chaleur

Objectif : Comprendre l'origine du phénomène d'îlot de chaleur urbain : comment est stockée la chaleur la journée ?

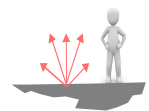
La cause de l'effet d'îlot de chaleur urbain (voir encadré précédent) est le stockage de la chaleur dans les espaces aménagés. La chaleur s'accumule, en journée, sur les surfaces du territoire, et se diffuse, se stocke dans les volumes (bâtiments, sols, air, eau). Le schéma ci-dessous présente une vision simplifiée du bilan énergétique d'une surface, quelle qu'elle soit : il permet de visualiser d'où provient en grande majorité la chaleur, et où elle se diffuse.



La végétation de l'espace public permet - au-delà de la contribution psychologique à la sensation de fraîcheur éprouvée (cf. encadré précédent) - de limiter, voire d'empêcher le stockage de la chaleur et la surchauffe de ces milieux la nuit. Elle permet d'ombrager les surfaces, par interception et réflexion d'une partie importante du rayonnement solaire. Combinée avec une ressource en eau suffisante, elle limite également la restitution de la chaleur absorbée, en la transformant et la dissipant par le phénomène d'évapo-transpiration.



Certains revêtements conduisent peu la chaleur, et s'ils sont exposés au soleil et en réfléchissent peu le rayonnement, ils accumulent la chaleur et montent en température, devenant des surfaces chaudes en journée, qui se refroidissent plus ou moins bien la nuit. A l'inverse, certains revêtements conduisent bien la chaleur et montent ainsi peu en température de jour, mais ces surfaces moins chaudes en journée deviendront les surfaces les plus chaudes la nuit, la chaleur accumulée en profondeur dans les sols étant restituée (c'est le cas du granit par exemple). Parmi les revêtements intermédiaires, comme le bitume, bon nombre conjuguent un stockage conséquent dans le sol et une montée en température journalière importante. La présence d'un sol profond sous-jacent et d'eau dans ce sol permet de prévenir ces désagréments, en favorisant la dissipation de la chaleur et le refroidissement des matériaux.



Attention, on a vite fait de penser que le réfléchissement du rayonnement solaire est la solution à privilégier. Et avec raison ! Pour limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain, oui, mais pas pour améliorer le confort thermique en journée... En effet, les surfaces très réfléchissantes peuvent participer considérablement au réchauffement de l'individu (et à son éblouissement), en augmentant la quantité de rayonnement solaire qui l'atteint : elles reproduisent, moins intensément, l'effet d'un four solaire, via les vitrages ou les parois métalliques ensoleillées par exemple. L'aménageur doit réfléchir à ce qu'il convient de privilégier selon l'espace: le confort thermique du piéton ou bien la restitution nocturne de la chaleur. Les réponses ne sont pas binaires mais peuvent être différenciées selon les espaces en fonction des circulations des piétons par exemple.



Quelles stratégies d'adaptation sont déployées par un individu ?

Objectif : Comprendre comment les individus s'adaptent à l'inconfort thermique pour concevoir un espace public adapté à la chaleur.

En conditions chaudes, une personne adopte une multitude de comportements pour s'adapter et rechercher par elle-même un meilleur confort. Sa stratégie se fonde en général sur les éléments suivants :



- **Modification de la pratique de l'activité :**
 - Recherche d'un emplacement ou d'un espace plus confortable (ombragé, ...) ;
 - Choix d'un horaire différent
 - Réduction de l'intensité de l'effort (par exemple une course à pied dans un parc, le matin, avec une allure plus lente).
- **Boisson / Transpiration :** Évaporation de l'eau à la surface de la peau pour dissiper la chaleur.
 - L'eau peut être apportée en consommant de l'eau potable.
 - L'eau peut être déposée sur la peau, en interagissant avec une masse d'eau.
- **Refroidissement ponctuel :** recherche d'une source de fraîcheur (eau fraîche, air frais ventilé).
- **Port d'une couche de vêtement adéquate :**
 - assurant la bonne ventilation de la peau, pour dissiper la chaleur et évacuer l'eau évaporée (vêtements aérés, peu épais, poreux),
 - assurant une meilleure réflexion du rayonnement solaire que la peau nue (vêtements clairs, opaques) ;

Précisions concernant la fraîcheur

Objectif : Comprendre pourquoi la fraîcheur est une qualité subjective et pourquoi il est nécessaire de l'évaluer en confrontant des données physiques et des perceptions individuelles..

Ces deux types d'évaluation présentées sont en réalité complémentaires.

(1) Physiquement, un espace peut être qualifié de frais en y étudiant en conditions chaudes la température de l'air, son humidité, le vent, la température des surfaces, etc... en somme, les paramètres représentatifs des phénomènes thermiques à différents moments de la journée. L'évaluation physique permet de caractériser objectivement la qualité thermique de l'espace à l'aide de mesures ou de calculs.

(2) Ce même espace peut être étudié en considérant la perception d'un échantillon représentatif d'utilisateurs, avec cette même variété de conditions. Le ressenti de l'individu se base sur cette qualité objective, mais il diffère selon les caractéristiques individuelles (sexe, âge, etc ...) tandis que sa perception, elle, est propre à la subjectivité de chacun (construites notamment par des expériences climatiques passées : climat du pays d'origine, etc...). C'est pourquoi l'évaluation des perceptions individuelles permet de préciser, de moduler la qualification physique.

Exemple : Objectivement, un bureau à 20° est plus confortable qu'un bureau à 29°C. Mais 2 collègues dans un même bureau à une température de 20°C, peuvent avoir "chaud" ou "froid" selon leur état de fatigue, s'ils viennent d'arriver ou non dans le bureau, leurs habitudes, la façon dont ils sont habillés, etc.

