

Préservation et valorisation de la ressource en eau brute

Une gestion parisienne des eaux pluviales

SEPTEMBRE 2015



Directrice de la publication : Dominique Alba
Directeur d'étude : Christiane Blancot
Chef de projet : Frédéric Bertrand
Étude réalisée par : Mélanie Guilbaud et Willem Joubert
Expert extérieur : Agence Thierry Maytraud (ATM)
Cartographie et dessins : Marie-Thérèse Besse, Jean-Christophe Bonijol, Nathan Emery, Bernadette Eychenne,
Pachanon Phalajivin, Stéphane Ribes
Recherche documentaire : Maud Charasson, Muriel Rouzé et Serida Zaïd
Maquette : Apur
Photos et dessins : Apur sauf mention contraire
www.apur.org

Sommaire

Introduction	5
--------------------	---

I- L'EAU PLUVIALE ET LA VILLE 7

1- L'EAU ET LE SOUS-SOL	9
La nature du sol : un élément déterminant pour infiltrer les eaux pluviales	9
Les eaux profondes : stabilisation d'un état artificiel	11
Les infrastructures souterraines	12
Préconisations	13
2- L'EAU ET LE SOL	15
La ville étanche, un héritage?	15
Paris, ville perméable?	16
L'expérience des sols poreux à Paris	17
Préconisations	18
3- L'EAU ET LE VÉGÉTAL	25
L'eau, élément vital pour les végétaux	25
L'imperméabilisation des sols, l'ennemi des arbres en ville	26
Pratiques d'arrosage	27
Trop d'eau, trop de pollution?	28
Préconisations	29
4- L'EAU ET LE BÂTI	31
Le cycle de l'eau à l'échelle du bâti. Situation courante et désordres au XIX ^e siècle	31
Le cycle de l'eau à l'échelle du bâti. Situation courante et désordres de la fin du XIX ^e siècle à nos jours	32
Préconisations	34

II- UNE GESTION PRATIQUE DE L'EAU PLUVIALE 35

1- DES QUARTIERS : ÉTUDE DE CAS	37
Secteur République	39
Secteur Saint-Georges	47
Secteur Bagnole	51
Secteur Censier	59
Parcelle type	67
2- L'ESPACE PUBLIC	73
Matériaux poreux	73
Dispositifs linéaires ou discontinus	79
Autres dispositifs possibles	88
3- L'ESPACE PRIVÉ	89
Toits végétalisés, jardins sur dalle	89
Jardinières de pied d'immeubles	91
Sols perméables en cœur d'îlot	93
Puits d'infiltration	95
Récupération dans une cuve de stockage	96
L'exemple des sanitaires	96
Alimentation des réservoirs de chasse	99
Conclusion	103

III- ANNEXES 105

Méthode de calcul de l'abattement	107
Classification de types de voies à Paris	110
Détails des calculs d'abattements sur les profils de voiries	112
Bibliographie	117

Introduction

Cette étude s'intéresse aux possibilités de gestion des eaux pluviales à Paris. Elle approfondit les enjeux liés à la gestion des eaux pluviales et à ses conséquences sur le cycle de l'assainissement à l'échelle métropolitaine traités en 2014.

Réalisée dans le cadre du programme partenarial de l'Apur 2014 et 2015 en lien avec la DPE, cette étude a fait l'objet de plusieurs réunions et entretiens avec les services de la Ville et notamment, la Direction de l'Urbanisme, la Direction de la Voirie et des Déplacements, la Direction des Espaces Verts, la Direction de l'Habitat. L'avis de praticiens et chercheurs a également été sollicité pour les questions liées au sous-sol et à son histoire, ainsi qu'au végétal. Les performances techniques et hydrauliques des dispositifs retenus ont été évaluées par l'Agence Thierry Maytraud (ATM), spécialisée en hydrologie urbaine et particulièrement dans la mise en œuvre de techniques dites alternatives de gestion des eaux pluviales.

L'objectif est d'approfondir les possibilités offertes par le projet de zonage pluvial (ou Plan Pluie à Paris) élaboré par les services de la Direction de la Propreté et de l'Eau (DPE). Ce projet a fait l'objet de nombreuses études techniques préalables et d'une concertation importante avec les services de la Ville de Paris concernés, avant et après l'approbation du bilan environnemental par les services de la préfecture. Les prescriptions de ce document réglementaire, non encore adopté, sont d'ores et déjà anticipées et négociées au cas par cas, pour les bâtiments neufs, les réhabilitations lourdes, les travaux d'espaces publics supérieurs à 1 000 m² et les opérations d'aménagement.

La part de renouvellement urbain à Paris étant réduite, il a été décidé, en concertation avec la DPE, d'examiner le potentiel de gestion des eaux pluviales dans le tissu urbain existant. Il s'agit à la fois de tester la capacité de la ville existante à intégrer l'eau de pluie, de tenter d'apporter des éléments de réponse aux inquiétudes souvent formulées lorsqu'il s'agit de gérer autrement cette eau dans la ville et d'évaluer les bénéfices environnementaux, urbains et économiques de cette nouvelle gestion.

Cette approche est déclinée en deux grandes parties. La première est une lecture thématique des liens entre l'eau de pluie et la ville. Elle aborde les grands objectifs et enjeux liés au sous-sol, au sol, au végétal et au bâti. Pour chaque thème des préconisations résumées et illustrent les actions possibles en matière de gestion de l'eau de pluie. La seconde partie examine la transformation diffuse de l'existant à partir de cas représentatifs des tissus urbains parisiens (faubourgs denses, HBM, grand ensemble sur dalle) et à l'échelle d'une parcelle type. Cette approche par scénarios vise à réduire au maximum les rejets d'eau pluviale au réseau d'assainissement. Les dispositifs appliqués à ces exemples et susceptibles d'être mis en œuvre plus largement dans les espaces publics et les espaces privés à Paris sont ensuite étudiés sous forme de fiches techniques détaillées.

Il ressort des simulations effectuées qu'il est possible d'atteindre des objectifs ambitieux de réduction des rejets d'eau de pluie au réseau d'assainissement en agissant de manière diffuse sur le tissu existant et en diversifiant les techniques. Même en n'envisageant aucun abattement des eaux des chaussées (hypothèse retenue ici a priori, mais qui pourrait être reconsidérée), il est possible de satisfaire aux objectifs du Plan Pluie à Paris sans engager de travaux trop importants nécessitant le recours aux permis de construire :

- En ce qui concerne les tissus urbains, certains s'avèrent plus efficaces (le tissu ouvert des HBM et des grands ensembles, respectivement 80 % et 70 % de la pluie de 16 mm et de la pluie annuelle ne rejoignent pas le réseau d'assainissement) mais tous ont un potentiel (les secteurs de faubourgs - République et Saint-Georges - peuvent atteindre un abattement de 50 % d'une pluie de 16 mm et de 80 % d'une pluie annuelle).
- Pour ce qui est des revêtements de surface, certains dispositifs s'avèrent très performants en termes d'abattement, c'est le cas notamment des matériaux drainants (enrobés, bétons, résines...). Toutefois, ces techniques ne sont pas toujours optimales dans la lutte contre les effets d'îlots de chaleur urbains, le développement du réemploi et le renforcement de la biodiversité... En fait, la combinaison des dispositifs techniques, leur adaptation selon les contextes s'avèrent être des critères de choix déterminants. À titre d'exemple, les pavés ou dalles non jointées abattent moins de pluie mais s'avèrent intéressants d'un point de vue environnemental plus large (réemploi, biodiversité...). Associés à un renforcement de la végétation, ils peuvent aussi mieux satisfaire aux objectifs du Plan Pluie tout en répondant à une volonté politique et à un cadre réglementaire (art. 13 du PLU) forts.
- Enfin, ces simulations offrent une vision nouvelle du recyclage de l'eau de pluie, notamment pour les sanitaires. Elles prouvent que ce dispositif est très efficace pour abattre la pluie et qu'il est particulièrement adapté à un contexte urbain dense comme celui de Paris. De nombreux usagers potentiels, des petits bassins-versants (surfaces de toitures réduites) et des petites cuves sont les trois clés de la performance et de la souplesse de ce système.

I- L'EAU PLUVIALE ET LA VILLE

Le milieu urbain peut conduire à envisager des cycles plus hybrides associant un héritage technique (les égouts et leurs réservoirs de chasse, les puits, les cuves de stockages...) à un cycle plus naturel réduisant l'imperméabilité des sols et renforçant la place de la végétation en ville.

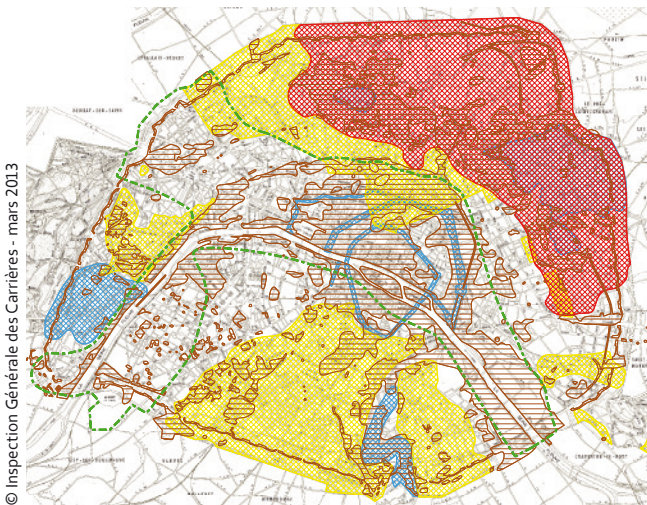
Un des exemples est la mise en œuvre d'une gestion des eaux pluviales alternative au « tout tuyau » qui impose de redonner une place à l'eau dans un cycle urbain court et permet de repenser le « petit cycle de l'eau ». Ce petit cycle, couramment associé au système hydraulique classique du tuyau et de la station d'épuration, est généralement opposé au « grand cycle de l'eau », cycle naturel de l'infiltration, de la recharge de nappes, de l'évaporation et de l'évapotranspiration.

Cette approche permet d'examiner les éléments fondamentaux de la ville existante qui ont un rôle essentiel à jouer à la fois individuellement et dans des formes multiples d'associations : le sous-sol, le sol, le végétal et le bâti. Si ces éléments ont un potentiel d'évolution important au regard d'une autre gestion de l'eau, ils concentrent aussi un certain nombre de craintes ou de réserves issues des acteurs en charge de leur gestion et de leur transformation.

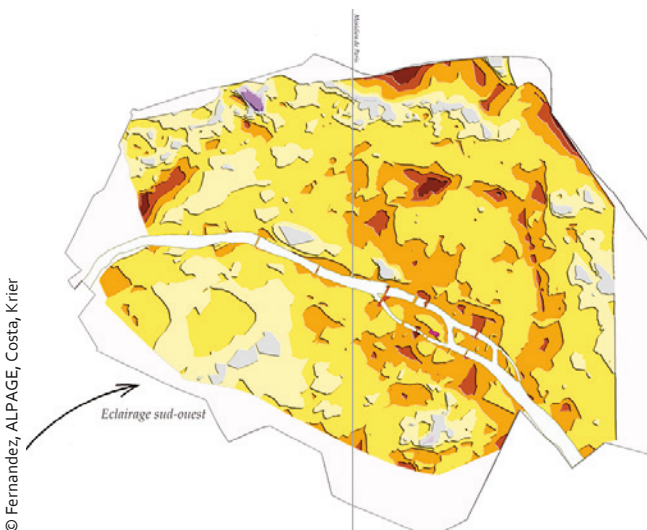
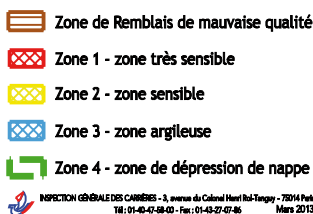
Ce chapitre dresse un état des lieux de ces enjeux et propose des évolutions possibles. Il s'agit à la fois de dépasser le cloisonnement des approches, de rendre compte de nouvelles manières de faire en France et à l'étranger et, à travers des propositions de projets d'inciter à davantage d'expérimentations susceptibles d'être portées séparément ou collectivement par différents services de la Ville de Paris (DEVE, DLH, DPE, DU, DVD, DPA, DJS, DASCO...).

Les différents thèmes abordés ici confirment que les bénéfices d'une autre gestion de l'eau de pluie en ville ne se limitent pas au seul cycle de l'eau, mais ont aussi des répercussions économiques (réduction des réseaux, des volumes d'eau potable consommés, réemploi de matériaux...), sociales (partage des usages dans les espaces publics et privés, sensibilisation à la gestion de l'eau et à sa visibilité dans la ville...), environnementales (lutte contre les phénomènes d'îlot de chaleur urbain, renforcement de la biodiversité...) plus importantes.

1- L'EAU ET LE SOUS-SOL



Zones possibles d'infiltration des eaux pluviales à Paris



L'exhaussement du sol à Paris des origines à 2012

Source : Mathieu Fernandez, *Approche topographique historique du sous-sol parisien : 1800-2000. La ville épaisse*, Thèse, Conservatoire national des arts et métiers, Paris, 2014



L'un des objectifs majeurs du futur zonage pluvial à Paris est de gérer l'eau de pluie au plus près de son point de chute. L'infiltration diffuse ou concentrée est alors l'une des premières techniques pour gérer ces eaux.

De nombreux paramètres doivent être pris en compte pour concevoir des ouvrages permettant d'infiltrer (nature du sol, présence de nappe, de réseaux...). Cette fiche vise à faire un état des grandes doctrines le plus souvent avancées à Paris. Cela étant, bien que les champs d'investigations soient larges, les recherches sur l'hydrologie urbaine à Paris restent encore peu nombreuses ⁽¹⁾ et seules des études fines sur le terrain permettent le plus souvent d'apporter des réponses tangibles.

La nature du sol : un élément déterminant pour infiltrer les eaux pluviales

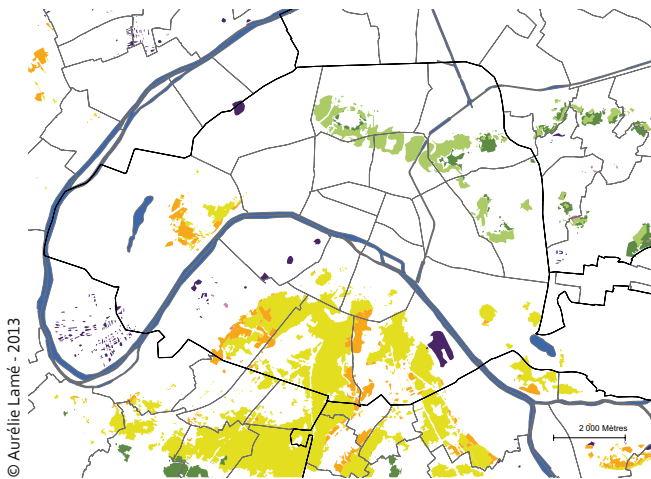
À Paris, les remblais, les carrières, le gypse et l'argile sont les principaux paramètres pris en compte par l'Inspection générale des carrières (IGC) pour déterminer les conditions d'infiltration des eaux pluviales dans le sol.

Les remblais

La première couche du sous-sol parisien est presque entièrement constituée de remblais très hétérogènes ⁽²⁾. La carte de cette couche dans le centre de Paris, des origines à nos jours, donne à voir précisément l'exhaussement de la ville et rend ainsi compte de son importance. À certains endroits, son épaisseur peut atteindre jusqu'à 25 mètres (la butte Montmartre). Cette couche est tellement hétérogène, qu'une expertise sur la possibilité d'infiltrer ou non n'est pas toujours aisée. Par ailleurs, les remblais sont aussi propices à des circulations d'eau qui sont, aujourd'hui encore, mal connues. Dans le cadre du zonage pluvial, l'IGC préconise de ne pas infiltrer dans les remblais « dits » de mauvaise qualité dont l'épaisseur est supérieure à 3 mètres. La présence importante de remblais dans Paris n'a pourtant pas empêché que la ville perméable puisse se développer sur cette couche depuis plusieurs siècles (parcs et jardins, berges de Seine, faisceaux ferrés...). La possibilité d'une infiltration maîtrisée reste donc un potentiel à explorer et à associer à une connaissance plus fine de ce sol.

(1) Cette fiche est fortement inspirée des thèses récentes sur le sous-sol parisien d'Aurélié Lamé et de Mathieu Fernandez. Travaux novateurs puisqu'ils ont tous deux utilisé les outils SIG pour modéliser ou représenter le sol et le sous-sol parisien.

(2) « Ils sont bien souvent de natures diverses (blocs de bétons, graviers, galets, calcaire, sables, marnes, briques, limons, plâtre, mâchefer, morceaux de fer, gypse, maçonneries, mortiers de chaux, bois, tuiles, vase, débris charbonneux, silice, détritiques ou « Poubellien » aux abords des premières enceintes de la ville notamment sous la butte Bonne Nouvelle...) et possèdent une épaisseur variable ». Aurélié LAMÉ, in *Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains*, Thèse, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 2013, p.42.



© Aurélie Lamé - 2013

Cartographie des carrières parisiennes

Source : Aurélie LAMÉ, *Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains*, Thèse, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 2013

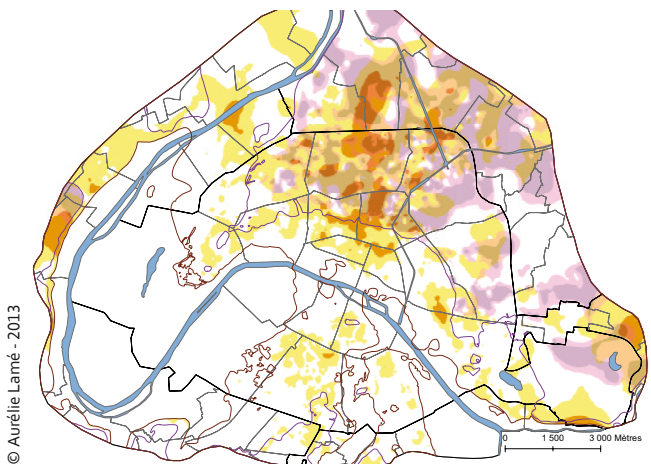
- Gypse ciel ouvert
- Gypse souterrain
- Glaisières
- Sablières
- Calcaire ciel ouvert
- Calcaire souterrain



© Solétanche-Bachy

Frontis dans le gypse antéludien sous la gare du Nord, Paris 10e

Source : Aurélie LAMÉ, *Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains*, Thèse, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 2013



© Aurélie Lamé - 2013

Carte de l'épaisseur des bancs gypseux dans les Marnes et Caillasses et dans le Calcaire de Saint-Ouen associée aux zones de dissolutions du gypse antéludien

Source : Aurélie LAMÉ, *Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains*, Thèse, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 2013

Les carrières

Sous le remblai, de nombreuses couches géologiques coexistent. Le sous-sol parisien est exploité depuis le moyen âge pour extraire le calcaire et le gypse nécessaires aux constructions. De nombreux effondrements et des conclusions alarmantes sur l'état du sous-sol parisien ont conduit à la création de l'IGC en 1777. Aujourd'hui bien connues, ces carrières font l'objet de suivis réguliers. De nombreux experts considèrent que ce sont les carrières à ciel ouvert qui sont les plus sensibles à l'infiltration d'eau pluviale.

Le gypse et les argiles

Il s'agit de couches géologiques qui imposent des mesures de précaution au regard de la présence d'eau.

Plusieurs facteurs peuvent amener le gypse à se diluer :

- Modification du niveau des nappes
- Inversion du sens d'écoulement des nappes
- Augmentation de la température de l'eau
- Rupture de la saturation de la nappe en sels minéraux.

Il peut alors s'en suivre la formation d'une cavité qui peut conduire à un affaissement lent ou même à un effondrement brutal.

Aujourd'hui à Paris, le **gypse ludien** est en grande partie hors d'eau. Ainsi, les fontis qui l'affectent ne résultent pas du comportement actuel des nappes, mais de l'existence d'anciennes carrières dont le ciel a évolué, ou de circulations gravitaires d'eau d'infiltration à la faveur de réseaux de fractures.

La dissolution du **gypse antéludien** peut être ancienne, mais il existe des dissolutions récentes qui peuvent s'observer à l'échelle humaine.

Les quantités et les formes sous lesquelles le gypse se présente sont nombreuses. Plus l'épaisseur de gypse est importante plus les risques de dissolution sont probables, les zones cernées de marrons et de violet (voir carte) doivent donc être étudiées au cas par cas.

Enfin, infiltrer des eaux ou empêcher l'infiltration sur des sols argileux peut provoquer des phénomènes de gonflement ou de retrait. La présence d'eau dans les sols argileux peut dans certains cas être recherchée et préférée à un risque d'assèchement susceptible d'exposer à des désordres importants (déstabilisation d'ouvrages).

Calcaire de Saint-Ouen

- épaisseur de gypse d'env. 0,5 m
- épaisseur de gypse pouvant être sup. à 6 m

Marnes et Caillasses

- épaisseur de gypse comprise entre 0,5 m et 4 m
- épaisseur de gypse comprise entre 4 m et 15 m
- Limite des Marnes et Caillasses
- Limite du Calcaire de Saint-Ouen

Les eaux profondes : stabilisation d'un état artificiel

Depuis près de deux siècles, le niveau des nappes sous Paris a très fortement évolué. « Les hydrogéologues ont pris comme repère la carte d'Achille Delesse réalisée en 1862 pour déterminer le niveau naturel des nappes sous Paris. À cette époque, les échanges entre le fleuve et les nappes se font naturellement avec une nappe des alluvions qui vient alimenter la Seine ⁽³⁾ ». En 1969, le géologue Philippe Diffre réalise une nouvelle carte qui rend compte de modifications majeures. Une zone de forte dépression apparaît sur la rive droite principalement due à de nombreux pompages liés à la présence d'industriels et aux importants chantiers (RER, métro, parkings souterrains...). Aujourd'hui, c'est désormais la Seine qui alimente la nappe, son niveau ayant baissé dans certains secteurs de près de 16 m. Dans les années 80, le départ des grands industriels et l'arrêt de grands travaux conduisent à une remontée générale des nappes qui se traduit par l'inondation de caves et de parkings. Des pompages sont alors systématiquement mis en place stabilisant la nappe phréatique à un niveau plus bas. Dans les années 90, deux grands chantiers (Météor et Eole) provoquent d'importants rabattements (jusqu'à 15 mètres sous la gare Saint-Lazare). Aujourd'hui, les experts considèrent que la nappe est à peu près stabilisée.

Actuellement, le niveau de la nappe phréatique à Paris est bas : entre 10 et 15 mètres en moyenne et plus de 35 mètres de profondeur à certains endroits. Mais, les fines couches imperméables discontinues dans le sous-sol expliquent la formation de nappes perchées. Elles sont localisées sur la carte mais leur profondeur n'est pas renseignée. Ces eaux peuvent provoquer des dégradations importantes sur le bâti, comme c'est le cas à Montmartre par exemple.