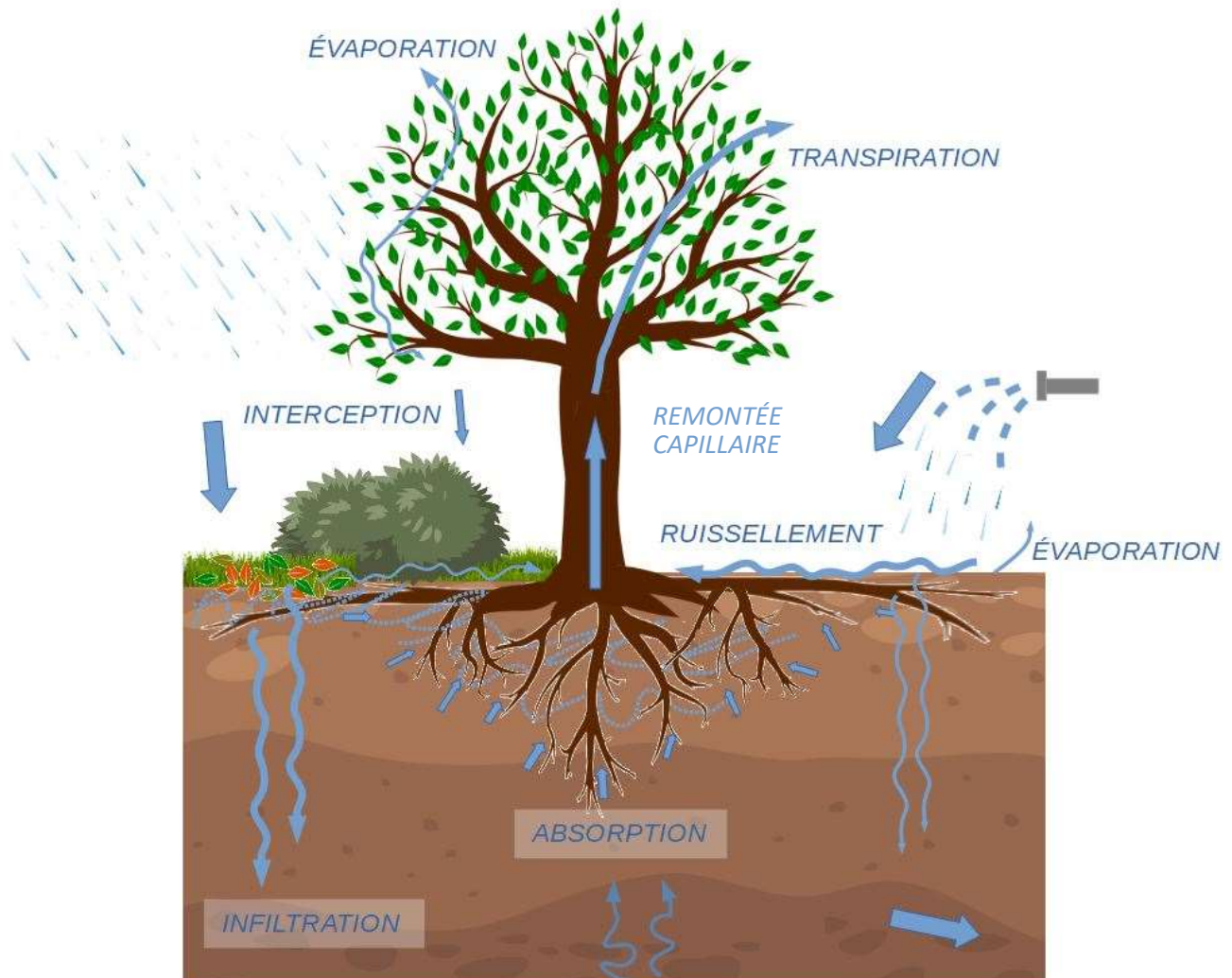
Attention ! La fraîcheur n'implique pas le confort, mais elle y contribue. Le rafraîchissement permet de limiter ou de prévenir l'apparition de l'inconfort à cause des phénomènes thermiques. Il ne résout pas la question du confort en lui-même, qui est relatif à d'autres phénomènes et d'autres caractéristiques de l'espace que la fraîcheur. Cette distinction est importante, d'une part pour ne pas oublier les autres objectifs de qualité urbaine qui y concourent, et d'autre part, pour ne pas oublier qu'un espace frais, ne sera pas plébiscité s'il n'est pas suffisamment confortable par ailleurs.

Analyse des différents bénéfiques selon les structures végétales

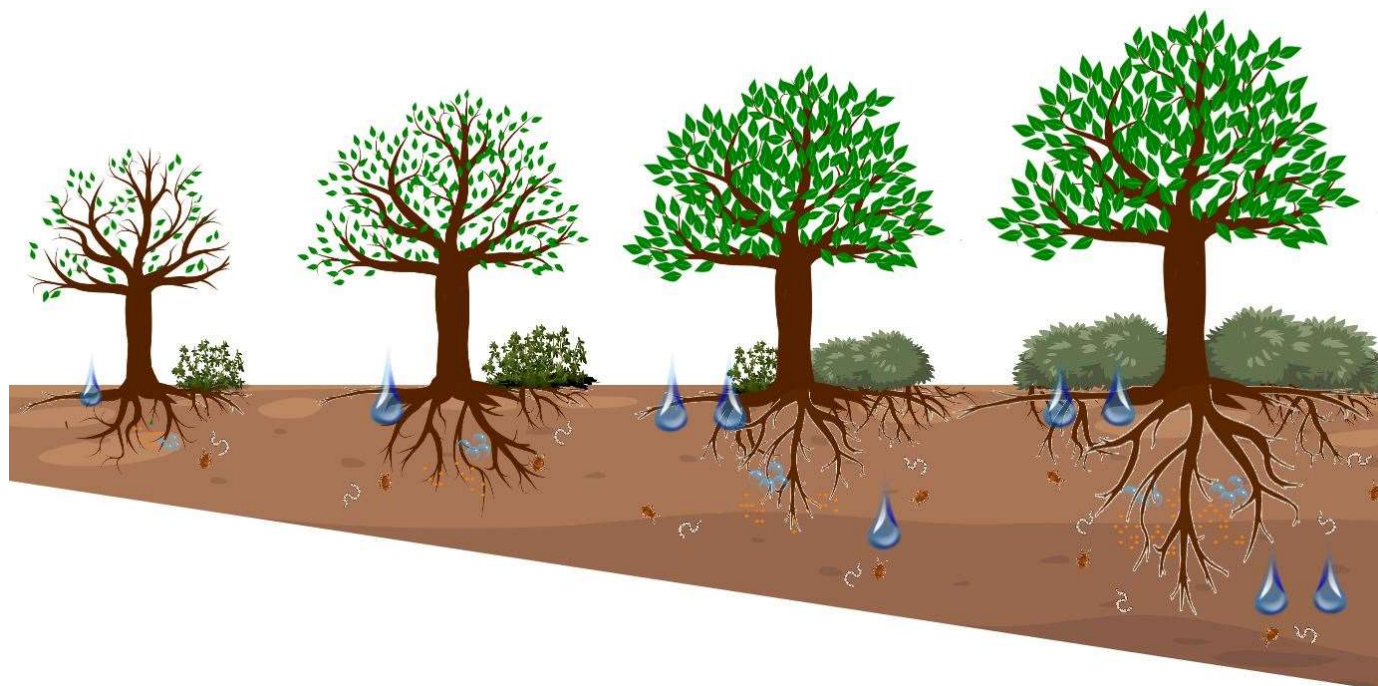
Structure végétale	Effet rafraîchissant	Impact biodiversité	Efficacité infiltration des eaux
Pelouses sèches	Très faible	Très faible	Fort
Vivaces et herbacées	Faible à moyen	Moyen, dépend composition spécifique et proximité TVB	Fort
Arbre isolé, ouverture pied d'arbre < 2m ²	Faible, renforcé si arbre adulte et de grand développement	Faible, dépend de l'espèce	Faible
Arbre isolé, pied d'arbre compris entre 2 et 9m ²	Faible	Faible	Faible à moyen
Arbre isolé dans bande pleine terre > 9m ²	Faible	Faible	Moyen
Arbre associé autres arbres et autres strates, pied d'arbres compris entre 2 et 9m ²	Moyen	Moyen, dépend composition spécifique	Faible à moyen
Arbre associé autres arbres et autres strates, dans bande pleine terre > 9m ²	Moyen	Moyen à fort, renforcé si proximité TVB	Moyen
Bande boisée	Fort	Fort, renforcé si proximité TVB	Fort
Bosquet	Très fort	Fort, renforcé si proximité TVB	Très fort

Fonctionnement des végétaux

- Les végétaux ont besoin d'eau pour assurer leur croissance. Le transfert de l'eau des racines jusqu'aux feuilles est en effet un mécanisme essentiel pour la photosynthèse et la respiration. Elle permet notamment l'apport des sels minéraux via la sève, la transformation en éléments nutritifs et l'absorption du CO₂ au niveau des feuilles grâce à l'ouverture des stomates.
- La présence de l'eau assure également la régulation des arbres et des végétaux face aux conditions climatiques auxquelles ils sont exposés. En effet, grâce à la transpiration, c'est à dire la perte d'eau à la surface des feuilles, une grande partie de l'énergie solaire accumulée est consommée, contribuant ainsi au refroidissement de la surface de feuilles. Une partie de l'eau présente à la surface du sol et du feuillage est aussi libéré directement par évaporation. La combinaison des deux phénomènes est appelée évapotranspiration.
- L'eau provient principalement des pluies (infiltration directe ou ruissellement), et de l'arrosage. Elle est stockée dans le sol, à la surface dans les horizons supérieurs ou plus en profondeur (infiltration). L'action mécanique des racines, qui joue sur la porosité du sol, et la matière organique accumulée favorisent également le stockage temporaire dans les horizons supérieurs et limitent le ruissellement. L'eau stockée en profondeur remonte également en surface par capillarité. Absorbée par les racines, la quantité d'eau réellement accessible pour les végétaux dépend des caractéristiques du sol



Les facteurs essentiels à la croissance des végétaux



La croissance et le développement des arbres et de la végétation, leur maintien en bon état physiologique, dépendent des « fertilités » présentes dans leur environnement :

- L'eau :

La réserve utile : C'est l'indicateur qui traduit la capacité d'un sol à alimenter des arbres en eau. C'est l'eau qui reste une fois que le sol est ressuyé, et accessible aux racines (l'eau située dans les pores et interstices de toute petite dimension est inaccessible car les racines n'ont pas la force suffisante pour l'extraire). La réserve utile dépend donc des caractéristiques du sol et notamment de sa porosité (quantité et organisation des « vides »).



Les apports d'eau : ils dépendent du climat (échelle du territoire : précipitations, températures moyennes, etc.), du microclimat (échelle du site : exposition, caractéristiques des revêtements, etc.), et des conditions locales d'alimentation en eau (échelle de l'arbre : arrosage, conditions en pied d'arbre)

- Le volume de sol (profondeur / quantité de sol). Le volume de sol explorable par les racines joue directement sur l'accès à l'eau et aux nutriments. Une faible épaisseur et les obstacles dans le sol peuvent réduire de façon importante les volumes prospectables : la fondation d'un mur, les sous-couche de fondations d'une chaussée, une tranchée remplie avec des matériaux compactés...