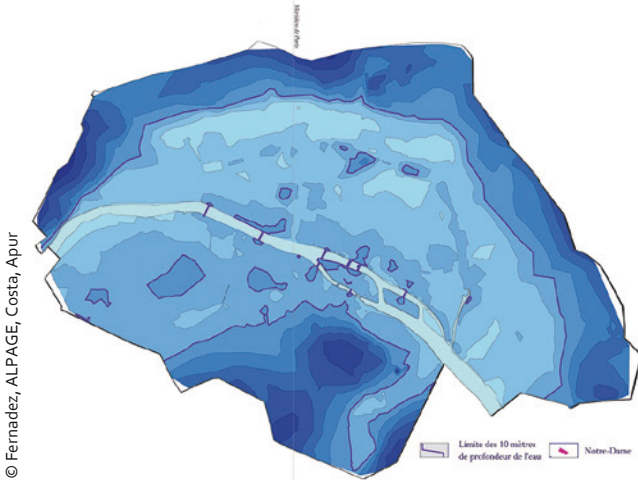
La présence de l'eau, devenue rare dans le sous-sol parisien, ne contribue pas à la réduction du stress hydrique des arbres adultes, mais peut faciliter l'infiltration. En effet, il est couramment recommandé de ne pas infiltrer dans un sol saturé en eau à moins d'un mètre ⁽⁴⁾.

En près d'un siècle, les hauteurs de nappes ont considérablement évolué pour se stabiliser aujourd'hui. Les volumes en mouvement liés aux pompages temporaires ont été considérables. Ceux liés aux pompages permanents le sont encore. Ces situations n'ont pas empêché d'engager des transformations importantes du territoire parisien, même si ces transformations ont été marquées par des événements souvent traumatisants (fontis monumental lié à l'exploitation de la nappe sous la gare du Nord... par exemple).

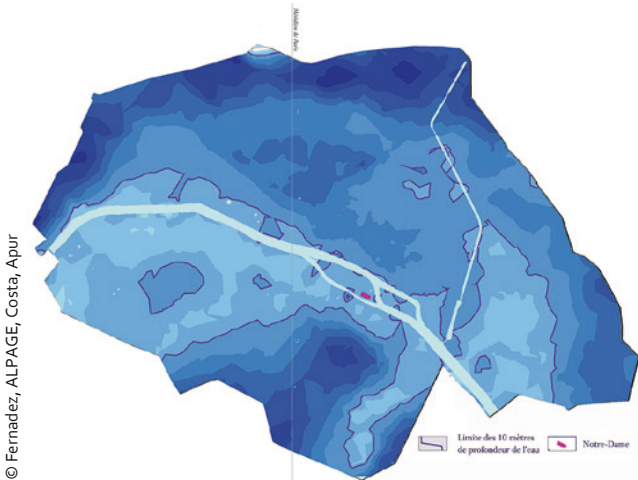
Les échelles en jeu avec le zonage pluvial sont difficilement comparables. Elles concernent la gestion de volumes de pluie moins importants et majoritairement gérés par des infiltrations diffuses ou à des niveaux de concentration pour des bassins-versants de surfaces limitées. Ces volumes sont moins susceptibles de modifier les niveaux piézométriques et surtout les sens et vitesses d'écoulement des eaux souterraines, donc par exemple influencer fortement sur la dissolution du gypse.

(3) Aurélie Lamé, *op. Cit.*

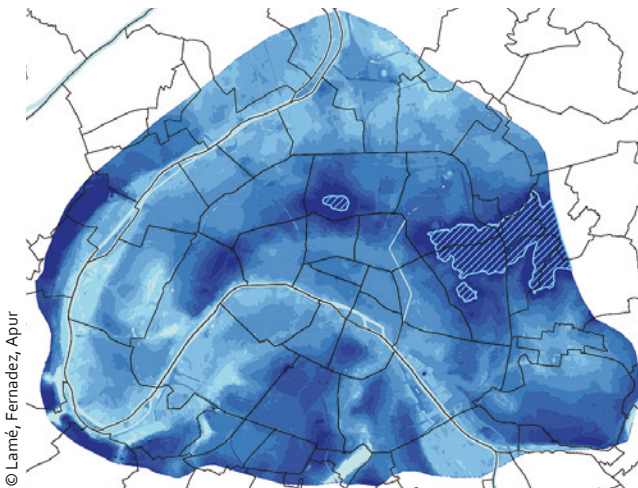
(4) On considère habituellement que la nappe est haute lorsqu'elle se trouve à moins de 1 m de la surface du sol.



Profondeur de la nappe phréatique durant la première moitié du XIX^e siècle - Source : Mathieu Fernandez, *Approche topographique historique du sous-sol parisien : 1800-2000. La ville épaisse*, Thèse, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, 2014

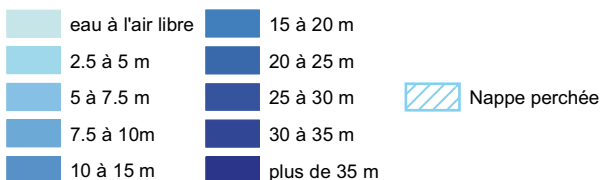


Profondeur de la nappe phréatique durant la deuxième moitié du XX^e siècle - Source : Mathieu Fernandez, *Approche topographique historique du sous-sol parisien : 1800-2000. La ville épaisse*, Thèse, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, 2014



Profondeur de la nappe phréatique et localisation des nappes perchées en 2012 - Source : Aurélie LAMÉ, *Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains*, Thèse, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 2013

Profondeur de l'eau

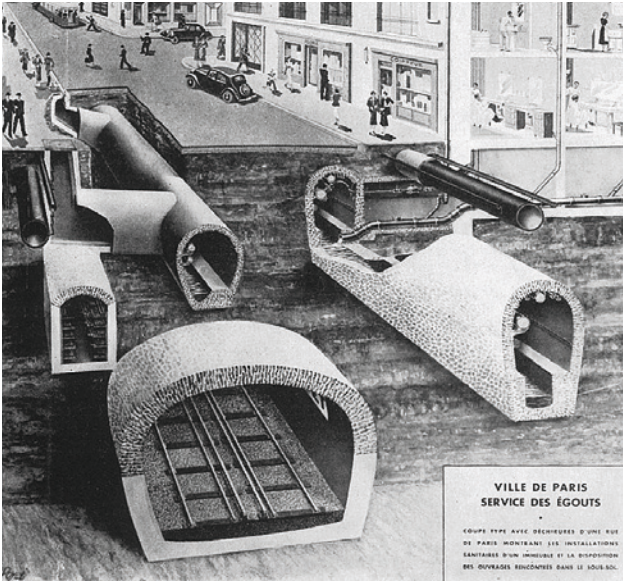


Les infrastructures souterraines

Le sous-sol de Paris est très souvent comparé à un véritable « gruyère » du fait des réseaux sous les trottoirs et la chaussée (RER, Métro, égouts, électricité, gaz, fibre optique, climespace, CPCU...).

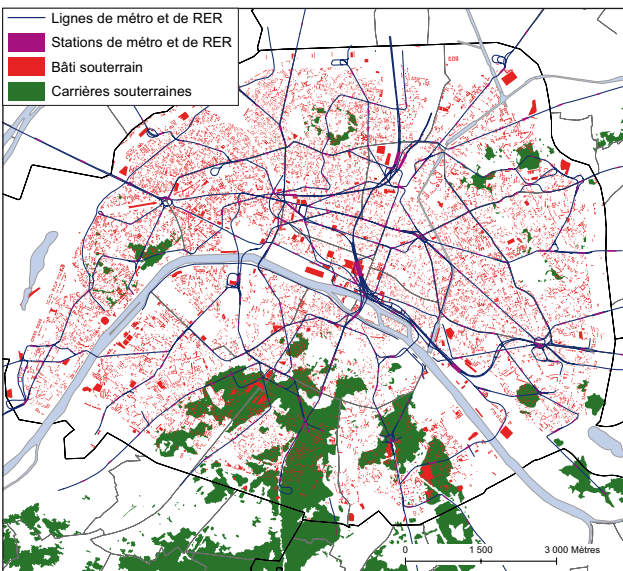
Dans sa thèse, Aurélie Lamé, a géo-référencé une partie de ces réseaux afin d'identifier ceux qui pouvaient interférer avec les nappes : parkings privés et publics, caves, lignes de RER et de métro, carrières de calcaire et de gypse ont ainsi été géo-localisés. L'étude montre que l'ensemble de ces infrastructures occupe déjà près de 20 % de l'espace souterrain parisien et que seul 1,6 % interfère aujourd'hui avec les nappes. Cependant, en considérant une situation où les nappes retrouveraient le niveau connu au milieu du XIX^e siècle (la carte Delesse), alors que les pompages étaient très limités, alors près de 30 % de ces mêmes infrastructures baigneraient dans la nappe.

Si les réseaux peuvent rajouter des contraintes à la réalisation d'ouvrages d'infiltration, ceux-ci ne constituent pas, le plus souvent, un facteur rédhibitoire.



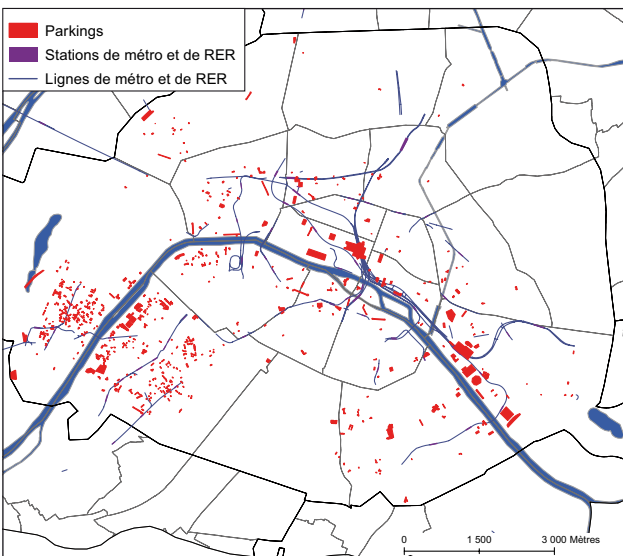
© Ville de Paris

Coupe type d'une rue moderne
Direction Générale des services techniques de la Ville de Paris, 1958, p. 152



© Aurélie Lamé - 2013

Carte d'occupation du sous-sol parisien
Source : Aurélie LAMÉ, *Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains*, Thèse, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 2013



© Aurélie Lamé - 2013

Carte des infrastructures souterraines interférant avec l'écoulement des nappes dans leur situation piézométrique de 2010.
Source : Aurélie LAMÉ, *Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains*, Thèse, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 2013



© Apur

Branchements sous trottoir



© Apur

Intervention sur le réseau CPCU

Préconisations

Développer l'infiltration

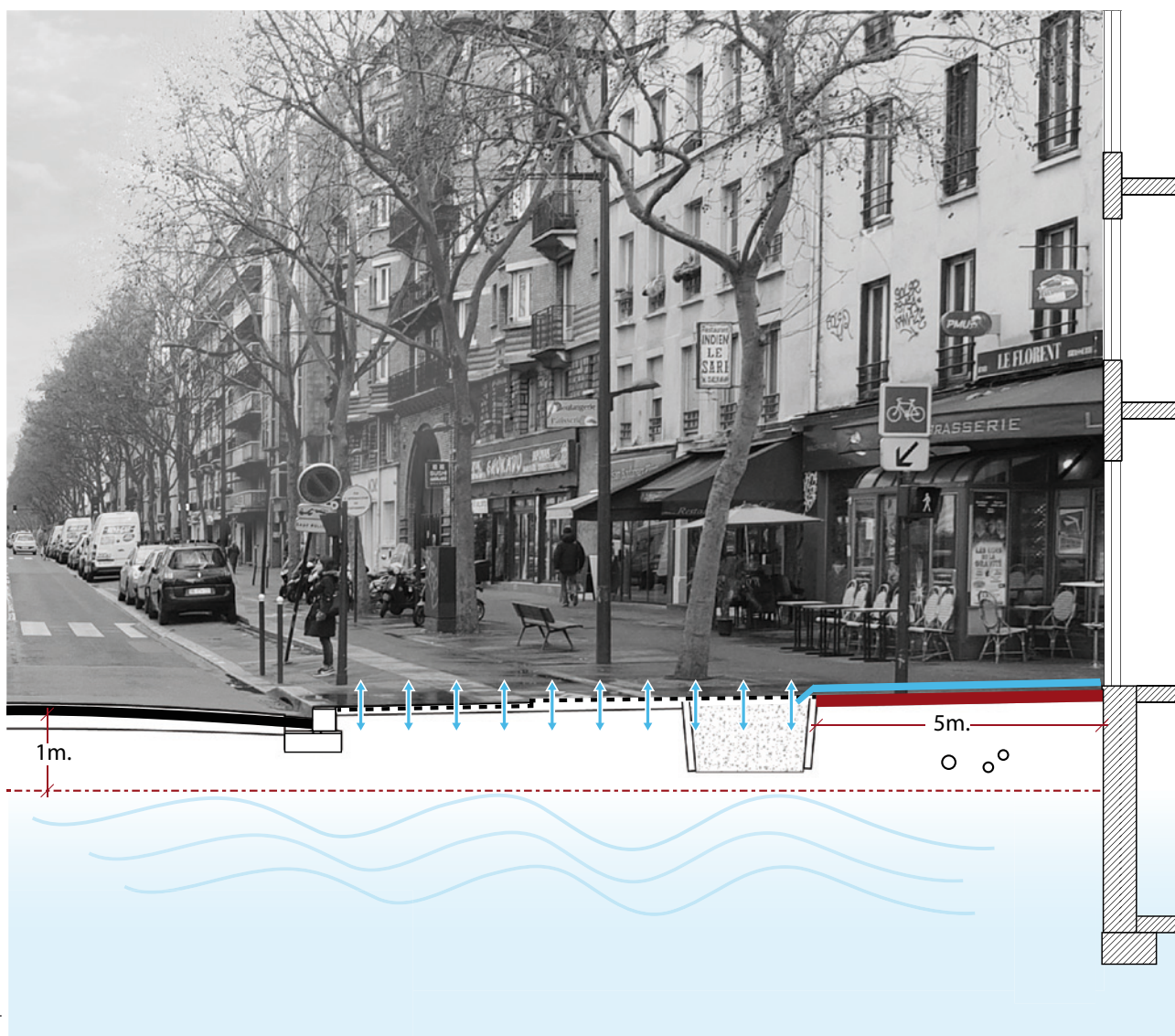
Lorsqu'on parle d'infiltration, il est essentiel de bien définir les termes employés. Très souvent ce dispositif renvoie à une infiltration forcée. Mais l'infiltration diffuse est également envisageable et largement recommandée à Paris et dans les départements riverains (voir la partie 1 « Gestion des eaux pluviales à l'échelle de la métropole »). Elle équivaut à la pluie reçue directement par le sol perméable sans apports supplémentaires. Toute la complexité du sujet est de bien pouvoir quantifier les volumes d'eau en jeu.

Les craintes liées au sous-sol (mais également à la pollution...) et le manque d'expérimentation en la matière à Paris conduisent à des situations paradoxales sur le plan environnemental et économique tels que la systématisation de jardins sur dalle.

Il existe des principes communément admis sur l'infiltration résumés dans cette coupe.

S'inspirer d'autres villes

En la matière, il semble essentiel de profiter des retours d'expériences de communes engagées véritablement dans une gestion contemporaine de l'eau de pluie. Cette gestion, qui ne va plus par le « tout tuyau » invite à réfléchir autrement et offre une occasion unique de lancer des expérimentations sur des secteurs test afin de mieux mesurer et observer le cheminement de l'eau qui s'infiltré réellement dans le sol. Une métropole comme le Grand Lyon s'est déjà engagée dans cette voie depuis plusieurs années et généralise désormais les techniques d'infiltration à l'ensemble du territoire, y compris dans le centre ancien.



© Apur

Principes d'infiltration couramment admis : eau souterraine au-delà de moins d'un mètre de la surface et 5 m de distance des façades

Une autre façon d'analyser les risques

Alors qu'à Paris l'expression des contraintes de sous-sol prend la forme d'interdictions (délimitation de secteur où l'infiltration est interdite, par exemple), à Lyon c'est l'impossibilité d'infiltrer qui doit être démontrée (par des études locales sur la capacité d'infiltration des sols par exemple). La démarche de projet et la mobilisation des acteurs s'en trouvent de fait très différentes et la gestion de l'eau ne renvoie pas systématiquement à des images de dégradation (du bâti, du sous-sol, de la végétation...).

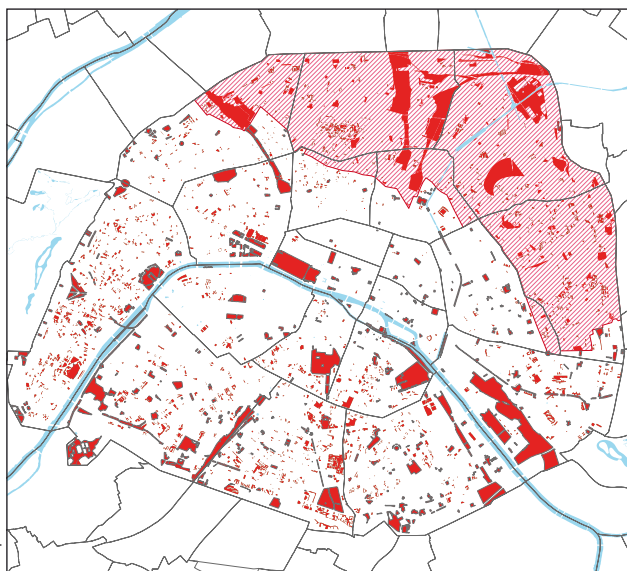
Si Paris reste une ville singulière et complexe, du fait de ses densités, de ses sols et sous-sols... elle offre aussi un territoire d'observation unique qui peut aider à relativiser certains risques liés à l'infiltration. Ainsi, dans le Nord-Est parisien un abattement minimal d'une lame d'eau de 4 mm est préconisé du fait de la présence de gypse en sous-sol. Pourtant, le Nord-Est compte de nombreux espaces perméables, près de la moitié des surfaces ferrées et près du tiers des espaces verts ⁽⁵⁾.

Expérimenter et connaître

Par ailleurs, il est important de rappeler que **les mouvements hydrogéologiques (affaissement, fontis, inondation du sous-sol) sont surtout dus à Paris à des fuites de réseaux** (eau potable et non potable, égouts). En effet, les volumes d'eau en jeu pour de l'infiltration d'eau de pluie sont très inférieurs à ceux liés à une fuite de réseau.

À titre d'exemple, on peut estimer le volume d'infiltration à $0,018 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$ contre $1\,000 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$ pour une fuite de réseau, soit un volume de 60 000 fois plus important que pour de l'infiltration ⁽⁶⁾.

Il faut aussi considérer que la mise en œuvre de techniques d'infiltration liées à une végétalisation des sols réduit la teneur en eau du fait qu'une part importante de l'eau est retenue par les plantes et évapotranspirée. Des études en cours, réalisées par le bureau d'étude Sépia à la demande du STEA devraient permettre d'obtenir des données plus précises à ce sujet et sans doute confirmer des études déjà réalisées à l'étranger (États-Unis notamment).



© Apur

Les espaces perméables à Paris

	Surfaces perméables en zone de gypse ludien :		Surfaces perméables hors zone de gypse ludien :
	Espaces verts : 138 ha		Espaces verts : 339 ha
	EVP : 40 ha		EVP : 185 ha
	Réseau ferré : 142 ha		Réseau ferré : 130 ha



© Apur

Inondation sous la rue de l'Observatoire, Paris



© Apur

Tranchée continue d'arbres d'alignement, avenue de la République, La Courneuve, 93

(5) Dans le nord-est parisien, près de 15 % de sa surface est déjà perméable du fait des espaces verts (178 ha sur 524 à Paris, soit près de 34 %) et des emprises ferrées (142 ha sur les 272 ha existant à Paris, soit plus de 50 %).
(6) Source : Agnès Tajouri, *Solutions techniques et architecturales pour l'application du règlement de zonage pluvial d'assainissement de la Ville de Paris*, travail de fin d'étude, Mairie de Paris, juillet 2014.

2- L'EAU ET LE SOL⁽¹⁾

La ville étanche, un héritage ?

L'imperméabilisation des villes s'est largement développée à partir de la seconde moitié du XIX^e siècle. Elle est le résultat d'une pensée hygiéniste attachée à combattre les miasmes particulièrement associés à l'époque à l'eau et au sous-sol. **Étancher la ville, c'est alors maîtriser la circulation des eaux de surface et leur acheminement en égouts, mais aussi empêcher les contaminations souterraines.** Si la visée sanitaire domine, elle est aussi associée à une dimension économique et fonctionnelle : l'organisation des sols urbains doit favoriser une meilleure circulation et répartition des flux entre piétons et véhicules.

Dans l'espace public, cette réforme se traduit par le passage de la chaussée fendu (à fil d'eau centrale) à la chaussée bombée (à trottoir et fils d'eau latéraux). Dans l'espace privé disparaissent les sols perméables, les puits et puisards. Pendant plus d'un siècle, la ville du dessus et la ville du dessous sont pensées simultanément au prisme d'un dispositif unique et centralisé, le « tout tuyau ».

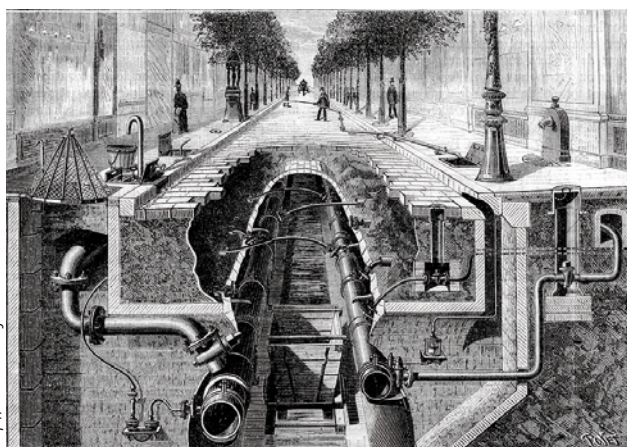
Depuis quelques décennies, cet héritage est de plus en plus critiqué à l'échelle internationale tant par les professionnels que par les chercheurs. Les postulats hygiéniques et techniques sont remis en question, les répercussions de l'étanchéité et de la concentration des volumes et des débits démontrées et dénoncées (inondations, pollution, coûts...). La dégradation du regard sur l'eau, due à sa classification, est également remise en question⁽²⁾.

Réduire l'imperméabilisation, gérer l'eau de pluie à sa source, utiliser et recycler les eaux en fonction de leurs qualités et des usages qu'elles peuvent satisfaire, rendre l'eau visible... sont désormais des orientations partagées, bien qu'inégalement mises en œuvre.



© Collection BIU Santé Médecine

Épidémie de choléra à Paris en 1832 / Honoré Daumier
in : Souvenirs du Choléra-Morbus à Paris / Fabre François -
Paris : Béthune et Plon, 1840



© Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers -
<http://cnum.cnam.fr>

Fig. 3. — Aménée des eaux à Paris, pour les divers services publics et privés.

Amenée des eaux à Paris, pour les divers services publics et privés
in : L'exposition d'hygiène urbaine : Le service des eaux à Paris La Nature
1886 Revue des Sciences et de leur application à l'art et à l'industrie
n° 684, 10 juillet 1886

(1) Cette partie a été réalisée en partie grâce aux entretiens effectués auprès de la DVD et plus particulièrement des services du patrimoine de voirie et du SAGP

(2) Voir à ce sujet les nombreux travaux de Bernard Chocat.

© P. Benoist, lith. - F. Hoffbauer, del.