- Les ressources minérales et organiques (qualité nutritionnelle des sols). Ces ressources, transformées lors de la photosynthèse, produisent les éléments nutritifs nécessaires à la croissance des végétaux

- La présence des organismes vivants du sol (micro-organismes, vers de terre, microbes, champignons...) qui constituent le « rhizobiote », assurent la décomposition de la matière organique, et la formation des éléments nutritifs pour les végétaux (minéralisation)

- L'air : en lien direct avec le volume disponible et la porosité des sols, l'air présent dans est un facteur important pour le développement des racines (absorption d'oxygène), favorise la vie du sol.



Tous ces facteurs interviennent dans le développement de l'arbre et de la végétation. C'est le facteur le plus faible qui va déterminer et limiter le développement (selon le principe du facteur limitant), et les effets se cumulent.

En situation de ressources en eau insuffisantes (faibles précipitations, ou sécheresse), les conséquences sont d'autant plus graves que le sol présente une réserve utile faible (en raison de la faible porosité des matériaux, ou du faible volume colonisable par les racines, ou d'une répartition inefficace des racines dans le sol). La conséquence principale est l'expression du stress hydrique, qui se traduit d'abord par la mise à l'arrêt du fonctionnement des feuilles, par leur flétrissement, puis leur mort et leur chute précoce.

Le rôle rafraîchissant de la végétation

Les végétaux sont fortement dépendants de l'eau disponible et du sol dans lesquels ils se développent. En effet, la profondeur et la qualité du sol sont essentiels pour garantir le bon développement des racines, et la rétention d'eau nécessaire à la croissance des végétaux. La fertilité et la bonne structure du sol sont également une garantie pour assurer une bonne aération et une fourniture en éléments nutritifs pour les végétaux.

La qualité des sols et les apports en eau conditionnent donc les formes végétales qui peuvent se développer (herbacées, vivaces, arbustes, arbres), selon leurs besoins (plantes très exigeantes ou non en nutriments et en eau), et donc leur développement (croissance en hauteur et en largeur, volume de houppier, fleurissement, etc.). Pour les arbres, ces conditions de croissances ont un impact direct sur l'ombrage formé par le feuillage.

La présence de l'eau est également essentielle pour le processus d'évapotranspiration. En effet, lorsque les végétaux sont en stress hydrique, ils bloquent ce mécanisme de transfert d'eau pour éviter toute perte et réguler leur température. Une certaine disponibilité en eau est donc nécessaire pour garantir le maintien des végétaux dans un bon état hydrique et favoriser ce processus d'évapotranspiration.

La végétalisation permet également de conserver et d'améliorer la capacité d'infiltration en décompactant le sol grâce aux racines des végétaux et organismes du sol : les résultats en terme de croissance végétale d'un côté, et en terme d'infiltration des eaux pluviales de l'autre, sont donc interdépendants.

En conclusion, pour que les arbres et la végétation jouent leur rôle rafraîchissant, il faut qu'ils soient dans un bon état physiologique **et** bien installés dans un sol vivant, fertile et profond, que le sol dispose d'une bonne capacité de rétention d'eau et que l'eau soit effectivement disponible. L'intensité du rafraîchissement par l'ombrage et l'évapotranspiration est directement liée à la croissance de la végétation, à la dimension des arbres, à la quantité de feuilles, et à la quantité d'eau disponible (couvert végétal dense assurant un ombrage efficace, surface foliaire importante assurant l'évapotranspiration, absence de stress hydrique limitant l'évapotranspiration).

Effet combiné :

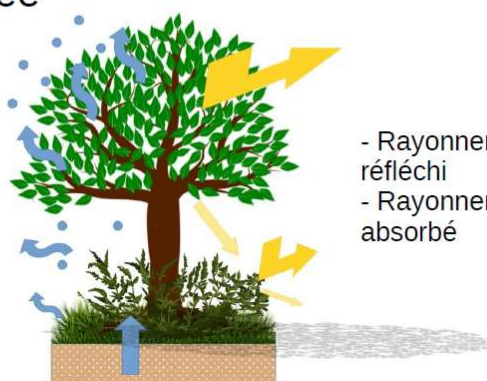
=> **ombre** et impact direct sur le confort thermique

=> énergie liée au processus d'**évapotranspiration** contribuant au rafraîchissement

=> moins de chaleur accumulée et restituée

*Arbre : 1/3 du rafraîchissement
assuré par l'évapotranspiration
2/3 par l'ombrage*

- Énergie prélevée pour prélever l'eau du sol jusqu'au feuilles
- Évaporation au niveau du sol
- Augmentation de l'humidité

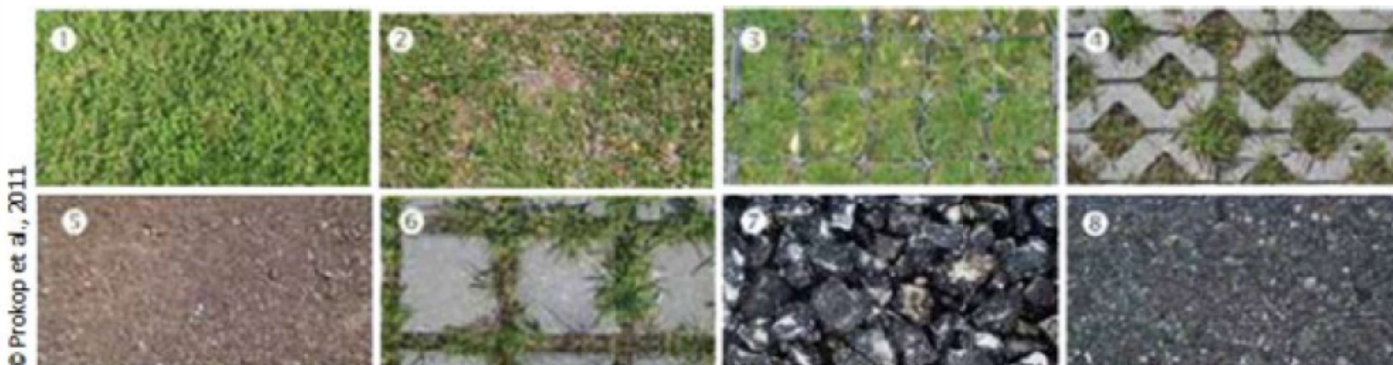


- Rayonnement réfléchi
- Rayonnement absorbé

La gestion des eaux pluviales : un atout pour le rafraîchissement

La Gestion Intégrée des Eaux Pluviales (GIEP), en bref, c'est :