1770



1840

Évolution du quartier du Temple, XVIII^e - XX^e siècles



1881



XX^e siècle

Paris, ville perméable?

Si la réforme des sols parisiens a été longue, même si cette durée est relative au regard de l'ancienneté de la ville. Les restitutions de Paris par Hoffbauer en témoignent. Entre nivellement, profils et matériaux **Paris a longtemps été une ville perméable** et les matériaux de surface, avant d'être dominés par l'asphalte et l'enrobé, variaient entre trottoirs et chaussée. Ces vues rappellent aussi à quel point cette réforme urbaine a fait l'objet d'études et d'expérimentations tant sur les profils que sur les matériaux. Capacité portante, confort, résistance à l'usure, conditions de mise en œuvre, d'entretien, de coûts... ont fait l'objet d'études systématiques et ont conduit à tester beaucoup de techniques et de matériaux différents (pavés en pierre, en bois..., dalles, empièrrement, asphalte...), dont certains se sont avérés des échecs après avoir été célébrés par les ingénieurs (chaussée en empièrrement selon la méthode de Mac-Adam par exemple). **Mais dans la quête au « revêtement imperméable, lisse et peu bruyant »⁽³⁾ ce sont finalement les matériaux de l'étanchéité par excellence, l'asphalte et l'enrobé, qui vaincraient, avec l'essor de l'automobile⁽⁴⁾.**

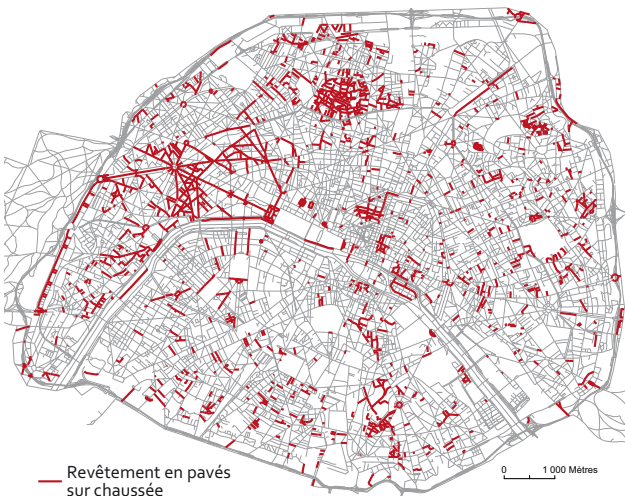
Aujourd'hui, le patrimoine de voirie à Paris comprend 12,7 millions de m² de chaussée et 11,5 millions de m² de trottoir, soit 20 % de la surface de Paris.

La répartition des matériaux de chaussée se fait ainsi :

- Pavés 34 %
- Enrobé 30 % dont 25 % posé sur pavés
- Asphalte 24 %
- Béton 8 %
- Divers (dallées, pavés béton...) 4 %

Les trottoirs sont majoritairement réalisés en asphalte, dalles de granit et pavés.

Pour une large part, ces matériaux de surface sont posés sur une sous-couche en béton imperméable (2 cm d'asphalte et 8 cm de béton pour les trottoirs par exemple), y compris pour les pavés engazonnés (20 cm de béton + 10 cm de sable, selon le module). Les joints des pavés sont également conçus pour être étanches. Pourtant, la perméabilité existe aussi sur des voiries anciennes qui ont convenablement tenu dans le temps. C'est le cas par exemple : place d'Italie (dont les sols sont en place depuis plus de 50 ans) ou les rues du secteur rue du Commandeur / passage Montbrun / rue de la Saône.



Carte des chaussées en revêtement en pavés à Paris



Pavés à joints engazonnés, passage Montbrun, Paris 14^e.

(3) Georges Lefebvre, Voie publique, Paris, Dunod et Vica éditeurs, 1896, p. 304.

(4) Voir à ce sujet le rapport de recherche de Sabine Barles et André Guillaume, Congestion urbaine en France (1800-1970), Paris, METLP/PUCA/LTMU/ARLU, 1998.

L'expérience des sols poreux à Paris

Testés au début des années 90, ces matériaux sont reconnus pour deux vertus principales : piéger le bruit et lutter contre l'aquaplaning. En 10 ans quelques planches ont ainsi été réalisées en enrobés poreux dans plusieurs sites parisiens (avenue de la Porte d'Ivry par exemple). Une couche étanche est alors posée sous ces enrobés permettant ainsi de collecter l'eau et de la renvoyer dans l'égout via les avaloirs positionnés sur le côté de la chaussée.

À l'usage, il s'est avéré que **ces revêtements se sont vite colmatés** et que les performances en matière d'affaiblissement acoustique n'ont pas été atteintes.

Les dysfonctionnements des enrobés poreux, notamment le colmatage, viennent du fait qu'en France, ces enrobés ont au début été posés sur des revêtements imperméables (car c'était la lutte contre le bruit de circulation qui était prioritairement visée), ce qui est considéré dans de nombreux pays comme une erreur technique (pour de l'infiltration).

La désimperméabilisation des chaussées implique aussi des structures plus épaisses (de l'ordre de 40 cm de ballasts supplémentaire), car l'eau infiltrée réduit la portance de ces structures. Cette contrainte explique aussi la crainte liée à la mise en œuvre de matériaux poreux en surface pour les chaussées existantes. Mais les réserves concernant les revêtements poreux ne se limitent pas à la capacité portante de la voirie, elles concernent aussi la crainte d'une perturbation des réseaux enterrés (bien que ceux-ci soient étanches).

Plus récemment, d'autres matériaux poreux ont été expérimentés. Il s'agit notamment de résines (type permeaway) susceptibles de remplacer les sols stabilisés qui sont dans les faits très peu perméables. Ces matériaux ont été mis en œuvre autour de pieds d'arbres ou en surface de tranchées d'arbres d'alignement (boulevard Bourdon). Ces résines, comme les bétons drainant, pourraient aussi être adaptées aux trottoirs et aux pistes cyclables (voir partie matériaux poreux). Le problème de ces matériaux, en dehors de leur **coût élevé** (pour les résines), est qu'ils peuvent être **contraignants à mettre en œuvre** et d'un **aspect peu satisfaisant** (dosage, couleur...) dans le cas d'interventions ponctuelles.

CC by: Estr4ng3d - SA 3.0



Exemple d'enrobé drainant

© Apur



Détail de revêtement perméable (type permeaway), boulevard Bourdon, Paris 4^e

© Apur

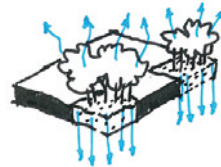


Détail de revêtement : en haut stabilisé, en bas permeaway, à droite asphalté, boulevard Bourdon, Paris 4^e

Préconisations

La mise en œuvre et l'entretien de la voirie parisienne répondent à des cahiers des charges précis. Il est important que les matériaux utilisés répondent à un certain nombre de critères :

- Des coûts d'investissements et d'entretien calculés pour une bonne tenue décennale
- Des matériaux qui doivent être confortables et durables
- À partir de 2016 des concessionnaires auront à charge d'entretenir la voirie, les matériaux mis en œuvre doivent être simple d'utilisation
- Une bonne réparabilité.



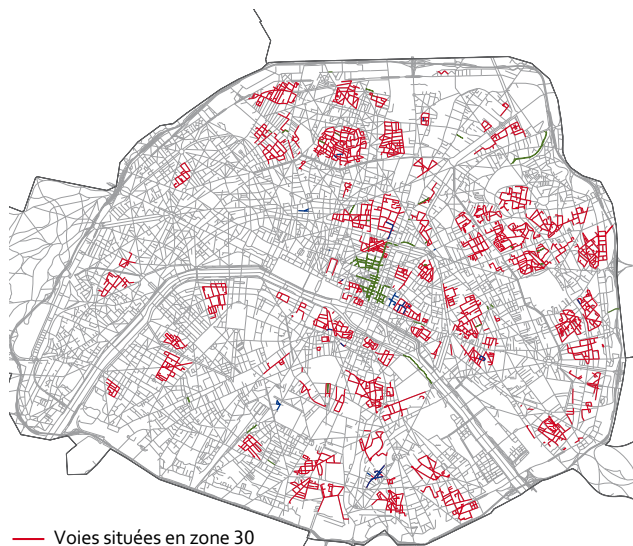
Désimperméabiliser

- **Associer le minéral et le végétal** : alternance de bandes minérales et plantées pour des fosses de plantations continues et le développement de sols vivants (biodiversité animale et végétale...).
- **Remplacer des joints en béton par des joints poreux** (sable, terre végétale).
- **Réduire le recours systématique au béton étanche** (en privilégiant des bétons poreux ou des mélanges grave/sable pour les sous-couches).

Redécouvrir/maintenir les pavés

Les pavés ou dalles en pierre ont fait leurs preuves et participent toujours au caractère du paysage parisien. Lorsque ces sols existent et sont posés sur des sous-couches perméables, ils devraient être conservés, entretenus et/ou redécouverts.

C'est le cas de plusieurs voies parisiennes mais également des places dont certaines sont au cœur du projet de la mandature actuelle.



- Voies situées en zone 30
- Les zones de rencontre
- Voies piétonnes

© Apur

Remise en pavé de certaines voies piétonnes ou peu circulées ?



© Apur

Réfection de la rue de Bercy, Paris 12^e
Découverte provisoire du pavé existant



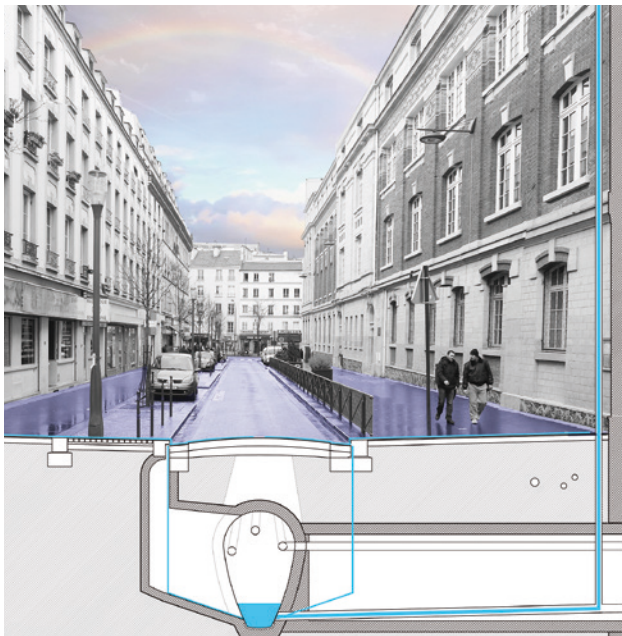
© Apur

Perméabilité des pavés, place d'Italie, Paris 13^e

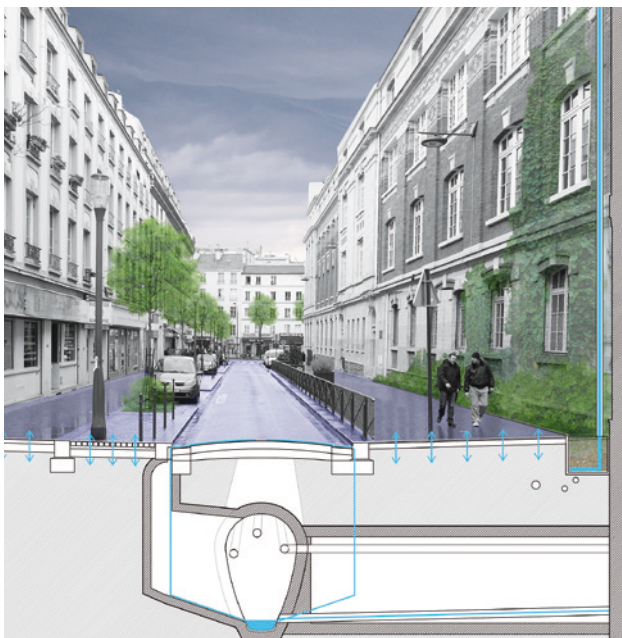


© Apur

Détails des revêtements, place d'Italie, Paris 13^e



© Apur



© Apur

rue Doudeauville, Paris 18^e, état actuel et état proposé
Photomontage Apur



© Apur

Pose de dalles clivées, place André Malraux, Paris 1^{er}

Privilégier le réemploi

À l'ère du réemploi et d'une reconquête des mobilités, les sols de Paris pourraient être amenés à évoluer.

Comme l'ont prouvé les réalisations d'espaces publics sur l'Île de Nantes, la capacité à travailler avec les sols en place peut permettre des économies importantes.

À Paris, les dalles clivées apparaissent comme un matériau très intéressant à développer. On le retrouve couramment sur les trottoirs (Pont Neuf, rue Saint-Antoine, rue de Malte...). Elles s'inscrivent dans une démarche de développement durable : durée de vie importante (100 à 200 ans), posées directement sur grave et géotextile, donc sans béton ni sable, elles sont auto stables.

Elles sont également faciles d'entretien et plus confortables pour les piétons que les pavés. Des joints poreux de 15 mm pourraient permettre une infiltration diffuse. Les variations de couleurs possibles, sans altérer l'aspect général du trottoir, et surtout les variations de modules de ces dalles peuvent simplifier les travaux sur trottoirs.



Expérimenter

De nombreuses expérimentations sont en cours, qu'elles relèvent de la DVD, du STEA ou du LEM. Elles sont encourageantes même si elles restent encore limitées.

Une large gamme de matériaux poreux contemporains existent et pourraient aussi être plus largement expérimentés à Paris (enrobés, bétons coulés ou en dalles, résines...). Les plus compatibles avec le paysage et les usages parisiens sont présentés dans la seconde partie de cette étude (sols poreux). Nombre d'entre eux pourraient être testés sur les trottoirs, les emprises de stationnement, les pistes cyclables et les voies à trafic limité (zone trente).

En permettant une infiltration diffuse, ces techniques seraient aussi compatibles avec l'essentiel des sous-sols parisiens et avec le maintien du coulage de caniveau, ce qui n'est pas le cas des structures à chaussée réservoir par exemple.



Gargouilles sur trottoir, Saint-Malo

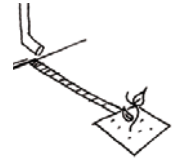


Gargouilles sur trottoir, Nantes

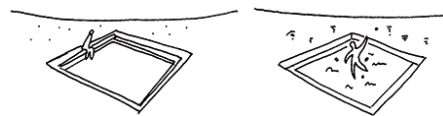
Rendre visible le cycle de l'eau

Les sols sont les supports possibles d'une redécouverte du cycle de l'eau en ville. De nombreux moyens existent :

- **Renouer avec le dispositif des gargouilles sur trottoirs** qui permettraient de conduire aux ruisseaux les eaux des propriétés riveraines, dans la traversée des trottoirs. Ces gargouilles, généralement en fonte, existent encore dans les centres anciens des villes françaises. Les eaux ainsi conduites pourraient alimenter les fosses d'arbres ou jardinières, mais également des zones d'infiltration éloignées des façades et des réseaux enterrés. Le règlement d'assainissement de Paris (art. 30) pourrait être adapté en ce sens.



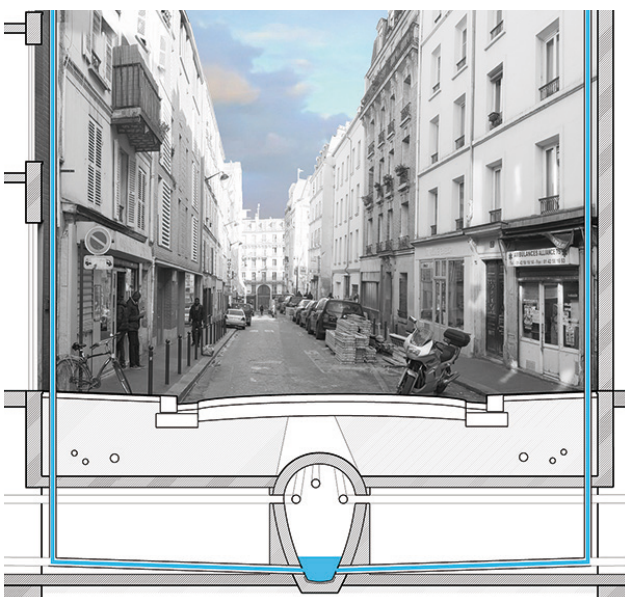
- **Réinventer le nivellement**: un travail sur le nivellement pourrait permettre un stockage des eaux pluviales en surface et leur acheminement par des ruisseaux lisibles.



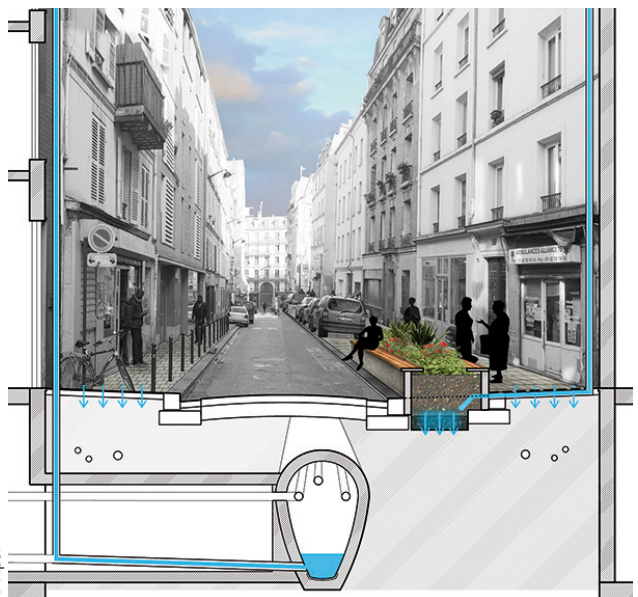
Repenser les espaces publics ?



Rotterdam



Rue Myrha, Paris 18^e: état existant et état proposé





© Apur



© Apur

Boulevard de la Chapelle, Paris 10^e-18^e : état existant et état proposé



© Apur

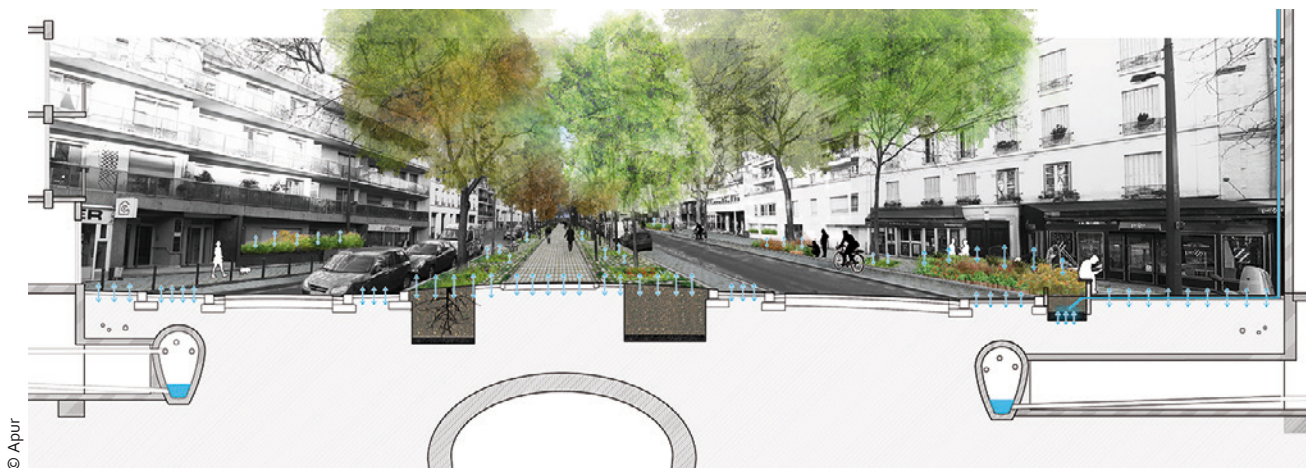


© Apur

Place de la Chapelle, Paris 10^e-18^e : état existant et état proposé



© Apur

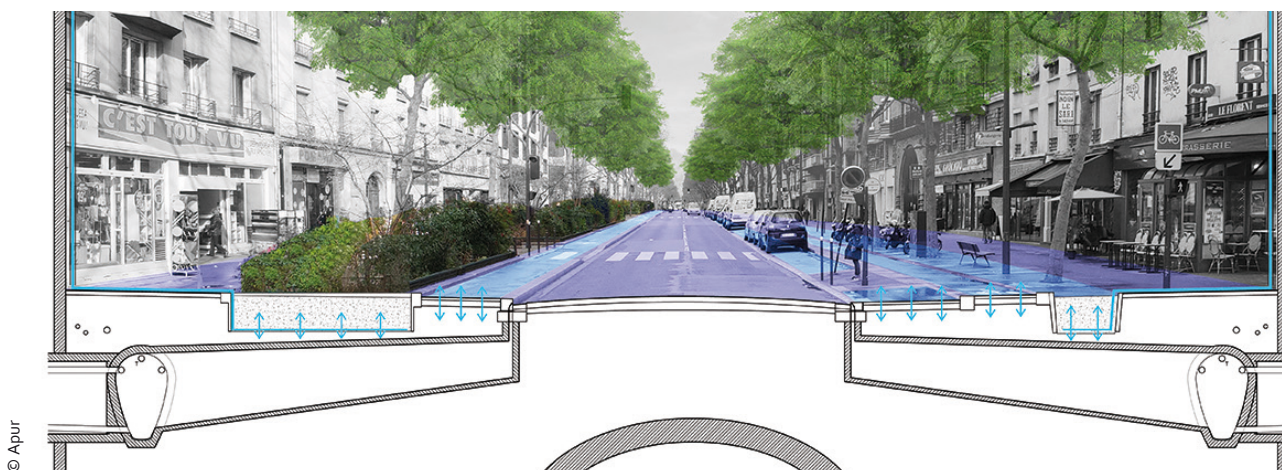


© Apur

Boulevard de Charonne, Paris 11^e-20^e: état existant et état proposé



© Apur



© Apur

Avenue Jean Jaurès, Paris 19^e: état existant et état proposé

S'inspirer d'exemples français et étrangers

De nombreuses réussites en France et à l'étranger existent en matière de sols perméables. Ces réalisations, souvent remarquables, ont été possibles car les risques de débordement de réseau ou de pollution des eaux de surface étaient devenus trop importants et coûteux pour les collectivités.

Leur réussite est aussi due pour une grande part à la synergie entre les services en charge de la transformation et de la gestion des espaces publics (voirie, propreté, espaces verts...).

Dans bien des cas, la réflexion sur la gestion des eaux de pluie en surface et la rencontre entre le minéral et le végétal ont donné lieu à des espaces urbains de très grande qualité (Nantes, Barcelone, Berlin...).

Le plus souvent ces travaux ont donné lieu à des cahiers des charges et de prescriptions, ainsi qu'à des campagnes de communication très riches. C'est particulièrement le cas de villes américaines (par exemple les quartiers centraux à Portland-Oregon ou Vancouver, conçus en zéro rejet).



© Apur

Miroir d'eau, Nantes



© Apur

Désimperméabilisation d'un parking, parvis de la Gare, La Roche-sur-Yon



© Apur

Pavé à joints engazonnés, Barcelone



CC - Aaron Volkening

Chaussée avec caniveau central en pavé poreux, Milwaukee



© Apur

Désimperméabilisation du sol d'un grand parvis, Berlin



© Apur

Pavés perméables, Toronto

3- L'EAU ET LE VÉGÉTAL (1)



© Apur

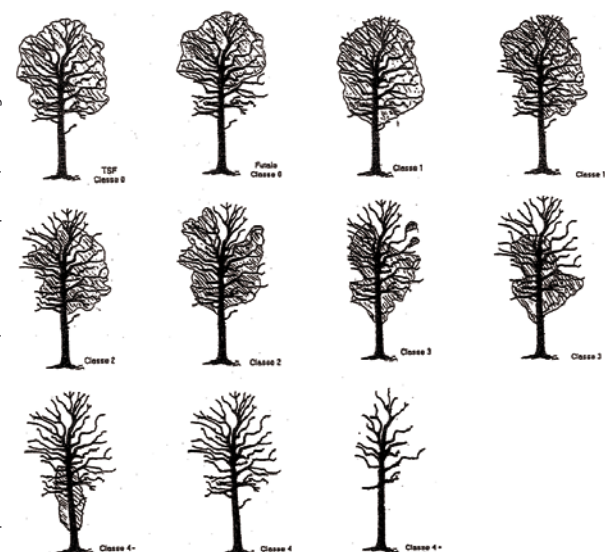
Différence de vigueur entre les platanes des quais hauts et bas de la Seine, Paris 4^e



© Apur

Koel renteria panicula en état de stress hydrique, descente de cime, Paris

© Département Santé des Forêts, échelon technique N-E, L. M. Nageleisen-1996



Mortalité des rameaux-branches en descente de cime, chêne pédonculé - Méthode d'évaluation de l'aspect du houppier, protocole Dupefeu, Département Santé des Forêts - juin 1996

Le végétal joue un rôle fondamental en ville, ses bénéfices environnementaux, outre ceux liés à la biodiversité, sont aujourd'hui bien connus :

- Modification du climat urbain en abaissant la température (lutte contre les ICU) ;
- Amélioration de la qualité physico-chimique de l'air des villes (diminution du taux de gaz carbonique, filtration des poussières et des aérosols).

Cette partie traite du rôle des arbres, mais plusieurs aspects sont transposables aux autres strates végétales.

L'eau, élément vital pour les végétaux

Sans eau, le végétal ne peut pas survivre. Pour les arbres en forêt, les apports en eau expliquent 70 à 80 % des variations de leur diamètre. L'arbre s'approvisionne dans le sol où ses racines pompent l'eau nécessaire à son bon développement. Ses besoins sont très importants. Le minimum vital est estimé à 240 mm/an. En dessous de 400 mm/an, un arbre a du mal à se développer. Ses besoins augmentent aussi en fonction de l'âge et varient suivant le milieu et l'essence.

Les avis de différents experts convergent sur le fait, qu'à Paris, les arbres adultes d'alignement sont souvent en stress hydrique. Leur croissance est affaiblie, leur vigueur diminue, les principaux symptômes sont :

- des rameaux rabougris
- une plus grande sensibilité aux parasites
- diminution de la croissance en longueur et en épaisseur
- floraisons plus irrégulières, feuillage moins fourni
- descentes de cime
- rejets sur les troncs sous le houppier
- flétrissement...

(1) Cette partie s'appuie sur des entretiens réalisés avec différents experts dont Gregory Tissot, paysagiste de l'agence Après la pluie et Béatrice Rizzo, ingénieur agronome, Service de l'arbre et des bois/DEVE/Ville de Paris.

(2) Selon Gregory Tissot, un arbre solitaire dans un milieu ouvert et tempéré a besoin par an, pour une croissance « illimitée », de 800 l/m² de projection de houppier sur le sol. Cette quantité baisse à 600 litres pour des arbres en alignement. Dans ces conditions sa croissance n'est plus « illimitée ». Pour un arbre dont le houppier a 10 m de diamètre, on obtient : 78 m² x 240 l/m² = 18 720 l/an minimum.

L'imperméabilisation des sols, l'ennemi des arbres en ville

80 % des problèmes de développement de l'arbre en ville sont liés au sol : sécheresse, tassement, carences en sels minéraux, salage...

Le végétal s'épanouit dans une terre humide, aérée et fraîche. L'imperméabilisation des sols ne permet plus les échanges d'air, de matières organiques mais aussi d'eau entre la surface et la terre, l'eau de pluie étant renvoyée vers des canalisations. À Paris, les sols sont très secs, les nappes (sauf quelques cas de nappes perchées) sont très profondes.

Ce sont les failles du système hydraulique en ville qui profitent aux arbres (fuite de réseaux d'eau potable, non potable, usées, mauvaise étanchéité des caniveaux) et conduisent certaines espèces comme les robinets à étendre leur racine le long des caniveaux profitant ainsi du coulage réalisé pour le nettoyage de l'espace public.

D'ailleurs, si l'imperméabilisation des sols peut être considérée comme une ennemie des arbres en villes, c'est aussi sous l'angle envisagé par A. Chargueraud, un risque de saturation en eau lié à l'impossibilité du sol à évaporer et à l'imperméabilité du sous-sol : « Cet excès d'humidité peut provenir de la nature même de l'emplacement, des revêtements des trottoirs qui empêchent l'évaporation, ou de la surabondance d'arrosement, là surtout où le sous-sol est imperméable ⁽³⁾ ». Mais ce sont aussi des fosses mal décompactées qui peuvent poser problème.

Les coupes, extraites de l'ouvrage *L'arboriculture urbaine*, illustrent bien l'ensemble des maux urbains liés au stress hydrique des arbres en ville.

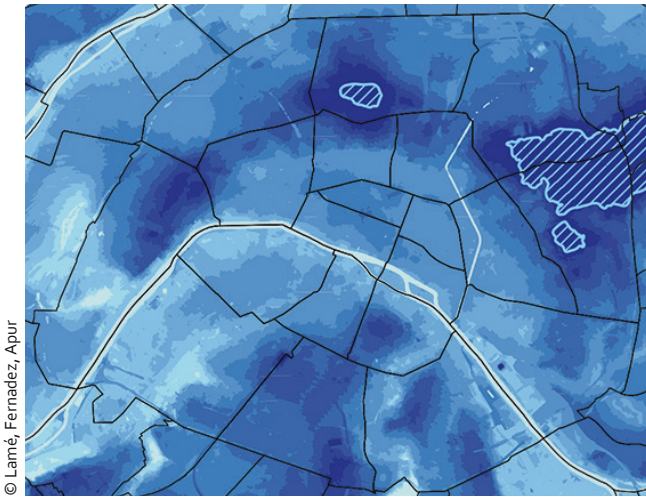
Végétal et îlot de fraîcheur à Paris

Principale source d'évaporation avec les plans d'eau (rivière, lacs...), la végétation contribue à rafraîchir les villes. Elle en augmente le taux d'humidité et abaisse la température suite à la production de vapeur d'eau qui consomme des calories. Une bande plantée de 100 m de large entraîne une augmentation de 50 % de l'humidité atmosphérique ⁽⁴⁾. Cela ne peut se faire que si les végétaux sont correctement alimentés en eau et ne souffrent pas de stress hydrique.

L'abaissement de la température lié à la présence des arbres est directement corrélé à la densité de leur feuillage. **Un arbre en stress hydrique ne joue donc plus, à son optimum, son rôle de régulateur thermique (trouée dans le feuillage, descente de cime...)**. Il réalise des économies d'eau en refermant ses stomates. Prendre en compte les arbres, et la végétation urbaine en général, comme des régulateurs thermiques ne peut donc se faire que si ces derniers bénéficient d'un apport suffisant d'eau. Toutes les eaux dont les eaux de pluie peuvent répondre à ces besoins.

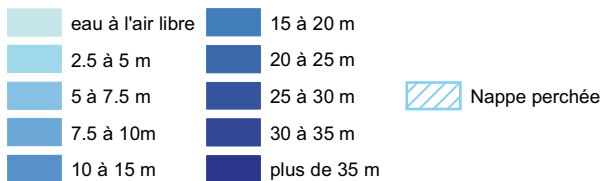
(3) Adolphe Chargueraud, *Traité des plantations d'alignement et d'ornement dans les villes et sur les routes départementales*, Paris, J. Rothschild éditeur, 1896, p. 137.

(4) Extraits de Laurent Maillet et Corinne Bourgeri, *L'arboriculture urbaine*, Paris, Édition de l'Institut pour le développement forestier, 1993, p. 75 et 76.



Profondeur de la nappe phréatique et localisation des nappes perchées en 2012 - Source: Aurélie LAMÉ, *Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains*, Thèse, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 2013

Profondeur de l'eau



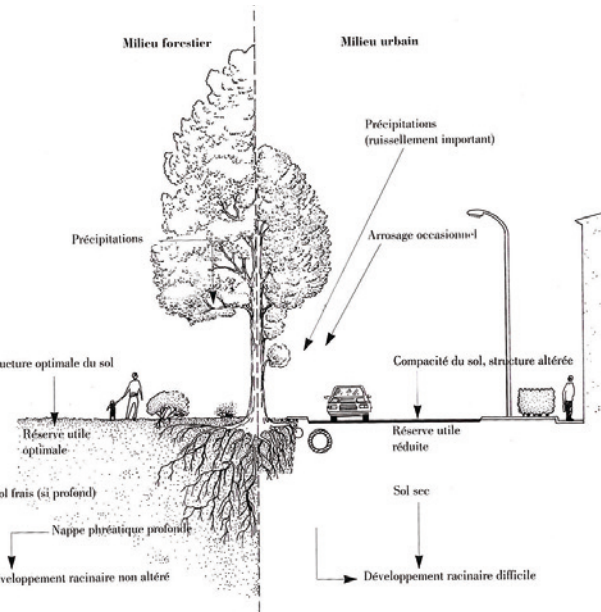
Flétrissement d'un tilleul après des travaux d'imperméabilisation de surfaces (enrobé à droite)



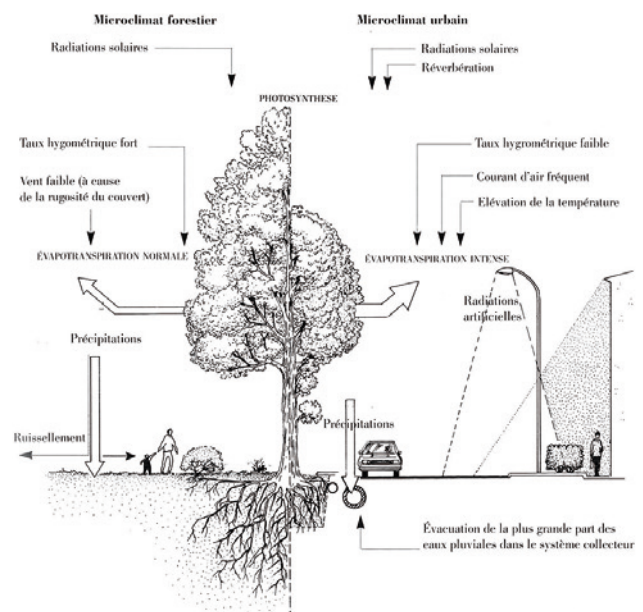
Racines de tilleul affleurantes sous le caniveau



Fosse de plantation mal décompactée, qui peut poser des problèmes d'hydromorphie



Incidences du facteur hydrique sur le développement des arbres. Comparaison avec le milieu forestier. D'après F. Freyret



Incidences du microclimat urbain sur le développement des arbres. Comparaison avec le milieu forestier. D'après F. Freyret



Arrosage régulier après la plantation d'un jeune arbre

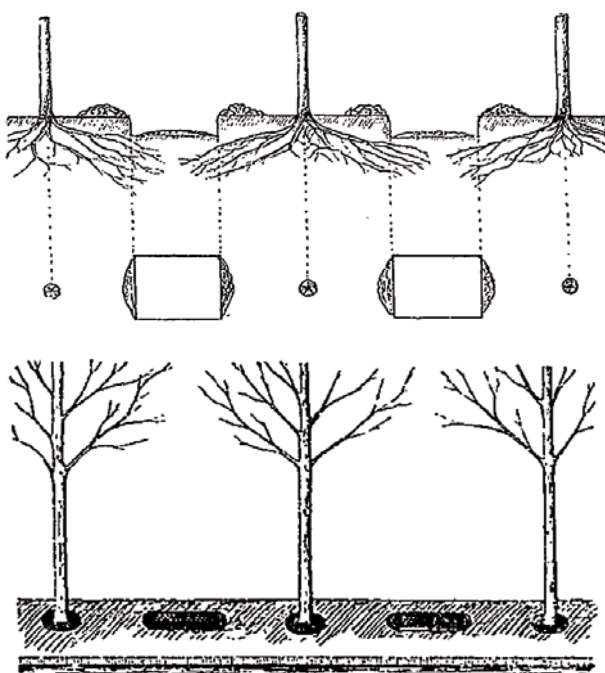
Pratiques d'arrosage

Pour les jeunes plantations, un arrosage régulier est aujourd'hui pratiqué à hauteur de 100 à 150 litres d'eau par semaine d'avril à septembre, suivant les espèces, pendant les trois premières années. Ces trois années se fondent sur le constat qu'après trois ans l'arbre a réussi à étendre son système racinaire. On considère alors que « l'arbre peut se débrouiller tout seul ».

Pourtant, si les jeunes sujets ont besoin d'un arrosage soigné, les sujets plus anciens devraient aussi pouvoir en bénéficier. En 1896, Adolphe Chargueraud, professeur d'arboriculture de la Ville de Paris, estimait qu'un « jeune arbre de quelques années de plantation, dont les racines occupent seulement 1 mètre cube de terre ordinaire, pourra être arrosé avec 100 litres d'eau. Un arbre âgé dont les racines occupent 10 à 12 mètres de terre pourra avoir besoin de 1 000 à 1 200 litres d'eau ⁽⁵⁾ ». Il préconisait d'ailleurs pour cela la création de « cuvettes intermédiaires », permanentes ou temporaires, entre les arbres d'alignement. Elles devaient, comme les grilles d'arbres ordinaires, faciliter l'arrosage et l'aération du sol.

À l'origine, les grilles d'arbres en fonte évitaient le tassement de la terre et permettaient le ruissellement des eaux de pluies du trottoir vers la fosse d'arbre. Aujourd'hui, le manque d'entretien des pieds d'arbres (accumulation de déchets sous les grilles, tassement, absence de cuvettes) ne permet plus aux eaux de pluie de cheminer jusqu'à la fosse d'arbres.

(5) Adolphe Chargueraud, *Op. Cit.*, p. 71. L'auteur précise aussi, p. 72, la fréquence d'arrosage pour : les platanes, pterocaryas, aulnes, peupliers : tous les 15 ou 20 jours ; les tilleuls, frênes, marronniers : tous les 20 ou 25 jours ; les vernis du Japon, paulownias, ormes, érables, robinias, noyers, sophoras : tous les 30 ou 40 jours.



Cuvettes intermédiaires, provisoires ou permanentes, 1896.

Trop d'eau, trop de pollution ?

La crainte liée à la collecte d'eau de pluie est souvent liée à celle d'un excès d'eau dans le sol (hydromorphie). Cependant, comme indiqué plus haut, les excès d'eau conduisant à des dépérissements sont rares. Les experts s'accordent pour dire que les risques d'un sur-arrosage concernent les jeunes arbres.

Concernant la pollution, **l'arbre est très peu exigeant sur la qualité de l'eau. Il effectue un transport sélectif des éléments minéraux** et seul des concentrations très élevées de pollution pourraient nuire à leur bon développement. Il n'est d'ailleurs pas rare à Paris de voir des arbres s'alimenter dans des canalisations d'eaux usées (dégradations de canalisation confirmant que les sujets âgés ont du mal à trouver les ressources en eau nécessaires).

En revanche, il est attesté que l'entrée du sodium n'est pas maîtrisée par les arbres, car c'est un élément extrêmement soluble dans l'eau. Ce risque, lié au salage en hiver, conduit généralement à la mise en place de bordures empêchant la collecte des eaux de ruissellement. Le problème était déjà identifié au XIX^e siècle, mais la réponse était alors différente : « l'emploi du sel pour la fonte des neiges peut être aussi une cause de dépérissement des arbres, quand on en jette une grande quantité, surtout si les arbres sont jeunes et les racines peu profondes ; on combat l'action nuisible de l'eau salée par un lavage du sol au moyen d'arrosages répétés et abondants ⁽⁶⁾ ». D'autres moyens d'action restent sans doute encore à trouver, comme la rugosité des sols (poreux) par exemple.

De fait, l'un des risques majeurs lié à un arrosage permettant à l'arbre de ne pas être en stress hydrique, outre les économies d'eau qui ont parfois prévalu (l'eau de pluie est gratuite), semble être le risque d'un excès d'entretien dû à la croissance de l'arbre. Si ce paramètre économique est bien à prendre en compte, il reste à évaluer plus précisément au regard des coûts liés à l'entretien des arbres malades par manque d'eau et aux bénéfices d'un rafraîchissement apporté par une végétation saine.

(6) Georges Lefebvre (Conducteur des Ponts et Chaussées, Chef de la circonscription des services techniques municipaux de la Ville de Paris), *Plantations d'alignement. Promenades, parcs et jardins publics*, Paris, P. Vicq-Dunod et Cie éditeurs, 1897, p. 130.



© Ambre David

Tilleul en état de stress hydrique devenu sensible aux parasites



© Ambre David

Tilleul en pleine vigueur et tilleul en état de stress hydrique avec des trouées et fenêtres dans le houppier, faible densité du feuillage



CC - Darkday

Développement de racines d'arbres dans les canalisations, États-Unis



© Apur

Racines dans les égouts, quartier de l'Observatoire, Paris 14^e



© Sophie Robichon / Mairie de Paris

Opération de salage sur les quais de Paris

Préconisations

De nombreuses actions sont possibles pour améliorer la condition des arbres en ville et leur apporter plus d'eau :

- **Penter** systématiquement le sol des emprises pas ou peu circulées vers les plantations existantes ;
- **Araser** les bordures autour des espaces plantés ;
- **Désimperméabiliser** les sols autour des arbres en créant des fosses continues (pleine terre, pavés et/ou dalles non jointés permettant au sol de respirer...);
- **Valoriser** les pieds d'arbre en permettant selon le contexte leur appropriation par les riverains ;
- **Harmoniser** la doctrine à adopter par les services de la ville au regard de la collecte de l'eau. L'application du zonage pluvial à Paris pourrait offrir cette occasion. En dehors des rappels des ouvrages du XIXe siècle, qui ont contribué à l'héritage parisien en matière de végétation, nous donnons à titre d'exemple le cas de la rencontre de rue Marie Georges Picquart avec le boulevard Péreire (17^e arrondissement). Ces aménagements sont très récents (Grether architecte). Le premier répond à l'interdiction de recevoir les eaux de ruissellement, le second, équipé de grilles perforées, le permet en revanche.



© Apur

Espace planté avec bordure trouée à Tokyo, Japon



CC - Center for Neighborhood Technology

Revêtements perméables combinés à des espaces plantés décaissés, Chicago



© Apur

Fosses d'arbres plantées, rue Fabre d'Églantine, Paris 12^e



© Apur

Pied d'arbre planté, avenue de Bouvines, Paris 11^e



© Apur

Bordure pleine, rue Marie-Georges Picquart, Paris 17^e



© Apur

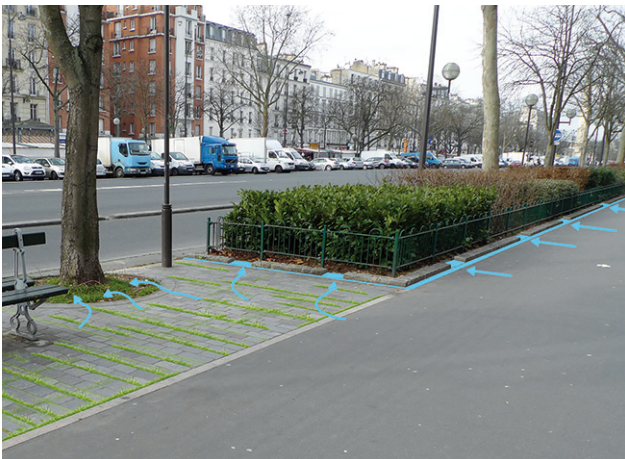
Grille perforée, boulevard Péreire, Paris 17^e



© Apur

© Apur

Fosses d'arbres continues engazonnées, bordées de pavés, état existant et proposé. Boulevard de Charonne, Paris 11^e/20^e, photomontage Apur



© Apur

© Apur

Reprise des bordures des jardinières et des joints des pavés existants. Contre allée du cours de Vincennes, Paris 12^e. Photomontage Apur



© Apur

CC by NACTO - NC

Tranchée continue avec bordure, Paris 4^e

Tranchée continue recueillant les eaux pluviales, Portland



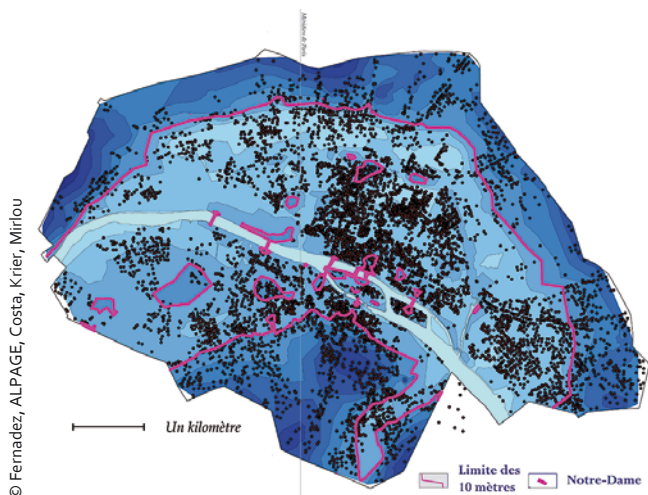
© Apur

© Apur

Espace planté non connecté, boulevard Bourdon, Paris 4^e

Espace planté recueillant les eaux de chaussée, les 4000, La Courneuve

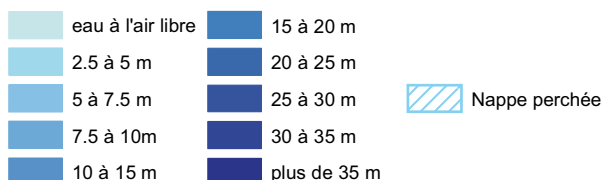
4- L'EAU ET LE BÂTI



© Fernandez, ALPAGE, Costa, Krier, Mirilou

Profondeur de la nappe phréatique et les puits de Paris durant la première moitié du XIX^e siècle - Source : Mathieu Fernandez, *Approche topographique historique du sous-sol parisien : 1800-2000. La ville épaisse*, Thèse, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, 2014

Profondeur de l'eau



L'eau et le développement urbain ont toujours été étroitement liés. L'urbanisation de Paris ne déroge pas à cette règle.

La carte ci-contre illustre les relations fortes entre les eaux souterraines à moins de 10 mètres de profondeur (présence de puits) et les maisons du Paris ancien.