1) désimperméabiliser au maximum



Exemples de matériaux perméables (hors n°8) : (1) gazon, (2) gravier-gazon, (3) dalles gazon en matière plastique ou (4) en béton, (5) revêtements en béton perméable, (6) surfaces empierrées, (7) asphalte poreux, (8) asphalte imperméable

2) infiltrer l'eau de pluie/ruissellement au maximum à la source, là où elle tombe. On cherche à infiltrer au minimum les petites pluies, ou pluies courantes, c'est à dire les précipitations qui ont lieu fréquemment (occurrence de pluie mensuelle à bi-annuelle ~ 6 à 16 mm).

3) stocker les pluies exceptionnelles (occurrence de pluie décennale, trentennale, cinquennale...) avant de les rejeter vers l'exutoire (réseau ou cours d'eau). Ces gros volumes de pluies peuvent également être infiltrés, pour partie ou totalité, en fonction du type de sols.

Concrètement, cela peut se traduire sur l'espace public par :

- d'avantage de sols naturels ou mixtes (perméables et semi perméables),
- une gestion de l'eau en surface et non plus enterrée (pas de tuyaux),
- des ouvrages d'infiltration en surface.

On cherche de préférence à ce que ces ouvrages d'infiltration soient des espaces verts, en contrebas et en creux, infiltrant : noues et fossés, fosses d'arbres et jardins de pluie, bassins paysagers multifonctionnels etc.

Pourquoi c'est important ?

La GIEP - Gestion intégrée des eaux pluviales, permet de :

- limiter les dégâts causés par les inondations
- éviter les débordements d'eaux usées dans le milieu naturel, occasionnés par la saturation des réseaux/stations d'assainissement par les eaux pluviales,
- préserver les cours d'eau à l'aval contre une altération morphologique (les a-coups hydrauliques endommagent l'écosystème)
- améliorer la qualité de l'eau de ruissellement rejetée au milieu naturel (une partie de la pollution est filtrée et biodégradée dans les sols lors de l'infiltration) (schéma ?)
- augmenter la disponibilité de l'eau dans les sols et pour les plantations en milieu urbain, si l'on arrive à combiner infiltration et végétalisation



Bordure arasée le long de la piste cyclable permettant aux écoulements de rejoindre l'espace vert

Avec l'autorisation de Bobigny (93) Est Ensemble

Bordures interrompues le long de la voirie ou des zones de stationnement permettant aux écoulements de rejoindre l'espace vert

Avec l'autorisation de Nay (64). SEPIA Conseils



Espaces végétalisés infiltrant en léger décaissé de l'espace public, avec ruissellement direct

Quartier des rives de la Haute Deûle, Lille. @Hugo Cortial

Focus sur les mares et plans d'eau

* Des aménagements au pouvoir rafraîchissant potentiel, mais pas systématique

D'après les recherches disponibles sur le sujet, il n'est pas évident qu'une surface d'eau stagnante (mare, plan d'eau) apporte un effet de rafraîchissement significatif. En revanche, et au même titre qu'un espace d'infiltration « à sec » où l'eau ne stagne pas et ne fait que s'infiltrer ponctuellement, de tels aménagements peuvent permettre l'existence d'un îlot végétalisé au bon pouvoir rafraîchissant, à condition d'être conçu pour allier biodiversité/végétalisation/gestion des eaux pluviales et d'être entretenu selon des critères bien spécifiques.

* Des systèmes à l'équilibre exigeant

Les mares urbaines sont parfois isolées de la trame verte et bleue, artificialisées, dotées d'un fond bétonné, de berges trop tondues ou trop abruptes, et d'une faune non adaptée. Cela les rend moins propices au développement naturel de la biodiversité et peut mener au développement d'espèces nuisibles et/ou invasives (moustiques, rongeurs, jussie/renommée du japon). Quelques règles de conception et de gestion doivent donc être suivies.



Un plan d'eau urbain au coeur d'un îlot de fraîcheur, mais présentant des premières traces d'eutrophisation du milieu (prolifération d'algues et lentilles d'eau)

*Quartier des rives de la Haute Deûle, Lille.
@Hugo Cortial*

* Les points d'attention pour un plan d'eau de qualité

Un plan d'eau, comparé aux dispositifs « à sec » (noues, bassins et jardins de pluie), a pour différence d'être conçu pour une présence d'eau constante. En cela, ce type d'ouvrage présente des risques importants de mauvaise qualité de l'eau et de développement de nuisibles, en particulier sur le court-terme (premières années) lorsque l'écosystème ne s'est pas encore forcément installé, et sur le long terme (10 ans et +) lorsque le système commence à s'envaser.

Pour garantir une qualité de l'eau correcte, il faudra veiller à :

ne pas collecter d'eaux de ruissellement trop chargées en pollution (fines, hydrocarbures etc) sans les avoir fait décanter ou filtrer au préalable (dans un espace vert, par exemple). Préférer les eaux de toiture aux eaux de parking ou chaussée.

rechercher une profondeur d'eau de 80 à 120 cm dans la zone la plus profonde : une telle profondeur permet d'avoir une mare moins sensible aux variations de température et d'oxygène ainsi qu'au risque de recouvrement total par la végétation. Le risque d'eutrophisation est donc moindre.

rechercher une alimentation en eau la plus continue possible pour garantir une circulation de l'eau (nappe souterraine par exemple). Vigilance sur les procédures réglementaires « loi sur l'eau » qui sont obligatoires si un prélèvement d'eau, soit dans la nappe phréatique (rubrique 1.1.2.0), soit dans un cours d'eau, plan d'eau ou canal (rubrique 1.2.1.0), est nécessaire pour remplir la mare ou l'alimenter régulièrement en eau.

rechercher l'oxygénation de l'eau via des systèmes de chute sur les arrivées d'eau, par exemple

Pour garantir l'établissement d'un écosystème équilibré :

- prévoir un fond végétalisé et non pas bétonné. Pour rechercher l'étanchéité, on pensera aux sols argileux.
- garantir des niveaux de profondeur variés (pour le développement d'un écosystème équilibré) et des berges et pourtours plutôt irréguliers
- semer/planter/ensemencer avec des espèces variées et adaptées aux différents milieux (différentes profondeurs)
- privilégier les zones de lumière plutôt que d'ombre
- prévoir des milieux refuges pour les amphibiens (prédateurs des moustiques, entre autres)
- ne pas planter d'arbres au droit même de la mare : même si la présence de ligneux est indispensable pour créer un réel îlot de fraîcheur, leur présence amène un assèchement et un engorgement plus rapide du plan d'eau
- chercher une connexion avec la trame verte et bleue (noues, fossés, végétaux) pour favoriser la circulation des espèces
- surveiller l'installation d'espèces invasives qui viennent dégrader l'écosystème
- proscrire toute introduction de poissons et d'oiseaux d'eau, qui nuisent au développement des autres espèces

*** Et les espèces nuisibles/invasives ?**

Les mares / plans d'eau, parce que la présence de l'eau y est constante, présente un risque de voir s'y reproduire des moustiques, dont la population ne sera minimisée que par un écosystème aquatique équilibré et la présence de prédateurs (amphibiens et oiseaux notamment). C'est pour cette raison, entre autres, que les dispositifs « à sec » (comme les noues, bassins et jardins de pluie) sont préférés par Nantes Métropole : ils sont conçus pour se vidanger via infiltration en 1 à 2 jours, durée qui ne permet pas aux larves de moustiques d'y faire leur croissance (> 5 jours).

Il en va de même pour les plantes invasives comme la Jussie ou la Renommée du Japon : les milieux aquatiques et humides présentent une grande susceptibilité à l'invasion, contrairement aux dispositifs « à sec » où ce type de plantes ne se retrouve pas ou rarement.

D'un point de vue de la législation sanitaire (règlement sanitaire environnemental), la création de mare est interdite à moins de 35 mètres des habitations et à moins de 50 mètres d'un point d'eau (Circ. 9 août 1978, RSD, § 92).

*** Gestion et surveillance dans le temps**

L'identification du gestionnaire et l'élaboration d'un plan de gestion des plans d'eau, en parallèle de la conception, est indispensable pour ce type d'ouvrage qui peut nécessiter un entretien et un suivi plus poussé que pour des ouvrages « à sec ».

Le suivi des espèces invasives, le débroussaillage, faucardage et le ramassage de la matière organique semblent indispensables à fréquence bi-annuelle pour éviter l'envahissement par la végétation. L'évolution naturelle d'une mare tend vers son comblement et engorgement progressif par suite de la dégradation de la matière organique. A ce stade, un curage doit être envisagé avec un principe de rotation sur 3 ans, à raison d'un tiers de la surface par an pour permettre la préservation des espèces.



Un plan d'eau urbain potentiellement îlot de fraîcheur, mais présentant des premières traces d'eutrophisation du milieu (prolifération d'algues et lentilles d'eau)

Quartier des rives de la Haute Deûle, Lille. @Hugo Cortial

Focus sur la compatibilité fertilité et portance des sols

Il existe trois solutions pour concilier ces deux fonctions attendues des sols :

- le mélange terre-pierres
- la dalle de répartition
- les caissons

Ces solutions sont à mettre en œuvre uniquement lorsque des problèmes de portance se posent (et des problèmes de piétinement), car elles limitent l'accès à l'eau et aux nutriments pour les plantations.

Le mélange terre-pierres est un substrat composé de pierres qui forment un squelette occupant l'ensemble du volume. Les pierres vont laisser des espaces vides entre elles. La proportion de vides est d'autant plus grande que la granulométrie des pierres est homogène, que les pierres sont grosses et que leur forme est ronde.

Une fois que l'on a mesuré le volume des vides, on installe la terre entre les pierres.

Le squelette de pierres assure la portance du substrat (performance obtenue : environ 40mPA).

La terre porte la fertilité.

Pour un volume de $n \text{ m}^3$ à remplir en mélange terre-pierres, il faut $n \text{ m}^3$ de pierres, et $x \%$ de terre. Ce pourcentage doit être supérieur à 30 %. Les proportions d'un mélange terre-pierres ne sont donc pas 70/30.

La fabrication d'un mélange terre-pierres est simple mais délicate. Il faut bien maîtriser le degré d'humidité de la terre et le process de mise en œuvre.

Un mélange terre-pierres est moins favorable aux arbres qu'une terre simple : les deux tiers du volume sont occupées par des pierres (moins de réserve utile, moins de nutriments). En outre, les mélanges terre-pierres sont plus filtrants que des terres simples.

Le tuteurage avec des piquets en bois n'est pas compatible avec le mélange terre-pierres ; les arbres nouvellement plantés sont maintenus avec des ancrages de motte.