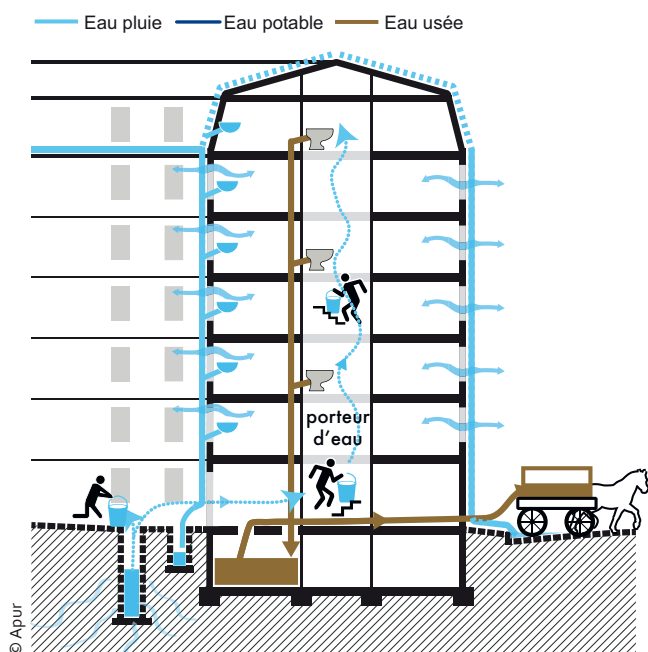
Le cycle de l'eau à l'échelle du bâti. Situation courante et désordres au XIX^e siècle

Un « mélange » de toutes les eaux

Au milieu du XIX^e siècle, avant que l'eau ne soit acheminée à tous les étages par les réseaux d'eaux, les parisiens s'approvisionnaient essentiellement via les puits privés, les fontaines publiques et les porteurs d'eau qui montaient aux étages de l'eau de « meilleure » qualité provenant essentiellement des eaux de surface (Seine et Ourcq) et pour une moindre part des eaux de sources (de Belleville, du Pré-Saint-Gervais et de Rungis).

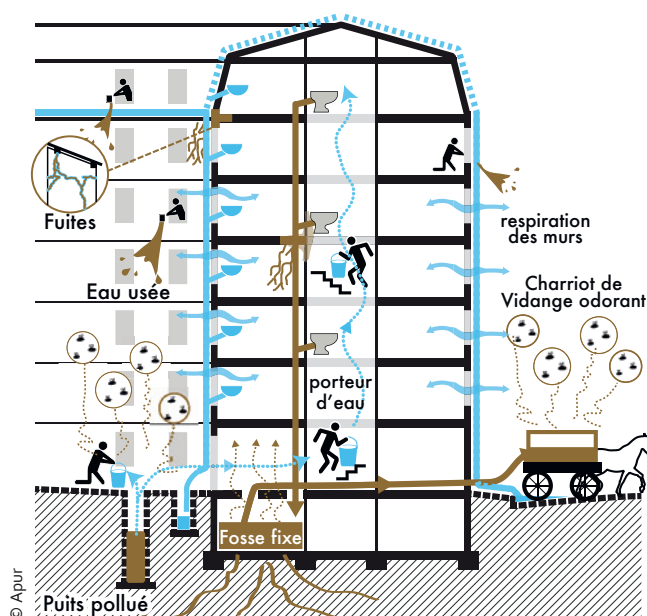
L'évacuation des eaux ménagères et de pluie est alors mal contrôlée (c'est le règne du « tout à la rue ») et les fosses fixes ou mobiles, implantées en sous-sol, ne sont pas toujours étanches et même débordent. Leur vidange est malaisée, encombre l'espace public et imprègne la capitale des « odeurs de Paris » jugées de plus en plus intolérables.

Le croupissement des eaux dans les cours et les rues, le mélange des eaux-vannes à celle des puits étaient autant de conditions favorables au développement de maladies. Les eaux étaient alors synonymes et vecteur d'insalubrité.



© Apur

L'eau et le bâti, situation courante, début XIX^e siècle



© Apur

L'eau et le bâti, désordres, début XIX^e siècle

Le cycle de l'eau à l'échelle du bâti. Situation courante et désordres de la fin du XIX^e siècle à nos jours

Toutes les eaux dans les tuyaux : premier ennemi du bâti.

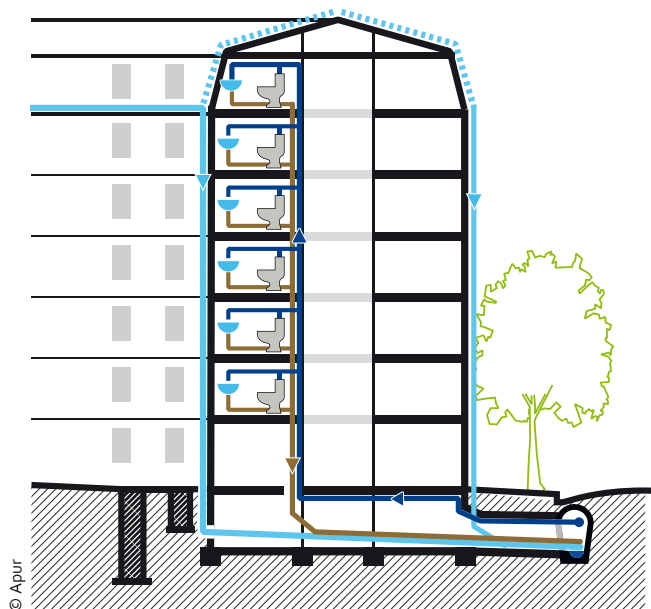
La politique de salubrité publique appliquée au XIX^e siècle canalise et fait disparaître progressivement l'eau de la surface des villes. Des réseaux étanches d'adduction en eaux, de plus en plus saines et abondantes, et d'évacuation, de plus en plus étendus et hiérarchisés, conquièrent les sous-sols de la ville. La bataille du tout à l'égout aura été longue, marquée par la récurrence des épidémies (1832-1835, 1848-1849, 1882 - typhoïde - 1884 - choléra, 1892 - cholériforme) et jalonnée de débats sanitaires, techniques, économiques et politiques. Le décret-loi de 1852 rend d'abord obligatoire le rejet des eaux ménagères et pluviales à l'égout, et la loi de 1894 celui du tout-à-l'égout. En 1880, 70 000 immeubles, sur un total de 80 000 dans la capitale, sont équipés de fosses fixes. En 1910, près de 48 500 immeubles sont raccordés et 36 500 doivent encore l'être. Ils passeront à 60 000 en 1920, alors que 30 % restent encore équipés de fosses.

Depuis le début du XX^e siècle, la canalisation de toutes les eaux a largement contribué à l'assainissement des villes et a radicalement changé son cycle.

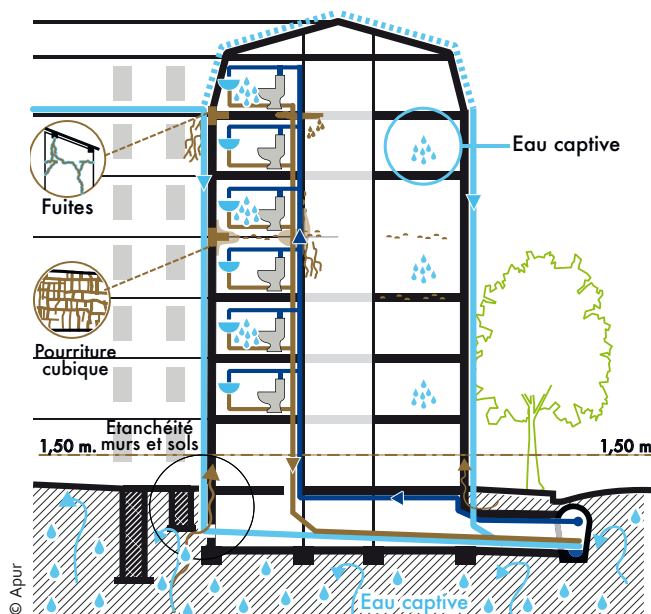
Le cheminement de l'eau dans une ville étanche cause de nombreux désordres et la recherche systématique d'une bonne étanchéité des sols et des murs a conduit à des dégradations notamment sur le bâti parisien. L'eau par essence a besoin de circuler et quels que soient les obstacles elle finit toujours par cheminer.

L'étude des arrêts d'insalubrité a permis de conclure que 98 % d'entre eux étaient liés à des fuites de réseaux (ancienneté des colonnes en fonte d'eaux usées et vannes, fuites des réseaux d'AEP...).

À Paris, les désordres dus à des remontées capillaires représentent aujourd'hui 1 %, voire moins, des arrêts d'insalubrité. Selon le Service technique de l'habitat de la Ville de Paris, les quelques cas connus se situent dans des secteurs où l'on peut trouver des nappes perchées et/ou des sources (Belleville et Montmartre). Ces remontées capillaires sont le plus souvent constatées dans les bâtiments édifiés sur terrain plein (sans cave) et l'eau ne remonte jamais (sauf cas spécifiques) au-delà de 1,5 mètre. Dans ces rares cas, les dégradations sur le bâti touchent donc exclusivement les rez-de-chaussée.



L'eau et le bâti, situation courante, fin XIX^e - XXI^e siècles à nos jours



L'eau et le bâti, désordres, fin XIX^e - XXI^e siècles à nos jours

— Eau pluviale — Eau potable — Eau usée



Remontée d'eau capillaire, rue Pradier, Paris 19^e

Dégradations courantes dans le bâti ancien dues aux fuites d'eau : fissurations en façade, champignons et moisissures...



© Direction du Logement et de l'Habitat (DLH)

L'eau stockée derrière une peinture étanche cherche à s'évaporer



© Direction du Logement et de l'Habitat (DLH)

Décollement de l'enduit dû à une fuite d'eau émanant d'une pièce humide



© Direction du Logement et de l'Habitat (DLH)

Dégradation des parties communes due à des fuites d'eau provenant de pièces humides adossées à ces murs



© Direction du Logement et de l'Habitat (DLH)

Porosité d'une vieille colonne en fonte d'eau usée



© Direction du Logement et de l'Habitat (DLH)

Fuite d'eau émanant des pièces d'eau



© Direction du Logement et de l'Habitat (DLH)

Porosité d'une vieille colonne en fonte d'eau usée



© Direction du Logement et de l'Habitat (DLH)

Fuite d'eau provenant de l'étage supérieur ainsi que de la salle d'eau



© Direction du Logement et de l'Habitat (DLH)

Développement de champignon dans un salon dû à l'humidité

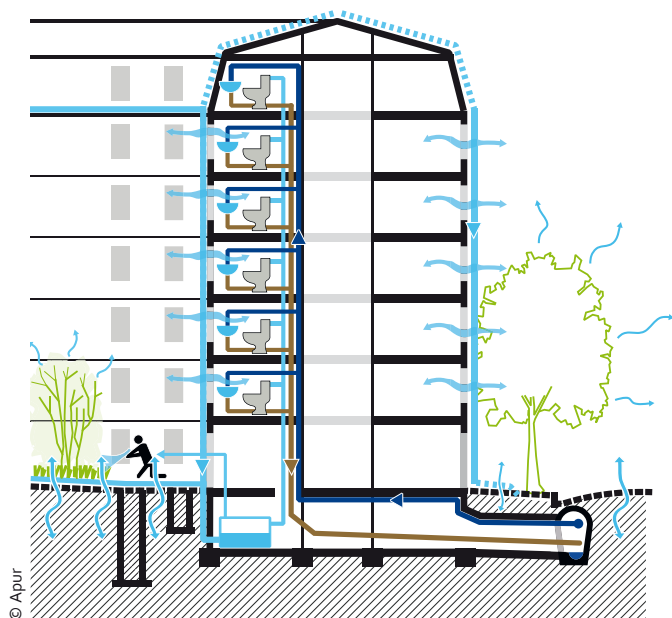
Préconisations

Vers un libre cheminement de l'eau

L'imaginaire de l'eau en ville et des désordres qu'elle génère doit évoluer et l'expérimentation peut permettre de repenser des cycles de l'eau différents tout en tenant compte de l'héritage en matière d'ingénierie urbaine.

Les méfaits des peintures étanches sont aujourd'hui bien connus. Depuis 20 ans, leur utilisation est proscrite et des peintures dites microporeuses sont dorénavant utilisées. Elles permettent à la vapeur d'eau de circuler librement (humidité dans l'atmosphère, activités des occupants...). Les murs doivent « respirer ».

La perméabilité des sols doit être abordée dans le même esprit. Permettre à l'eau de s'infiltrer, c'est aussi lui permettre de s'évaporer. L'apport de végétation peut renforcer cette « évacuation » naturelle (évapotranspiration) tout en apportant des agréments (plaisir et confort) indéniables pour les riverains. Nombre de copropriétaires sont d'ailleurs prêts à assumer les charges d'entretien que ces espaces plantés peuvent représenter, quand ils ne prennent pas plaisir à jardiner eux-mêmes.



© Apur

L'eau et le bâti, coupe de principe, demain

— Eau pluvie — Eau potable — Eau usée



© Apur

Passage Lhomme, Paris 11e

Désimperméabiliser les cours

Les sols des parties privatives non couvertes, peuvent favoriser l'infiltration par la mise en œuvre de matériaux poreux, de pavés engazonnés/sablés...

Des plantations sur cours, ou sur rue lorsque cela est possible, peuvent être envisagées, plus largement. Elles peuvent exister en pleine terre, ou en jardinières.

Les plantations en pied de façades se rencontrent couramment à Paris même si elles sont moins fréquentes que dans des villes comme Amsterdam ou Anvers par exemple.

Stocker et réutiliser

Le stockage des eaux pluviales dans les cuves enterrées, implantées dans les cours d'immeubles, dans les sous-sols ou en terrasse... peut permettre des économies d'eau potable destinées à l'arrosage et au nettoyage des parties communes. Une alimentation d'appoint pourrait aussi être envisagée avec le réseau d'ENP.

Hormis la réduction des volumes d'eau acheminés en égout, ces propositions sont susceptibles de renforcer les liens sociaux entre les habitants et de lutter contre les conséquences des phénomènes caniculaires en été.



© Apur

Pieds d'immeubles plantés, cour pavée perméable, Paris 4e

II- UNE GESTION PRATIQUE DE L'EAU PLUVIALE

Cette partie a pour objectif de dégager des pistes de gestion alternative des eaux pluviales (EP) à Paris. Elle découle de l'hypothèse que, malgré le faible renouvellement des espaces publics et privés de la capitale, des actions sont possibles au-delà des seules opérations d'aménagement, des travaux neufs ou des opérations lourdes de réhabilitation visés par le plan de zonage pluvial pour Paris.

Les hypothèses de transformation diffuse de l'existant permettent de comparer différentes approches de gestion des EP, de combiner différentes solutions et de tester l'efficacité d'« hybridations » de techniques, de manière à tendre vers un objectif de « zéro rejet ».

Dans un premier temps, ces techniques ont été appliquées à des quartiers différents, représentatifs des morphologies parisiennes, et à une parcelle type. Ces exemples permettent d'approcher plus globalement les manières d'optimiser l'utilisation de la ressource en eau et de montrer dans quelle mesure le principe de « zéro rejet » pourrait être atteint à Paris. Le gain en matière d'abattement de pluie est quantifié pour chaque technique, selon une même méthode. Des modes de calcul simplifiés sont aussi proposés, de manière à permettre une généralisation et une réutilisation de cette approche.

Dans un second temps, un « inventaire » de techniques a été réalisé. Ces techniques, accompagnées de préconisations de mise en œuvre et de gestion, portent à la fois sur les voies publiques (pour différents profils représentatifs des voiries parisiennes) et sur les espaces privés (toitures et sols de cœurs d'îlots). Seuls les techniques et ouvrages susceptibles d'être adaptés au contexte parisien ont été retenus.

1- DES QUARTIERS : ÉTUDE DE CAS

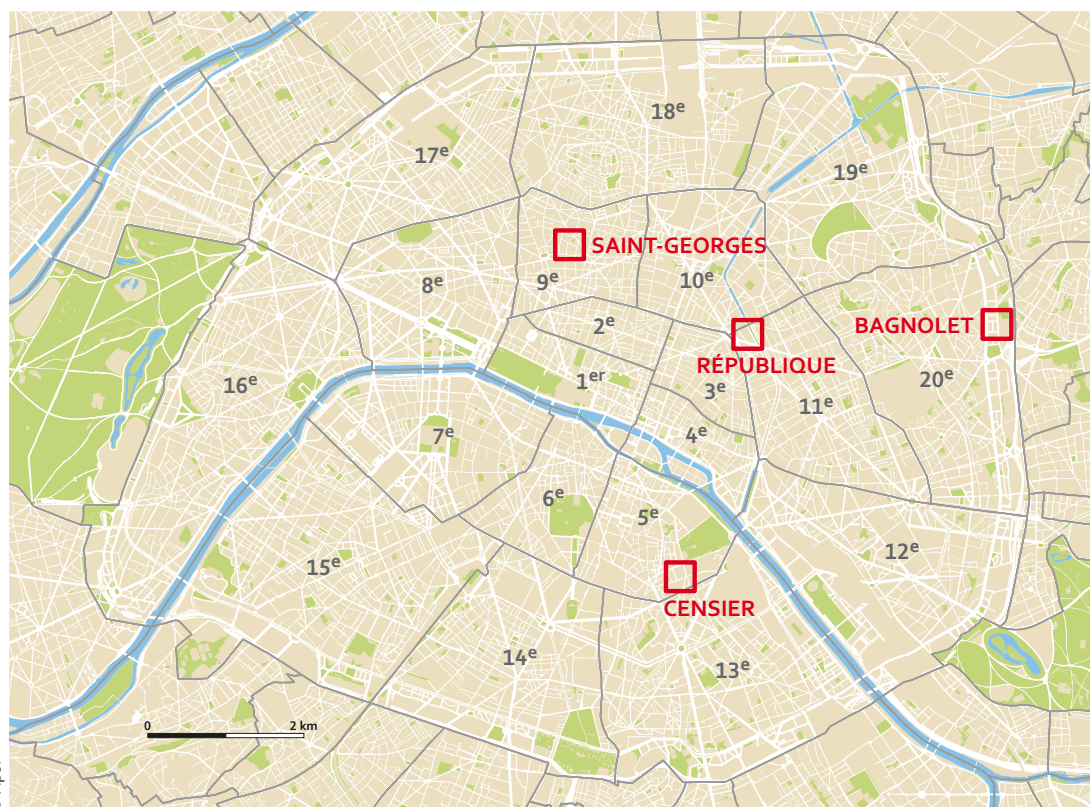
Dans cette partie, il s'agit également de s'intéresser à une transformation diffuse du territoire parisien et donc d'accroître potentiellement les performances du Plan Pluie à Paris, celui-ci visant essentiellement les opérations neuves ou les réhabilitations lourdes. L'enjeu est également de permettre d'envisager des expérimentations possibles mobilisant des acteurs multiples : maîtres d'ouvrage publics et privés, bailleurs sociaux, OPHA, copropriétaires...

La sélection des sites a été faite selon plusieurs critères. Concernant les questions morphologiques, une approche cartographique a été élaborée afin de préciser les contextes urbains en termes de densité d'occupation bâtie, de taux de recouvrement du bâti et de la végétation à la parcelle, de strates de plantations des espaces publics et privés, de phénomènes d'îlots de chaleur urbains (repérage des rues « chaudes » en été), de la présence ou non d'équipements... (voir le récapitulatif en annexe). Les secteurs retenus offrent aussi une diversité représentative des formes bâties produites dans le temps : le XIX^e siècle, et avant, pour les secteurs **République** (11^e arrondissement) et **Saint-Georges** (9^e arrondissement), le début du XX^e siècle pour l'ensemble HBM au nord de la porte de **Bagnolet** (20^e arrondissement), la seconde moitié du XX^e siècle pour l'ensemble sur dalle de **Censier** (5^e arrondissement).

Le sous-sol a aussi été pris en compte, en particulier : les données de l'Inspection Générale des Carrières (IGC), retenues dans le cadre du Plan Pluie à Paris (présence de gypse, secteur à débit limité), les réservoirs de chasse en service ou condamnés, des puits figurant dans le plan dit de Vasserot (début XIX^e siècle). Pour ces derniers, malgré les visites de terrain, aucun n'a pu être observé. Les puits n'ont donc pas pu être pris en compte comme exutoires possibles des EP.

Comme indiqué précédemment, cette approche par scénarios ne se limite pas aux préconisations actuelles du Plan Pluie à Paris, tant en termes de techniques à mettre en œuvre, qu'en termes d'abattement. L'hypothèse retenue est de réduire au maximum les rejets d'EP au réseau d'assainissement. Néanmoins, les performances atteintes sont toujours référées aux préconisations par secteurs du Plan Pluie, mais aussi, plus largement, à l'abattement du volume annuel de l'année de référence. Un tableau, des plans et des coupes synthétisent les résultats à la fin de chaque secteur. Des croquis et des photomontages illustrent également les transformations envisagées.

En dehors de ces quatre secteurs, une parcelle parisienne type est également étudiée. L'objectif est ici de s'intéresser plus particulièrement aux résultats susceptibles d'être atteints en appliquant les orientations de l'article 13 du PLU. Mais, là encore, une diversité de solutions est toujours recherchée (végétalisation, infiltration, recyclage, mutualisation).

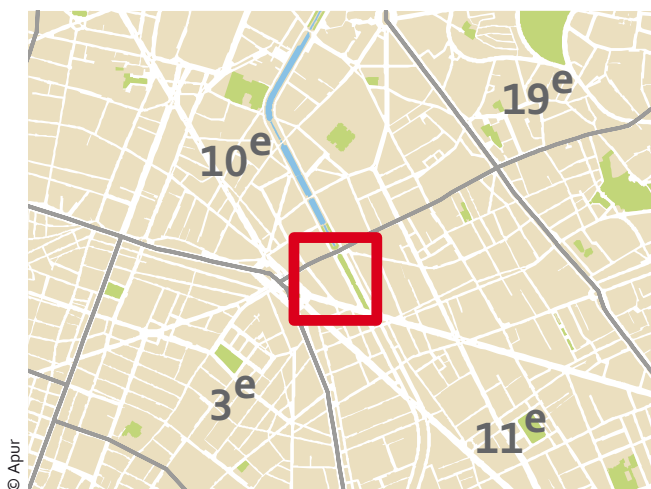


© Apur

Localisation des secteurs étudiés

1- DES QUARTIERS : ÉTUDE DE CAS

SECTEUR RÉPUBLIQUE



Descriptif

Ce secteur est situé près de la place de la République, dans le 11^e arrondissement, le long du canal de l'Ourcq (boulevard Jules Ferry) entre l'Avenue de la République et la rue du faubourg du Temple. L'étude porte plus particulièrement sur le grand îlot central. L'avenue de la République possède des trottoirs larges plantés d'un alignement d'arbres. La rue de Malte, à l'ouest de l'îlot, ainsi que l'avenue de la République et la rue du Faubourg du Temple sont des espaces publics chauds en été.

Le tissu urbain est caractérisé par un ensemble bâti très dense et hétérogène aux occupations mixtes (logement, activités, commerces...). Les cours intérieures sont également de formes et de tailles très différentes : les plus grandes sont couvertes de verrières ou de dalles (parfois plantées), les autres sont le plus souvent étroites et minérales. Le sous-sol de l'îlot est investi localement par des équipements ou des parkings.

Un jardin sur dalle de 1 590 m² est situé au centre de l'îlot. Il recouvre 4 étages de parking en sous-sol et est bordé par deux immeubles à toitures-terrasses dont un de quinze étages. La toiture du 5 Avenue de la République (650 m²) est référencée dans l'étude de l'Apur sur le potentiel de végétalisation des toitures-terrasses à Paris. Au 18 rue du faubourg du Temple, une verrière importante (450 m²) recouvre la cour donnant sur un restaurant, un théâtre et à une salle de concert, le Gibus. Le bassin-versant représente ici 2745 m².