La dalle de répartition est une dalle en ciment, ou en béton armé, posée comme un couvercle au-dessus de l'espace d'enracinement. Elle est soit coulée en place, soit préfabriquée et posée. Elle repose soit sur le sol en place sur les bords, soit sur des fondations (longrines ou pieux). Les dimensions de la dalle sont limitées en longueur et largeur. L'épaisseur est calculée selon la portée souhaitée.

L'attention doit être portée au positionnement (vertical) de l'arbre et de son collet par rapport à la dalle (sa face inférieure et sa face supérieure).

Les caissons sont des structures parallélépipédiques en plastique rigide. Assemblés entre eux, ils forment des volumes utilisés classiquement pour stocker les eaux de pluie, ou pour constituer des espaces d'enracinement.

Il faut disposer d'une surface de pose parfaitement plane.

C'est une solution technique efficace, mais coûteuse.



Caisson Jardiprotec

Focus sur le changement du revêtement de sol autour d'un arbre

Cela concerne les travaux de décrouitage et autres retraits d'enrobé au pied des arbres qui vont devenir fréquent avec la mise en œuvre du plan Pleine terre, et les opérations d'aménagement des cours des crèches et des écoles. Il semble nécessaire de préciser les modes opératoires à suivre.

Les travaux de terrassement, y compris les opérations de décrouitage et de retrait des enrobés (et de leur couche de fondation) sont des opérations agressives vis-à-vis des arbres. Leurs racines sont fortement susceptibles d'être touchées, blessées voire arrachées.

Ces travaux, dont le but est de favoriser la présence de la végétation autour des arbres existants, peuvent conduire, dans le pire des cas, au dépérissement et la disparition des arbres.

Principes généraux

- le maintien du niveau du sol
- le remplacement des matériaux (enrobé et couche de fondation) par de la terre végétale
- les copeaux de bois ne viennent qu'en surface, au-dessus de la terre végétale, après installation et stabilisation de celle-ci ; en d'autres termes, les copeaux ne sont pas installés parmi les racines en remplacement des matériaux en place.
- la rapidité d'exécution pour ne jamais laisser les racines à l'air libre, sans la protection d'un sol, au risque sinon de leur mortalité par gel ou dessèchement (selon la période des travaux). Ce phénomène de mortalité peut être extrêmement rapide.

Mode opératoire

- 1/ Ne pas venir travailler trop proche des arbres, la profondeur de décrouitage est à 0 au collet de l'arbre, puis décroît progressivement à partir de 2m du bord du tronc ; la profondeur optimale étant atteinte au-delà de la zone racinaire très sensible, mais pas avant.
- 2/ Ne jamais gratter avec l'embout métallique de l'aspiratrice sous peine d'infliger des dommages aux racines. L'excavation de la terre (ou des matériaux de la couche de forme sous l'enrobé) se fait exclusivement avec la lance à air (ou la pioche à air) dont sont équipées tous les camions aspiratrices.
- 3/ Anticiper et prévoir présence de terre végétale, fine, bien sèche, pour pouvoir être installée parmi les racines sans créer de vides.
- 4/ Phaser le travail pour installer la terre très rapidement avec la mise à nu des racines et des radicelles (moins de 30 minutes en temps normal et immédiatement en cas de forte chaleur)
- 5/ Le plombage se fait à l'eau pour que la terre se cale bien entre les racines et se tasse naturellement. Plombage en plusieurs fois si nécessaire.

Réglementation relative à l'installation et la maintenance des brumisateurs

Textes réglementaires :

- La **circulaire DGS n°DGS/EA4/2010/448 du 21 décembre 2010** relative aux missions des Agences régionales de santé dans la mise en œuvre de l'arrêté du 1^{er} février 2010 relatif à la surveillance des légionelles dans les installations de production, de stockage et de distribution d'eau chaude sanitaire
- L'**avis ANSES du 22 septembre 2016** portant sur un projet de décret et un projet d'arrêté relatifs à la prévention des risques sanitaires liés aux systèmes collectifs de brumisation d'eau
- L'**arrêté du 7 août 2017** relatif aux règles techniques et procédurales visant à la sécurité sanitaire des systèmes collectifs de brumisation d'eau, pris en application de l'article R. 1335-20 du code de la santé publique, publié au journal officiel du 17 août 2017
- Le **Guide Pratique du Ministère de la Santé publié en janvier 2018** portant sur la prévention de la légionellose : obligations et bonnes pratiques à mettre en œuvre dans les systèmes collectifs de brumisation d'eau
- L'**avis HCSP du 20 mai 2020** relatif à l'utilisation des systèmes collectifs de brumisation dans le cadre de la période de déconfinement lié à la pandémie Covid-19

Synthèses des points réglementaires :

Depuis le 1^{er} janvier 2018, les systèmes collectifs de brumisation d'eau :

- doivent être équipés :

- d'un ensemble de protection accessible et contrôlable, visant à empêcher les retours d'eau du système collectif de brumisation d'eau vers le réseau de distribution
- d'au moins une vanne permettant la purge et la vidange du système
- si présence d'un réservoir de stockage d'eau : ce réservoir doit être couvert, à accès restreint, placé à l'intérieur d'un bâtiment et l'eau doit provenir directement du réseau de distribution d'eau

Toutes les précautions doivent être prises pour limiter la stagnation de l'eau dans le système, la présence de dépôt ou de tartre ainsi que l'exposition du système à des sources de chaleur dont le rayonnement solaire

- maintien de la température de l'eau alimentant le système à une température inférieure à 25°C

- interdiction de recyclage des gouttelettes d'eau non brumisées

- obligation de purge du système sans exposition du public :

- en cas d'arrêt et avant toute nouvelle utilisation (= chaque jour où le système est mis en fonctionnement)

- obligation de vidange du système sans exposition du public :

- avant un arrêt prolongé de plus de six semaines consécutives

- obligation d'entretien et de nettoyage, désinfection et rinçage suffisant du système permettant

d'éliminer toute trace des produits de nettoyage et de désinfection utilisés :

- a minima une fois par an et sans exposition du public
- avant toute nouvelle utilisation après un arrêt prolongé de plus de six semaines consécutives

- surveillance de la qualité de l'eau alimentant le système à une fréquence adaptée aux risques qu'il

peut présenter, a minima :

- prélèvement d'échantillons d'eau et analyse des paramètres faisant l'objet d'une limite et d'une référence de qualité définies aux articles R. 1321-2 et R. 1321-3 du code de la santé publique et fixées à l'annexe I de l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité, avant la première utilisation de l'eau pour alimenter le système puis une fois tous les 5 ans
- prélèvement d'échantillons d'eau et analyse de type P1 telle que précisée dans l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif au programme de prélèvements et d'analyse du contrôle sanitaire, une fois par an

- recherche et dénombrement de *Legionella pneumophila* à une fréquence bisannuelle par un laboratoire accrédité, la recherche devant être réalisée au minimum 14 jours après toute opération de nettoyage, désinfection et rinçage

Le réservoir de stockage d'eau équipant le système collectif de brumisation d'eau doit faire l'objet :

- a minima d'une vidange quotidienne, de façon à ce que sa durée de stockage dans le réservoir n'excède pas 18 heures
- d'une vérification, d'un entretien et d'une désinfection à prévoir systématiquement après toute opération susceptible de le contaminer, et a minima, à une fréquence hebdomadaire
- d'une opération d'entretien avant toute nouvelle utilisation ou en cas de non-utilisation pendant une période supérieure à 24h, comprenant notamment une vidange, un nettoyage ainsi qu'un rinçage du réservoir

Suivi de la traçabilité de l'ensemble des opérations effectuées sur le système par la consignation d'un fichier sanitaire tenu à disposition des autorités sanitaires, incluant :

- le schéma de principe de l'installation
- les informations relatives à l'exploitation du système
- les modalités et résultats de la surveillance de la qualité de l'eau.

Recommandations :

*Il est préférable de munir les systèmes de brumisation de **boutons poussoir** pour favoriser un rafraîchissement à la demande, ou bien de programmeurs permettant de brumiser par intermittence, tout en s'adaptant aux conditions météorologiques.

*Il est recommandé d'installer le **brumisateur à l'ombre, sur un espace végétalisé ou à proximité directe** pour maximiser son efficacité (avec l'infiltration sur un espace de pleine terre et l'apport en eau pour les végétaux) et faciliter l'acceptation sociétale.

BIBLIOGRAPHIE

-Guide de gestion des eaux pluviales de Nantes métropole :

Volet 1 & 2 :

https://metropole.nantes.fr/files/pdf/eau-assainissement/eaux-pluviales/21-07-05_Guide_Amenagement_V12.pdf

Volet 3 :

https://metropole.nantes.fr/files/pdf/eau-assainissement/eaux-pluviales/22-09-06_Fiches_etude_cas_v5.pdf

Volet 4 :

https://metropole.nantes.fr/files/pdf/eau-assainissement/eaux-pluviales/22-09-07_Fiches_volet4_V2.pdf

-ADOPTA : fiches techniques (cf « noues d'infiltration ») : <https://adopta.fr/fiches-techniques/>

-ADOPTA : études de cas (cf « embellir la ville grâce aux eaux pluviales ») : <https://adopta.fr/fiches-de-cas/>

-GRAIE : note sur les risques réels et avantages de la gestion intégrée des eaux pluviales (moustiques, nuisances, pollution, etc) :

<https://asso.graie.org/portail/techniques-alternatives-gestion-eaux-pluviales-risques-reels-avantages-2/>

-BRGM espace cartographique pour données hydrogéologiques (profondeur de nappe, sensibilité aux remontées de nappe) : <https://sigesar.brgm.fr/?page=carto>

-Cartographies interactives (sites et sols pollués, remontées de nappe, inondations) :

<http://infoterre.brgm.fr/viewer/>

<https://www.georisques.gouv.fr/cartes-interactives#/>

-Plante et Cité - « Aménagement et choix des végétaux des ouvrages de gestion des eaux pluviales de proximité » - 2014

-Mesurer les arbres (CAUE77) :

<https://www.arbrecaue77.fr/mesurer-les-arbres>

- Arbres en milieu urbain : guide de mise en oeuvre, TTAG, 2016, 2018 pour la version française, traduction et adaptation par Val'Hor, 168 pages

- Prendre soin des arbres en ville, Plante et cité, 2022

https://www.plante-et-cite.fr/ressource/fiche/698/prendre_soin_des_arbres_en_ville_pour_une_approche_transversale_n8

- Les bienfaits du végétal en ville, étude des travaux scientifiques et méthode d'analyse, Plante et cité, 2014

https://www.plante-et-cite.fr/ressource/fiche/95/beneveg_les_bienfaits_du_vegetal_en_ville_rapport_et_publication_n:24

- Les rôles de l'arbre dans l'espace public, Nantes Métropole, 2018, révisé 2023, Direction de l'Espace public

- « Matériaux perméables Stationnements –Cahier de réalisations », Nantes métropole

-Guide Bâtiment Durable "arbre de pluie"

<https://www.guidebatimentdurable.brussels/arbres-pluie>

-Règlement et cartographie du zonage pluvial de Nantes Métropole

<https://metropole.nantes.fr/eaux-pluviales>

Livret technique arbre de pluie Grand Lyon

https://www.ofb.gouv.fr/sites/default/files/2022-12/livret_arbre_de_pluie_web.pdf

Répertoire de dispositifs de rafraîchissement

<https://www.coolscales.net/>

« Plus fraîche ma ville » : outil d'aide à la décision pour choisir des solutions de rafraîchissement urbain pérennes et durables (ADEME) :

<https://plusfraichemaville.fr/>