Contexte réglementaire :

Zonage pluvial

Zone d'abattement normal des eaux pluviales

- Suppression du rejet vers égout de la pluie 8 mm ou
- Mode dégradé : abattement de 16 mm sur 55 % de la surface.

Inspection Générale des Carrières

Zone de remblais de mauvaise qualité, dont l'épaisseur est supérieure à 3 m. Une infiltration forcée à travers ces remblais pourrait entraîner des tassements différentiels touchant les ouvrages en surface. Il convient donc d'infiltrer au-delà de la base de ces remblais

- Puits d'infiltration devant atteindre la base des remblais
- Infiltration en surface, après concentration, interdite.

ÉTAT ACTUEL : rue de Malte, boulevard Jules Ferry et avenue de la République.



© Apur



© Apur

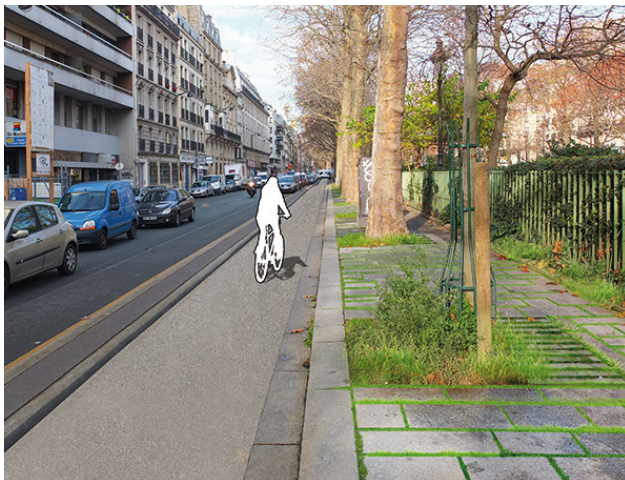


© Apur

DEMAIN : évolutions possibles des sols de l'espace public



Rue de Malte



© Apur

Boulevard Jules Ferry



© Apur

Avenue de la République

Atouts

- Présence de quelques toitures-terrasses végétalisées ou susceptibles de l'être.
- Les surfaces importantes de toitures permettent d'envisager un recyclage de l'eau de pluie, particulièrement pour les sanitaires, mais aussi pour l'arrosage des espaces plantés, le nettoyage des parties communes ou le lavage des voitures (lié au parking rue de Malte).
- Secteur inscrit dans le cadre de l'OPAH 2D2E qui prévoit la récupération de l'eau de pluie (Opération programmée de rénovation de l'habitat « développement durable et économies d'énergie »).

Contraintes

- Forte densité du bâti
- Nombre important de copropriétés (mais OPHA 2D2E en cours)
- Nombreux toits traditionnels, peu adaptés à une végétalisation. Ces toits représentent 87 % de la superficie totale des toitures, soit 50 % de la superficie totale de l'îlot.
- Sous-sols de certaines cours intérieures non connus (présence potentielle de caves et/ou de parkings).
- Trottoirs peu larges et parfois sous-dimensionnés par rapport à leur utilisation (rue du Faubourg du Temple notamment).

Propositions

Les sols

Des dispositifs types revêtements poreux ou dalles clivées, permettant une infiltration diffuse, paraissent adaptés.

Espace public

Les trottoirs et les stationnements représentent 12 % de la surface du secteur. La mise en œuvre de revêtements poreux pourrait être envisagée :

- Rue de Malte : sur les trottoirs et les stationnements.
- Rue du Faubourg du Temple, boulevard Jules Ferry et avenue de la République : sur les trottoirs et les stationnements.

Espace privé

Les cours intérieures représentent 2530 m², soit 9 % de la superficie totale de l'îlot. Pour celles qui ne sont pas sur dalle, un revêtement en pavés poreux peut être installé si les capacités d'infiltration du sol le permettent. En l'absence de connaissance de la présence de caves ou de dalles pour la plupart des cours intérieures, la mise en œuvre de ce type de revêtement n'a pas été estimée.



© Apur

Les plaisirs de l'eau

Les bassins et les miroirs d'eau dans l'espace public peuvent contribuer à rendre visible la gestion de l'eau en surface lors des événements pluvieux. Les espaces de jeux en plein air (terrains de boules) du square Jules Ferry pourraient se couvrir temporairement d'un miroir d'eau pour stocker l'eau de pluie et évoquer la présence du canal. Cette gestion en surface pourrait aussi permettre d'alimenter les arbres et arbustes bordant le square, voire d'utiliser le canal comme exutoire. Cette emprise étant située en dehors de l'îlot étudié, elle n'a pas été prise en compte dans les calculs.

Le végétal

Espace privé

Un grand jardin sur dalle existant de 1 590 m² (6 % de la surface de l'îlot), dont la hauteur de substrat est de 50 cm environ, est quasiment autonome en matière de gestion des eaux pluviales (abattement de près de 100 % du volume annuel précipité).

Un autre petit jardin sur dalle existant permet également un abattement significatif des EP (surface déjà aménagée d'environ 215 m²).

Les jardins terrasses existants sont partiellement végétalisés, avec des jardinières. L'abattement est fonction de l'emprise de la végétation.

Des toitures végétalisées pourraient être implantées sur 2 105 m², ce qui correspond à 13 % de la surface des toits. Ils seraient donc autonomes pour les pluies courantes.



© Apur

Photomontages du terrain de pétanque du square Jules Ferry devant l'avenue de la République par temps sec et temps de pluie



© ATM

Végétation en cœur d'îlot boulevard Jules Ferry



© ATM

Végétation en cœur d'îlot, rue du Faubourg du Temple



© ATM

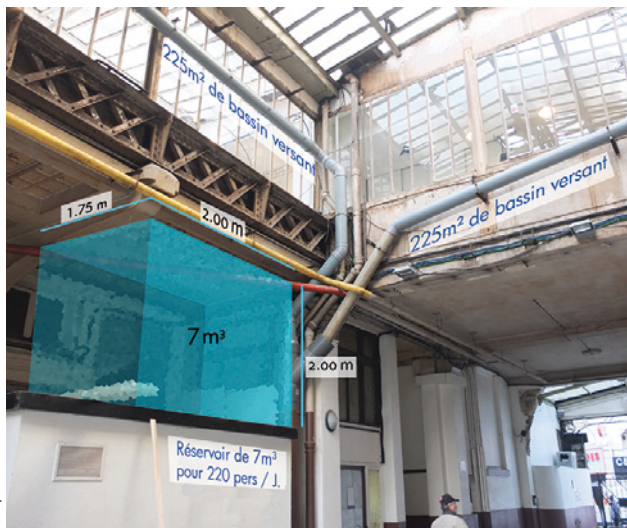


La réutilisation

Sanitaires

À l'échelle de l'îlot, la surface de toits traditionnels récupérables pour un usage domestique est de 13 712 m², ce qui peut permettre l'alimentation des sanitaires de 4 400 personnes (pour une surface d'apport de 3,1 m² par personne) avec pour objectif d'abattre une pluie de 8 mm.

Comme nous l'avons vu, à Paris, la récupération des eaux de pluie pour les sanitaires est particulièrement adaptée à des lieux fréquentés (voire partie sur la récupération dans une cuve de stockage, l'exemple de sanitaires). Pour cet îlot, la présence d'une salle de concert, d'un restaurant et d'un théâtre illustre bien cette idée. En effet, pour récupérer les eaux de pluie de la verrière de 450 m² du 18, rue du faubourg du Temple située au-dessus du Gibus et les réutiliser une cuve de stockage de 7 m³ serait nécessaire (7 m³ correspond à une surface d'apport de 1,6 m²).



Porche du Gibus, Paris 10^e - Simulation de la cuve de 7 m³ dans son contexte

Arrosage et nettoyage

De nombreux espaces plantés sont présents en cœur d'îlot et nécessitent donc un arrosage régulier durant la période estivale. Certains toits, de par leur disposition, leur pente et leur proximité avec un jardin, pourraient permettre un recyclage des EP pour l'arrosage de ces espaces plantés. Ces toits représentent environ 550 m² (3,4 % des toits).

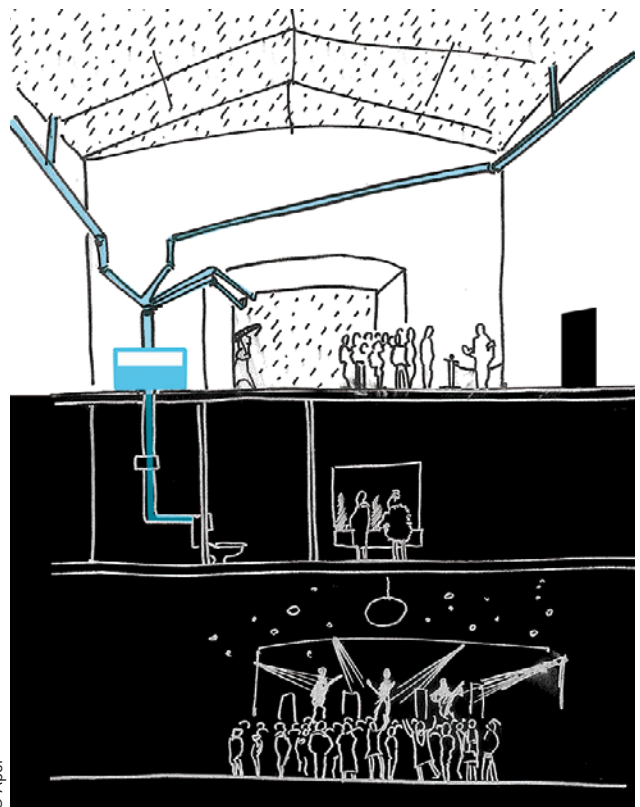
Les eaux pluviales récupérées pourraient aussi être utilisées pour le nettoyage des parties communes et par un parking public souterrain existant au 50 rue de Malte. Ce parking possède une aire de lavage de voitures, lavage qui est aujourd'hui réalisé à sec. Une partie des volumes non affectés aux sanitaires pourrait aussi répondre à ces usages.

Les réservoirs de chasse

Ils ne sont pas pris en compte sur ce secteur car les plus proches de l'îlot sont déjà alimentés par le réseau d'ENP.

Les puits :

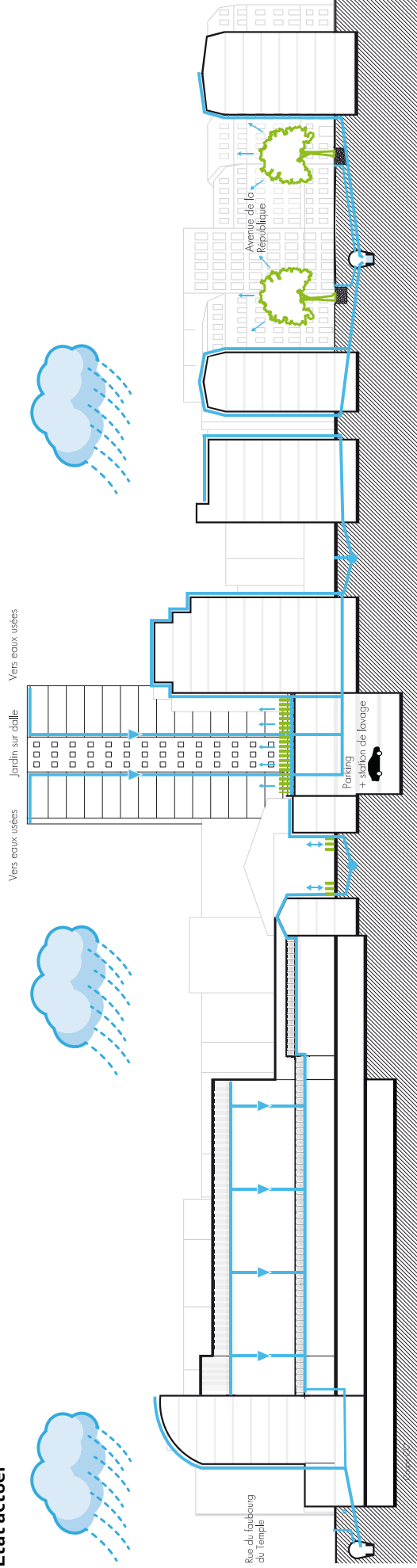
Un puits semble avoir existé à l'époque du plan de Vasserot (XIX^e siècle), mais il n'a pas pu être retrouvé sur place.



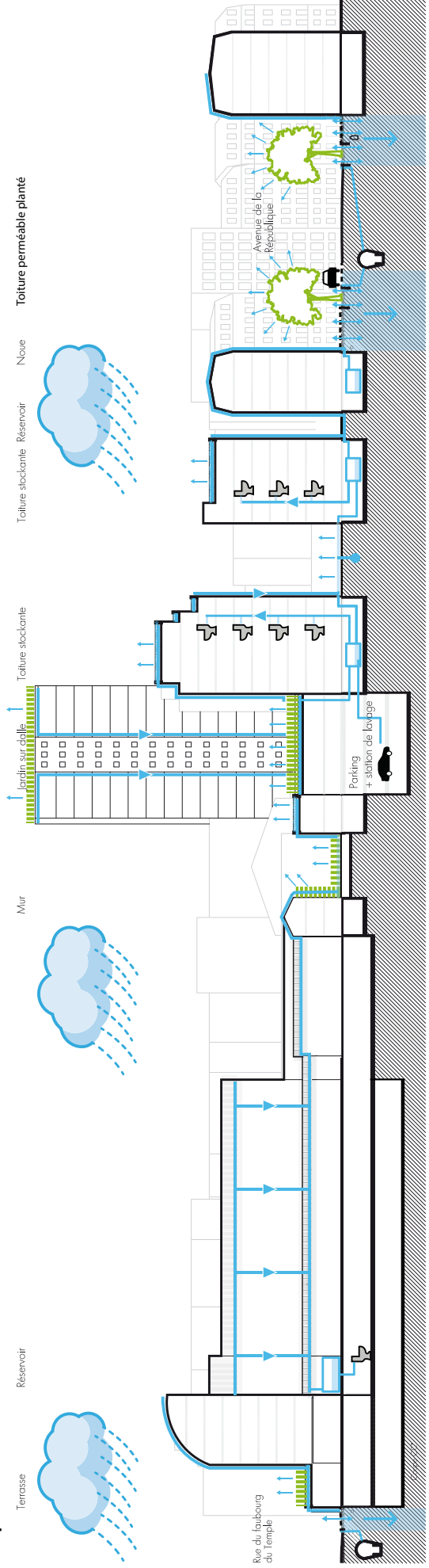
Dessin de principe du Gibus dans son contexte.

Synthèse graphique et quantitative des propositions

État actuel



Proposition



Plan de l'existant : bassins-versants, espaces bâtis et non bâtis



Légende

- Limite de secteur
- Bassins versants et superficie 823
- Réservoir de chasse : en service / condamné ■ ■
- Puits Vasserot ●

Espace public

- Canal couvert
- Rue chaude
- Arbre ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●

Existant Projet

- Trottoirs
 - pavés engazonnés
 - revêtement poreux
- Stationnement
 - revêtement poreux
- Terrain jeux stockage en surface

Espace privé

- Toits Réutilisation (santaire, arrosage, nettoyage...)
- Cours : sur dalle / autre pavés engazonnés
- Toiture plate à fort potentiel de végétalisation
- Jardin sur dalle (50 cm)
- Jardinières sur toiture
- Jardin en pleine terre

Plan de l'état projeté

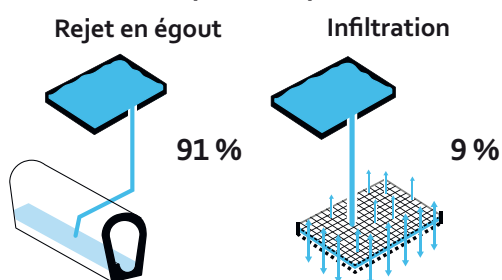


Tableau récapitulatif des propositions :

	Solution technique	Implantation et dimensionnement	Bassin-versant récupéré (m ²)	Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré		Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)
				%	mm	
Espace public	Enrobé ou béton ou résine drainant	Sur le trottoir et le stationnement le cas échéant. Dimensionnement selon solution retenue et utilisation	3 082	> 100%	86,5	100%
	Pavés ou dalles à joints engazonnés ou sablés	Sur une partie du trottoir avenue de la République	292	23%	4	70%
	Surface non abattue (chaussée)	X	2 902	0%	0	0%
	TOTAL PUBLIC		6 276	50%	42,5	52%
Espace privé	Recyclage pour les sanitaires	Cuve de 25L par personne, récupération de 3,1 m ² par personne	13 712	50%	8	98%
	Toitures végétalisées	20 cm de substrat	2 105	100%	16	100%
	Jardins en pleine terre	pleine terre	433	> 100%	48	100%
	Jardins sur dalle	50 cm de substrat	1 805	> 100%	32	100%
	Jardinières existantes sur terrasse	Abattement de 100 % de la pluie sur la superficie de la couverture végétale, estimée à 33 %	316	33%	5	33%
	Surface non abattue (cours intérieures sur dalle)	X	2 528	0%	0	0%
	TOTAL PRIVÉ		20 899	54%	10,5	87%
TOTAL GÉNÉRAL			27 175	53%	18	78%

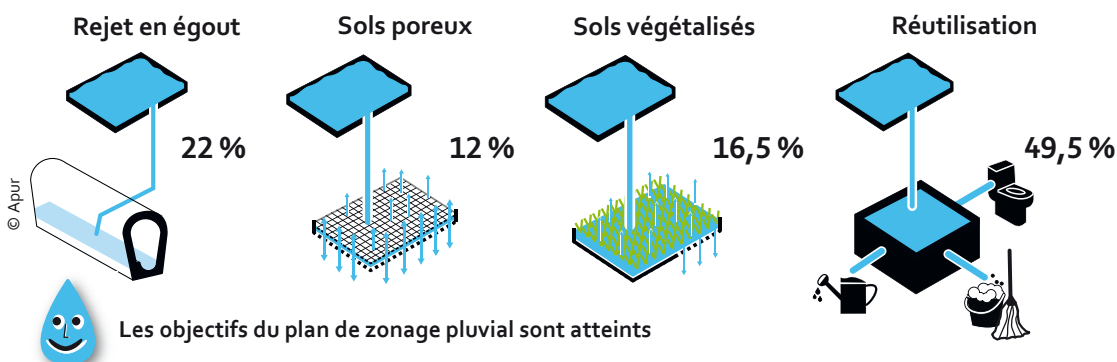
© ATM

État existant (public et privé)



Les objectifs du plan de zonage pluvial ne sont pas atteints

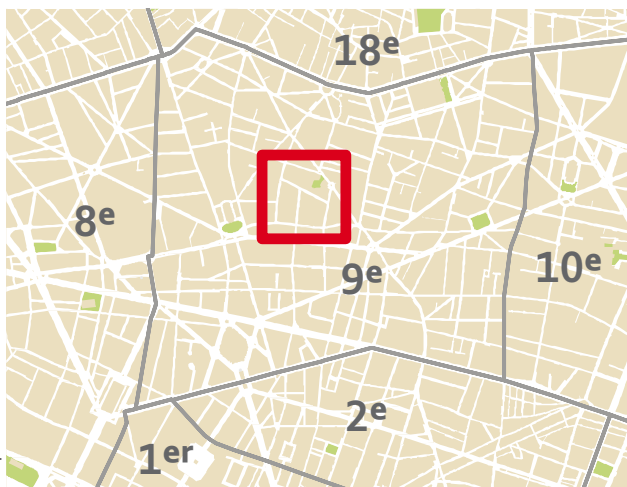
État projeté (public et privé)



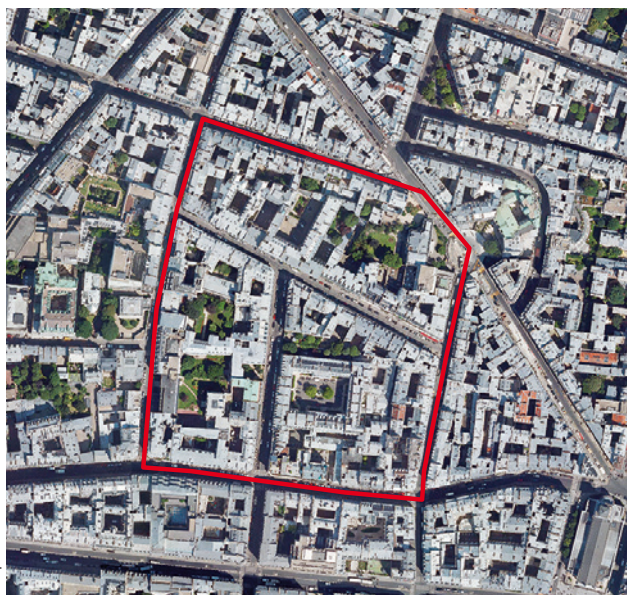
Les objectifs du plan de zonage pluvial sont atteints

1- DES QUARTIERS : ÉTUDE DE CAS

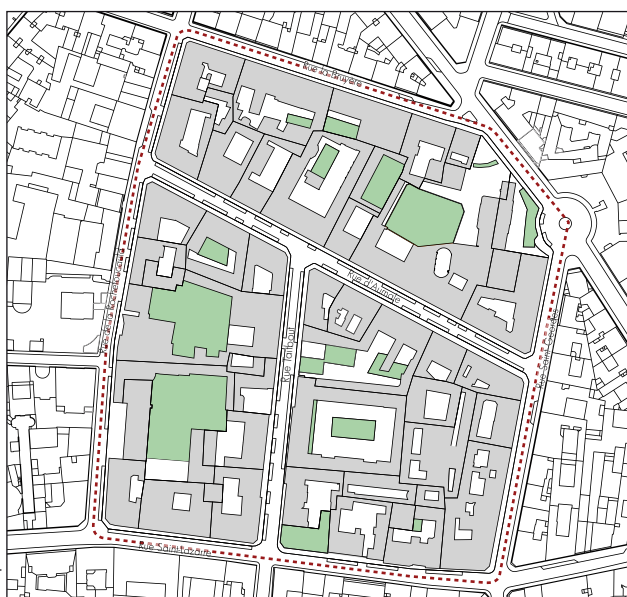
SECTEUR SAINT-GEORGES



© Apur



© Apur - InterAtlas



© Apur

Descriptif

Situé dans le tissu dense du 9^e arrondissement, ce secteur s'intéresse à trois îlots entre la place Saint-Georges et la rue Saint-Lazare. La rue La Bruyère, la rue Taitbout, la rue Saint-Georges et une partie de la rue Saint-Lazare sont considérées comme des rues chaudes en été. Ce secteur représente de fortes similitudes avec celui de République. Plutôt qu'une étude de détail, il a semblé préférable de noter les similitudes entre ces deux tissus constitués (voir le tableau page suivante).

Contexte réglementaire

Zonage pluvial

Zone d'abatement normal des eaux pluviales

- Suppression du rejet vers égout de la pluie 8 mm ou
- Mode dégradé : abatement de 16 mm sur 55 % de la surface

Inspection Générale des Carrières

Zone sensible, liée à la présence d'anciennes carrières de calcaire grossier ou de poches de dissolution de gypse antéluvien où des infiltrations profondes pourraient entraîner des désordres mettant en danger la stabilité du sol. Les infiltrations en surfaces doivent également demeurer limitées :

- Puits d'infiltration envisageables, uniquement au-delà des horizons sensibles ;
- Infiltration en surface tolérée par noue infiltrante, bassin d'infiltration, jardin de pluie ou revêtements perméables, sous réserve d'une étude justifiant l'absence d'impact sur la stabilité du sous-sol.

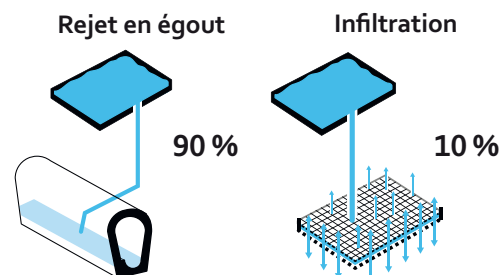
Atouts

- Espaces plantés en cœur d'îlots (10 % de la surface du secteur)
- Peu de parkings souterrains

Contraintes

- Forte densité du bâti
- Nombreux toits traditionnels, peu adaptés à une végétalisation. Ces toits représentent 55 % de la superficie totale de l'îlot.
- Trottoirs peu larges et parfois sous-dimensionnés par rapport à leur utilisation

État existant (public et privé)



Similitude avec le secteur République

% de la superficie totale du secteur	République	Saint-Georges	Commentaires
Chaussée	10,7%	9,5%	D'une façon générale, le type et la densité de bâti et d'espaces publics sont très proches.
Stationnements	2,9%	2,7%	
Trottoirs	9,5%	6,8%	
Toitures	59,4%	53,9%	
Toits traditionnels	50,5%	51,5%	Les toitures offrent plus d'opportunités d'abattement de pluie (toitures végétalisées) à République, idem pour les jardins sur dalle existants et les toits terrasse avec jardinières. Par contre, Saint-Georges offre plus d'espaces verts en pleine terre, et plus de possibilités d'abattement dans les cours intérieures (sous réserve qu'elles ne soient pas sur dalle).
Toitures « végétalisables »	7,7%	2,4%	
Cours intérieures, hors jardins sur dalle et espaces verts en cœur d'îlot	9,3%	17,5%	
Espaces verts en pleine terre existants	1,6%	6,9%	
Jardins sur dalle existants	6,6%	2,7%	République a sensiblement plus de potentiel d'abattement par évapotranspiration que Saint-Georges (9,8 % de différence de surface), mais légèrement moins de potentiel concernant l'abattement par infiltration et par réutilisation (6% de différence de surface). Au total, la différence d'abattement devrait être faible, de l'ordre de 5 % maximum.
Toits terrasse existants avec jardinières	1,2%	0,6%	
Surface permettant l'abattement par infiltration	14%	16%	
Surface permettant l'abattement par évapotranspiration	15,6%	5,8%	
Surface permettant l'abattement par réutilisation	50,5%	51,5%	

Plan de l'existant : bassins-versants, espaces bâtis et non bâtis





© Apur

Les espaces publics



© Apur

Les espaces publics



© Apur

Les grands espaces libres intérieurs



© Apur

Les grands espaces libres intérieurs



© Apur

Les grands espaces libres intérieurs



© Apur

Les cours



© Apur

Les cours



© Apur

Les cours

1- DES QUARTIERS : ÉTUDE DE CAS

SECTEUR BAGNOLET



Descriptif

L'étude de ce secteur se concentre sur deux îlots de logements symétriques au nord de la Porte de Bagnole dans le XX^e arrondissement, entre le Boulevard Mortier, à l'ouest, et la rue Le Vau, à l'est. Ils font partie de la ceinture de HBM de Paris.

Les immeubles en brique délimitent des cours intérieures reliés entre elles par des espaces de circulation bordés de jardinières. Des toitures-terrasses non accessibles aux habitants offrent un panorama vers Paris et les villes de Bagnole et de Montreuil.

Cet ensemble de logements sociaux est géré par la RIVP.



Contexte réglementaire

Zonage pluvial

Zone d'abatement réduit des eaux pluviales

- Suppression du rejet vers égout de la pluie 4 mm ou
- Mode dégradé: abatement de 16 mm sur 30 % de la surface

Inspection Générale des Carrières:

Zone très sensible, liée à la présence de gypse ludien ou toute infiltration forcée pourrait entraîner des phénomènes de dissolution mettant en danger la stabilité du sol:

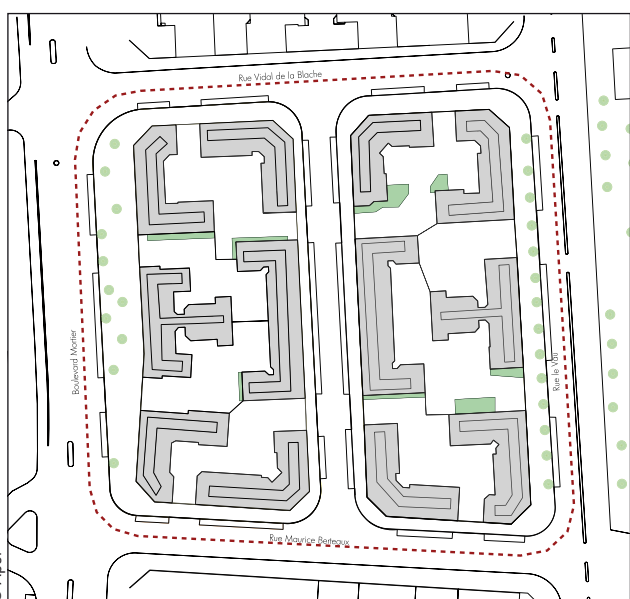
- Puits d'infiltration envisageables, uniquement au-delà des horizons sensibles
- Infiltration en surface, après concentration, interdite

Atouts

- Des grands espaces libres à fort potentiel en cœur d'îlots
- Pas de parkings souterrains, ni a priori de sous-sol sous les cours
- Toits terrasses: 100 % des toits, soit 29 % de la superficie totale du secteur
- Larges trottoirs aménageables

Contraintes

- Peu d'espaces plantés de pleine terre



Propositions

Les sols

Des dispositifs de type revêtements poreux sont proposés pour garantir une infiltration diffuse.

Espace Public

À l'état actuel, les trottoirs et les stationnements représentent 24 % de la superficie totale du secteur. Nous proposons sur ce secteur la mise en place de :

- revêtements poreux sur les trottoirs et stationnements : rue Stanislas Meunier, rue le Vau, rue Maurice Berteaux, rue Vidal de la Blache, boulevard Mortier
- pavés à joints engazonnés sur une partie des trottoirs (sur 661 m² soit 17 % de la surface des trottoirs) : rue le Vau et boulevard Mortier.

Espace Privé

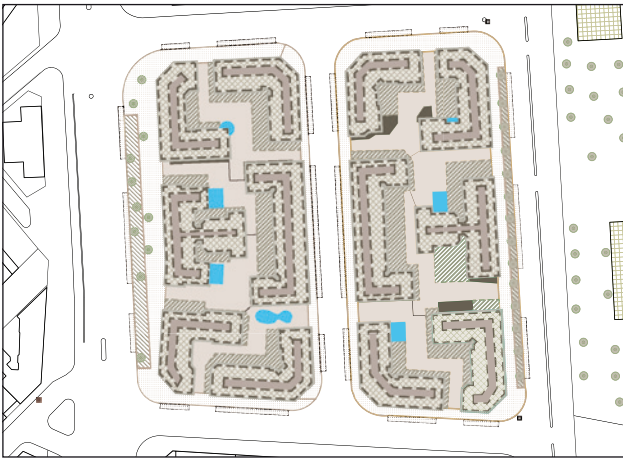
Les cours intérieures, sans leurs espaces plantés, représentent 27 % de la superficie du secteur. Des pavés à joints engazonnés peuvent être mis en place autour des bâtiments afin de limiter le ruissellement de l'eau. Ils occuperaient une surface de 1 453 m², soit 29 % de la surface des cours intérieures. L'infiltration est diffuse au niveau des pavés à joints engazonnés.

Les plaisirs de l'eau

Par un travail sur le nivellement et la création de caniveaux, il est possible de gérer le ruissellement de l'eau de pluie. Celle-ci peut être acheminée vers des zones de stockage et d'infiltration



Revêtement poreux sur la rue Le Vau, photomontage Apur



Plan de nivellement et de bassin dans les cours intérieures



État actuel



État proposé : un bassin de récupération d'eau de pluie
Photomontages Apur



Récupération d'eau par temps de pluie



Récupération d'eau de pluie après un événement pluvieux



© Apur

Végétation des cours privées



© Apur

Végétation des cours privées



© ph.guignard@air-images.net - Apur

Toitures plantées, photomontage Apur

au sol. Ces bassins minéraux peuvent ainsi participer au paysage des cours en récupérant les eaux de pluie. Les habitants voient ces bassins se remplir en fonction des précipitations. 7 bassins de ce type peuvent être mis en place.

Ces bassins peuvent permettre à l'eau de s'infiltrer dans le sol en passant par une sous-couche de grave. Cette sous-couche est d'une superficie plus importante que le bassin minéral afin d'augmenter la surface d'infiltration. Ainsi, les eaux pluviales des cours qui ne s'infiltrent pas dans les espaces plantés et les pavés à joints engazonnés ruissellent jusque dans ces bassins pour ensuite s'infiltrer de manière plus diffuse.

Le végétal

Espace Privé

Il est possible de multiplier les espaces plantés afin d'apporter de la qualité au cadre de vie des habitants et de favoriser une infiltration diffuse et l'évapotranspiration.

Investir les toitures-terrasses

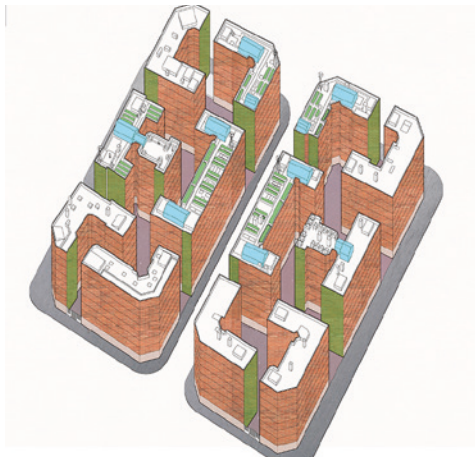
La morphologie du bâti peut favoriser l'accessibilité aux toitures-terrasses. Des jardins partagés ou des potagers pourraient dessiner une cinquième façade plantée accessible pour les habitants. En s'inspirant de l'opération « Le Candide » rue Voltaire à Vitry-sur-Seine (maître d'ouvrage : OPH Vitry-sur-Seine, maître d'œuvre : Bruno Rollet), il est possible d'imaginer des toitures équipées d'éoliennes qui pomperaient l'eau de pluie stockée en sous-sol dans les caves. Cette eau pourrait provenir des toitures, voire, si la réglementation évolue, de la surface des cours intérieures.

Les jardinières sur toiture pourraient être implantées sur 3984 m², soit 71 % de la surface des toits, qui seraient donc autonomes pour les pluies courantes. Les 29 % restant sont composés d'espaces praticables (cheminements, aires collectives) et d'espaces « fonctionnels » (ventilation, locaux techniques, éoliennes, etc.).



© Apur

Potentiel de végétalisation sur un mur pignon, photomontage Apur



© Apur

Potentiel de végétalisation sur un mur pignon

Investir les murs pignons

Si les toitures ne peuvent pas être végétalisées, il est possible de réaliser des murs végétalisés susceptibles de réduire les rejets d'eau de pluie à l'égout. Cette option est une possibilité qui n'a pas été prise en compte dans les calculs.

Étendre la place du végétal dans les cours

Les cours sont aujourd'hui équipées d'avaloirs pour collecter les eaux de ruissellement. Pour limiter les rejets en égout, l'eau de pluie s'écoulant vers les jardinières pourrait être récupérée en supprimant les bordures en béton. Ces jardinières pourraient être étendues et implantées tout autour des bâtiments sur une largeur de 50 cm. Elles pourraient récupérer les eaux pluviales des emprises des toitures non végétalisées, ce qui correspond à 29 % de la surface des toitures. Ce pourcentage pourrait être supérieur si une partie des toits terrasse ne pouvait être plantée

Plus largement, la végétation pourrait reconquérir davantage les cours en se substituant à des emprises minérales (existantes ou prévues en pavés engazonnés). Cette solution pourrait aussi compenser l'impossibilité éventuelle de ne pas pouvoir rendre accessible les toitures-terrasses végétalisées. Ce type de solution a déjà été expérimenté dans des ensembles du même type avec le soutien des bailleurs, des habitants et de réseaux associatifs.



© Apur

Jardinière dans une cour intérieure



© Apur

Nivellement envisageable pour acheminer l'eau de pluie vers la jardinière, photomontage Apur



© Mairie de Paris - DU - MCC - J. Leroy

Jardins partagés dans la Cité Rouge Mathurin Moreau, Paris 19^e



© Mairie de Paris - DU - MCC - J. Leroy



© Apur

État actuel dans une cour intérieure

Réutilisation

Arrosage et nettoyage

La réutilisation de l'eau pour l'arrosage et le nettoyage est une possibilité sur ce secteur mais n'a pas été retenue pour les calculs. De nombreux espaces plantés sont présents en cœur d'îlot et nécessitent donc un arrosage régulier durant la période estivale. Les eaux pluviales excédentaires des toits terrasses et des jardinières non accessibles au public pourraient être récupérées et stockées pour arroser les plantes en période sèche.

Les réservoirs de chasse

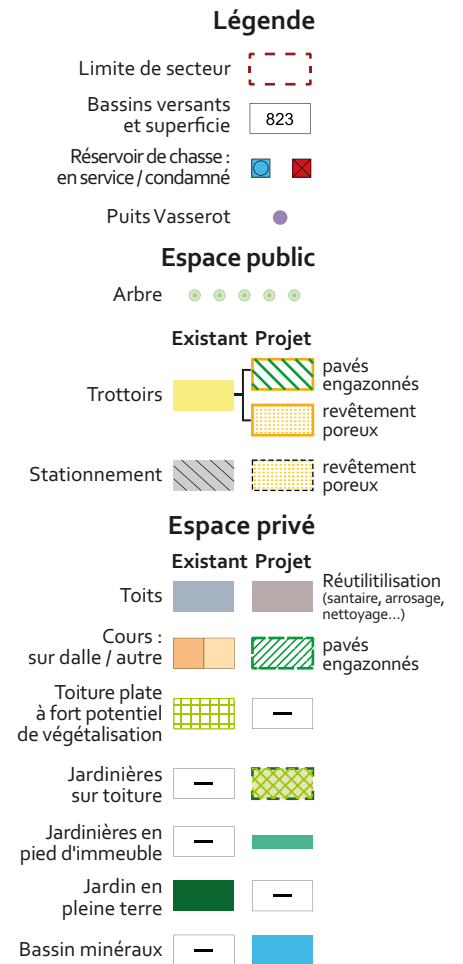
Un réservoir de chasse situé à proximité du site n'est pas en service. Il serait possible d'envoyer les eaux pluviales de la chaussée dans ce réservoir. Il s'agit d'une hypothèse de gestion des eaux pluviales de la chaussée mais elle n'a pas été prise en compte dans les calculs.



© Apur

Installation d'un réservoir et d'un potager dans une cour intérieure, photomontage Apur

Plan de l'existant : bassins-versants, espaces bâtis et non bâtis



Plan de l'état projeté

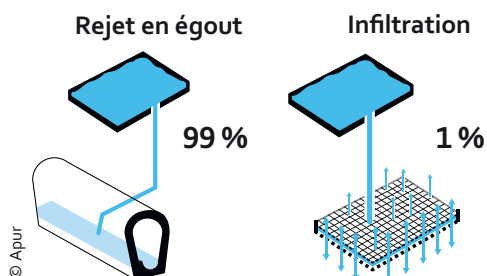


Tableau récapitulatif des propositions :

	Solution technique	Implantation et dimensionnement	Bassin-versant récupéré (m ²)	Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré		Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)
				%	mm	
Espace public	Enrobé ou béton ou résine drainant	Sur le trottoir et le stationnement le cas échéant. Dimensionnement selon solution retenue et utilisation	3 999	> 100%	86,5	100%
	Pavés à joints engazonnés	Sur une partie des trottoirs de la rue Le Vau et du bd Mortier	661	23%	4	70%
	Surface non abattue (chaussée)	X	3 559	0%	0	0%
	TOTAL PUBLIC		8 219	51%	42,5	54%
Espace privé	Jardinières sur toiture	50 cm de substrat	3 984	> 100%	32	100%
	Jardinières en pied d'immeuble	Concentration de l'infiltration de 3 en moyenne	1 619	67%	11	99%
	Pavés à joints engazonnés & bassins minéraux & espaces verts décaissés	Surface des cours intérieures	5 328	100%	16	100%
	TOTAL PRIVÉ		10 931	95%	21	100%
TOTAL GÉNÉRAL			19 150	76%	30	80%

© ATM

État existant (public et privé)

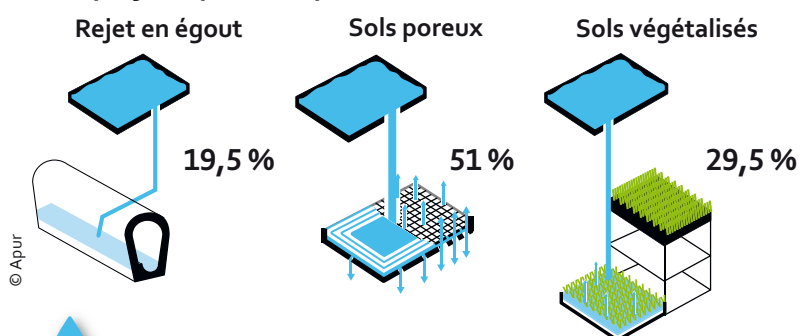


© Apur



Les objectifs du plan de zonage pluvial ne sont pas atteints

État projeté (public et privé)



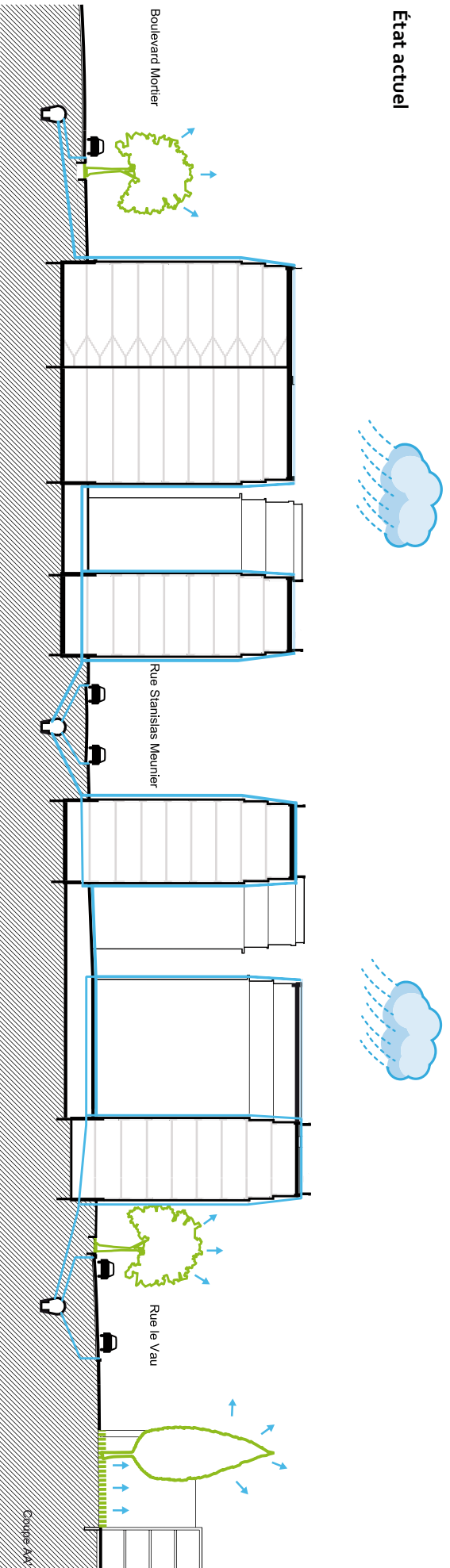
© Apur



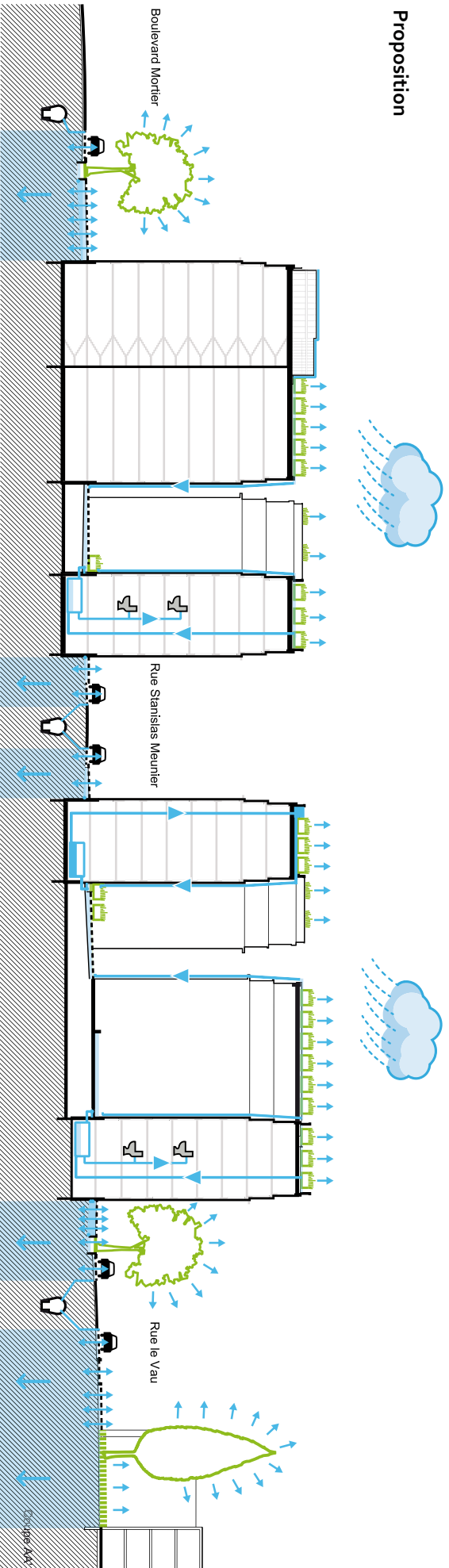
Les objectifs du plan de zonage pluvial sont atteints

Synthèse graphique et quantitative des propositions

État actuel



Proposition



1- DES QUARTIERS : ÉTUDE DE CAS

SECTEUR CENSIER



© Apur



© Apur



© Apur

Descriptif

L'étude de ce secteur se concentre sur un ensemble de logements sur dalle construit en 1962, géré par Paris-Habitat. Il est situé près du jardin des Plantes, entre la rue Censier, au nord, la rue Geoffroy Saint-Hilaire, à l'est, la rue du Fer à Moulin, au sud et la rue Santeuil, à l'ouest. Cette dernière, et une partie de la rue Censier, sont considérées comme des rues chaudes (températures dépassant les 40 °C en été).

Plusieurs barres de logements avec toits terrasses occupent cet îlot. Une crèche et un bâtiment du Crous se situent au nord-est et de nombreux commerces, restaurants et bureaux se sont installés en rez-de-chaussée.

Un projet de réhabilitation est en cours sur la partie bordant la rue Santeuil (mise en retrait des bâtiments à l'alignement) qui doit passer en zone 30.

La cour intérieure privée ainsi que les espaces publics sont très végétalisés avec de nombreuses jardinières en pied d'immeuble, des pelouses et des arbres.

Contexte réglementaire

Zonage pluvial

Zone d'abatement normal des eaux pluviales

- Suppression du rejet vers égout de la pluie 8 mm ou
- Mode dégradé: abatement de 16 mm sur 55 % de la surface.

Inspection Générale des Carrières

Zone de remblais de mauvaise qualité, dont l'épaisseur est supérieure à 3 m. Une infiltration forcée à travers ces remblais pourrait entraîner des tassements différentiels touchant les ouvrages en surface. Il convient donc d'infiltrer au-delà de la base de ces remblais:

- Puits d'infiltration devant atteindre la base des remblais
- Infiltration en surface, après concentration, interdite.

Atouts

- Les espaces plantés sur dalle permettent un abatement conséquent (environ 1 m de substrat, arbres de haute tige).
- Les toits terrasses représentent 75 % des toits, ce qui correspond à 25 % de la superficie totale du secteur.

Contraintes

- Peu d'espace sur les espaces publics (trottoirs notamment)
- Pas d'infiltration possible au niveau de la dalle.

Propositions

Les sols

Des dispositifs permettant une infiltration diffuse sont proposés (hors dalle), tels que des revêtements poreux ou des pavés à joints engazonnés.

Espace Public

Les trottoirs et stationnements représentent 11 % de la superficie totale. Nous proposons sur ce secteur la mise en place de :

- Revêtements poreux sur les trottoirs et les stationnements : rue Santeuil, rue Geoffroy de Saint-Hilaire, rue du Fer à Moulin et rue Censier,
- Pavés à joints engazonnés sur une superficie de 64 m² (3 % du trottoir) : Rue Censier.

Espace Privé

Un revêtement poreux pourrait être envisagé au niveau de la cour afin de limiter la vitesse de ruissellement des eaux pluviales. Le nivellement peut être travaillé pour conduire les eaux pluviales vers les jardinières ou les autres espaces plantés. Ces deux solutions techniques semblent difficiles et coûteuses à mettre en place et n'ont pas été retenues dans le projet.

Le végétal

Espace Privé

Les toitures végétalisées pourraient être implantées sur 7 056 m², ce qui correspond à 89 % de la surface des toits. Ils seraient donc autonomes pour les pluies courantes. Il est aussi possible de mettre en œuvre des toitures minérales qui stockent l'eau sous forme de bassins ou de miroir d'eau.

Le nivellement du sol pourrait aussi être retravaillé pour accroître la capacité de stockage des espaces plantés.



© Apur

Espaces privés en cœur d'îlot



© ATM

Rue de Santeuil



© ATM

Jardinière en pied d'immeuble de la rue Geoffroy-Saint-Hilaire



© Apur

Végétation des cours privées du cœur d'îlot



© ATM

Arbres d'alignement rue Geoffroy Saint-Hilaire



© Apur

Végétation en pied d'immeuble dans une cour privée



© Apur

Toiture état actuel



© Apur

Projet d'aménagement des toitures



© Apur

Plan des toits terrasse, état actuel



© Apur

Projet de bassins de gestion de l'eau de pluie

La réutilisation

Sanitaires

La surface de toits terrasse proposée pour la récupération d'eau de pluie à usage domestique est de 854 m² (bâtiments d'habitation situés au sud-est de la parcelle et la crèche). Cela peut permettre l'alimentation des sanitaires de 530 personnes (pour une surface d'apport de 1,6 m² par personne) avec pour objectif d'abattre une pluie de 16 mm. Des cuves d'un volume total de 13,3 m³ se répartissent entre ces bâtiments. Le volume des cuves va de 2,3 m³ à 4,3 m³, il est donc facile de s'en procurer dans le commerce.

Arrosage & nettoyage

L'eau pluviale récupérée par les toitures aurait aussi pu servir pour l'arrosage et le nettoyage de voitures par exemple. Cette hypothèse n'est pas traitée dans les calculs d'abattement.

De nombreux espaces plantés sont présents en cœur d'îlot (24 % de la superficie de la parcelle) et nécessitent donc un arrosage régulier durant les périodes sèches. Ainsi l'eau peut être récupérée à cet effet.

Un centre de nettoyage de voiture se situe sous la dalle au niveau de la rue Censier. Les lavages « haute pression » qui sont pratiqués consomment 55 L par véhicule. Une quinzaine de véhicules sont lavés chaque semaine, ce qui correspond à 825 L d'eau utilisés en moyenne. Les eaux pluviales pourraient être utilisées pour cet usage, notamment celles de la crèche située à proximité. Le besoin en eau pour le centre de lavage est de 43 m³ par an. La toiture de la crèche pourrait parfaitement fournir l'eau de nettoyage.

Les réservoirs de chasse

Deux réservoirs de chasse situés à proximité du site ne sont pas en service. Il serait possible d'envoyer les eaux pluviales de la chaussée dans ces réservoirs. Pour assurer trois chasses par jour de pluie, chaque réservoir pourrait récolter les eaux pluviales de 665 m² de chaussée. Cette option n'est pas prise en compte dans les calculs d'abattement.

Les puits

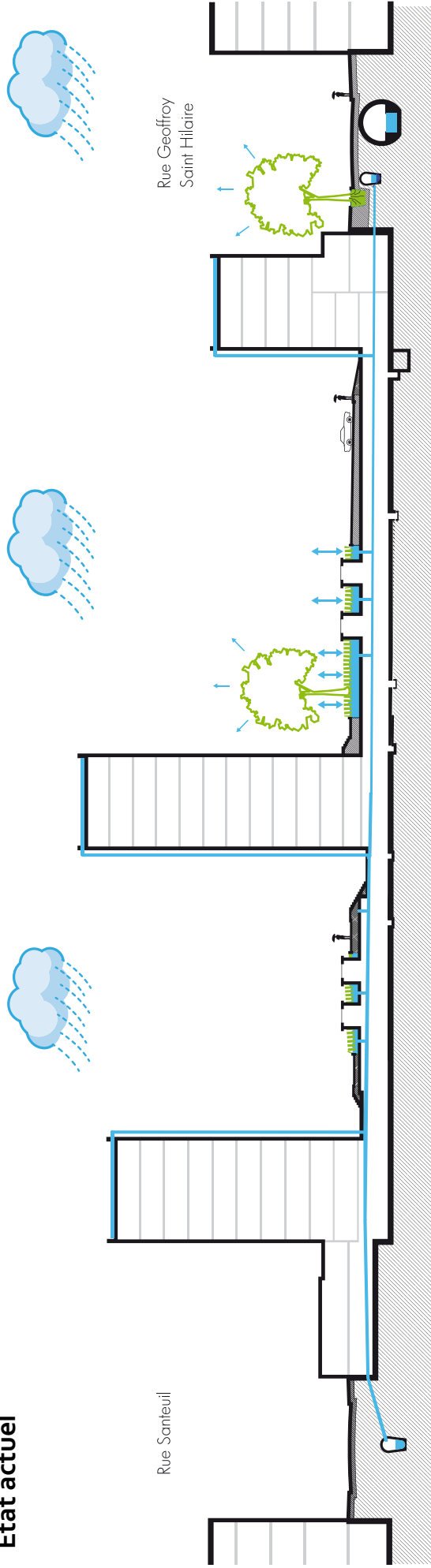
Sept puits semblent avoir existé à l'époque du plan de Vasserot (XIX^e siècle). Il est impossible aujourd'hui de les localiser.



La réutilisation de l'eau de pluie : cuve multi-usages
Vue en coupe d'un projet de réservoir dans le sous-sol du bâtiment C2

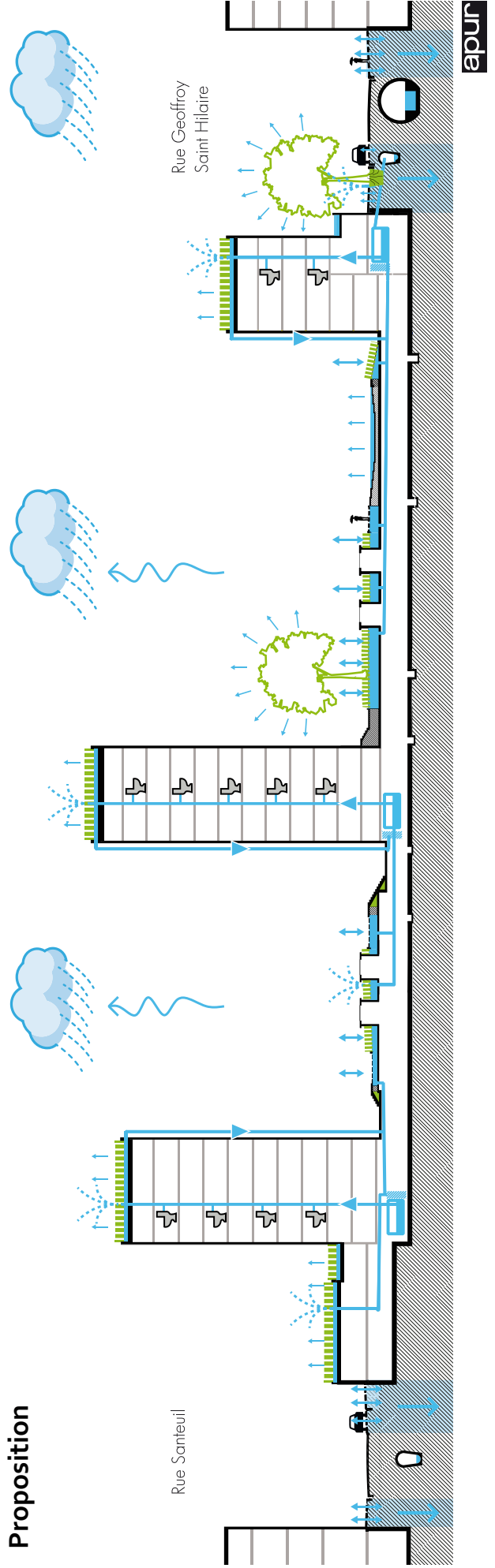
Synthèse graphique et quantitative des propositions

État actuel



apur

Proposition



Plan de l'existant : bassins-versants, espaces bâtis et non bâtis



Légende

Limite de secteur

Bassins versants et superficie

Réservoir de chasse : en service / condamné

Puits Vasserot

Espace public

Rue chaude

Arbre

Existant Projet

Trottoirs pavés engazonnés
 revêtement poreux

Stationnement revêtement poreux

Espace privé

Existant Projet

Toits Réutilisation (santaire, arrosage, nettoyage...)

Cours : sur dalle / autre pavés engazonnés

Toiture plate à fort potentiel de végétalisation

Toits végétalisés (20 cm)

Jardin sur dalle (50 cm)

Plan de l'état projeté

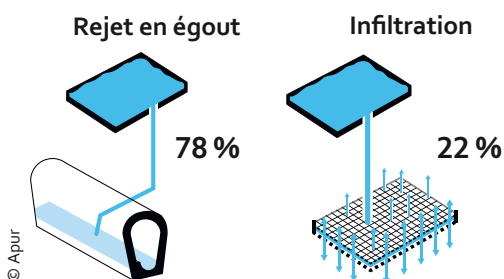


Tableau récapitulatif des propositions :

	Solution technique	Implantation et dimensionnement	Bassin-versant récupéré (m ²)	Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré		Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)
				%	mm	
Espace public	Enrobé ou béton ou résine drainant	Sur le trottoir et le stationnement le cas échéant. Dimensionnement selon solution retenue et utilisation.	2 471	> 100%	86,5	100%
	Pavés à joints engazonnés	Sur une partie des trottoirs de la rue Censier	64	23%	4	70%
	Surface non abattue (chaussée)	X	2 341	0%	0	0%
	TOTAL PUBLIC		4 876	51%	44	52%
Espace privé	Toitures végétalisées	20 cm de substrat	7 056	100%	16	100%
	Recyclage pour les sanitaires et nettoyage	Cuve de 25L par personne, récupération de 1,6 m ² par personne	854	100%	16	100%
	Jardins sur dalle	50 cm de substrat	5 737	> 100%	32	100%
	Surface non abattue (cours intérieures sur dalle)	X	5 041	0%	0	0%
	TOTAL PRIVÉ		18 688	69%	16,5	70%
TOTAL GÉNÉRAL			23 564	68%	22	69%

© ATM

État existant (public et privé)

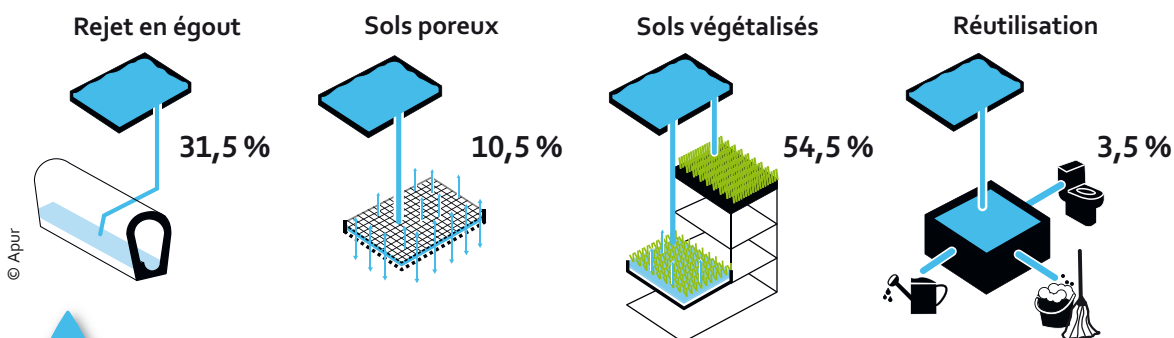


© Apur



Les objectifs du plan de zonage pluvial ne sont pas atteints

État projeté (public et privé)



© Apur



Les objectifs du plan de zonage pluvial sont atteints

1- DES QUARTIERS : ÉTUDE DE CAS

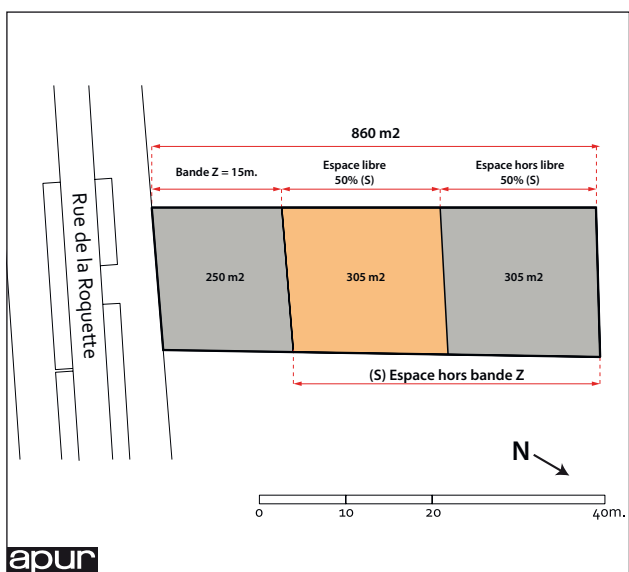
PARCELLE TYPE



© Apur



© Apur - InterAtlas



Répartition des emprises constructibles et des emprises libres

Descriptif

Les calculs de volumes rejetés ou infiltrés correspondent à une parcelle type d'un tissu constitué retenue pour cette simulation de gestion des eaux pluviales. Ce terrain correspond à une parcelle existante située au n° 87 de la rue de la Roquette (11^e arrondissement). Nous prenons comme hypothèse qu'elle fait l'objet d'un projet neuf conforme au PLU en vigueur. L'objectif est de simuler les abattements possibles d'eau de pluie au regard notamment des préconisations de l'article 13 et de comparer ensuite cet abattement à celui qu'on obtiendrait en ajoutant d'autres dispositifs de gestion des eaux pluviales (sols perméables, récupération de l'eau de pluie...).

Sur cette parcelle de 860 m², les emprises bâties peuvent atteindre 555 m² (250 m² dans la bande Z sur rue + 50% de l'emprise restante, soit 305 m²). Ils sont considérés à toits plats. L'emprise non construite hors bande Z est de 305 m².

Contexte réglementaire

Zonage pluvial

Zone d'abattement normal des eaux pluviales

- Suppression du rejet vers égout de la pluie 8 mm ou
- Mode dégradé: abattement de 16 mm sur 55 % de la surface.

Inspection Générale des Carrières

Zone de remblais de mauvaise qualité, dont l'épaisseur est supérieure à 3 m. Une infiltration forcée à travers ces remblais pourrait entraîner des tassements différentiels touchant les ouvrages en surface. Il convient donc d'infiltrer au-delà de la base de ces remblais:

- Puits d'infiltration devant atteindre la base des remblais
- Infiltration en surface, après concentration, interdite.

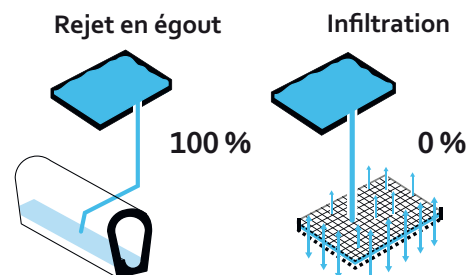
Atouts

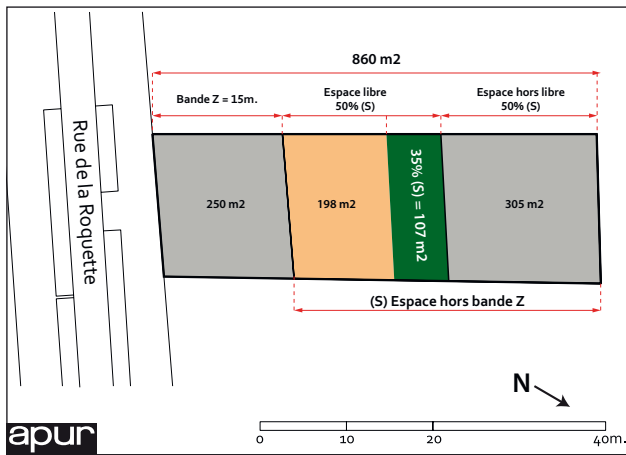
- Nombreuses toitures-terrasses
- Les surfaces importantes de toitures permettent d'envisager une végétalisation ou un recyclage de l'eau de pluie, particulièrement pour les sanitaires, mais aussi pour l'arrosage des espaces plantés ou le nettoyage des parties communes.

Contraintes

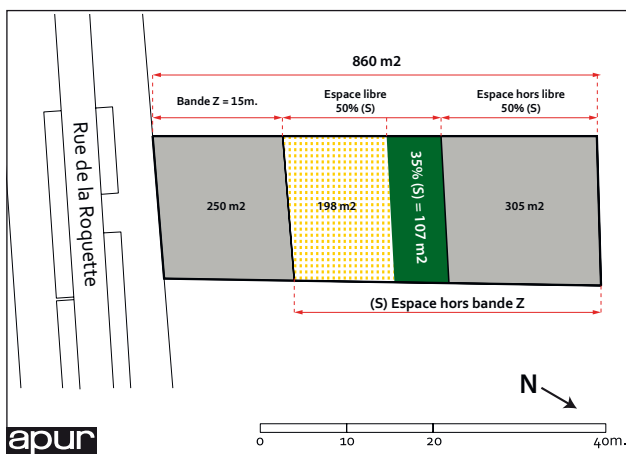
- Trottoirs peu larges et très occupés (rue commerçante).

État existant (public et privé)





Plan et schéma de l'hypothèse 1a, avec les recommandations de l'article 13 du PLU



Plan et schéma de l'hypothèse 1b, avec les recommandations de l'article 13 du PLU + autres dispositifs

Légende

- Limites du secteur
- 823 Bassins versants et superficie
- Espaces privés**
- Espaces constructibles
- Jardins en pleine terre
- Cours intérieures imperméables
- Murs végétalisés
- Cours intérieures perméables

Descriptif des 5 hypothèses

5 hypothèses de végétation ont été réalisées sur cette parcelle au regard des recommandations de l'article 13 du PLU.

Elles sont les suivantes hors bande Z :

- **Hypothèse 1a** : 35 % de pleine terre
- **Hypothèse 2** : 20 % de pleine terre + 15 % de végétation sur dalle
- **Hypothèse 3** : 20 % de pleine terre + 15 % de toitures végétalisées
- **Hypothèse 4** : 20 % de pleine terre + 15 % de mur végétalisé
- **Hypothèse 5** : 20 % de pleine terre + 15 % de surface végétalisée pondérée (espaces verts sur dalle, toitures végétalisées et murs végétalisés).

Sur ces 5 hypothèses, seules 2 seront traitées en détail avec des calculs d'abattement. Il s'agit des hypothèses 1 et 4. Les autres hypothèses, présentant des similitudes, seront étudiées par comparaison aux hypothèses 1 et 4.

Propositions

Hypothèse 1a : article 13 PLU

D'après l'article 13 du PLU, 35 % de pleine terre hors bande Z représentent ici 107 m², les autres surfaces libres occupent au minimum 198 m².

En créant cet espace vert de pleine terre d'une surface de 107 m², on obtient un abattement annuel sur le site de 12 % (voir tableau).

Hypothèse 1b : article 13 PLU + autres dispositifs

En complément des 107 m² de jardin en pleine terre, d'autres modes de gestion des eaux pluviales sur cette parcelle peuvent permettre d'augmenter l'abattement.

Les sols

Les cours intérieures représentent 198 m², soit 23 % de la superficie totale. Un revêtement en pavés poreux peut y être installé. L'abattement annuel de la pluie serait alors de 100 %.

Le végétal

Un jardin en pleine terre de 107 m² (12,5 % de la surface de la parcelle) est créé. Il est autonome en matière de gestion des eaux pluviales.

La réutilisation

À l'échelle de la parcelle, on récupère la totalité de la surface des toits pour la réutilisation sanitaire : 555 m² au maximum, ce qui permet l'alimentation des sanitaires de 179 personnes (pour une surface d'apport de 3,1 m² par personne). Une cuve de 4,5 m³ permettrait de stocker le volume d'eau nécessaire.

Conclusion

On obtient un abattement annuel de presque 100 % contre 12 % en respectant seulement les recommandations du PLU en termes de végétation. Pour assurer un abattement des eaux pluviales le plus optimal possible, il faut donc multiplier et diversifier les techniques.

Comparaison des hypothèses 1a, 1b, 2 et 3

Selon les prescriptions de l'article 13 du PLU, les hypothèses 1a, 2 et 3 sont similaires en termes d'abattement (100 % des espaces végétalisés) en considérant des hauteurs de substrat suffisamment importantes (voir détails des hypothèses dans les propositions).

En revanche, en diversifiant les techniques de gestion des eaux pluviales, on peut noter des différences :

- L'hypothèse 3 est plus efficace que la 1b car elle peut permettre de combiner toiture végétalisée, espace planté en pleine terre et revêtements poreux, l'ensemble réalisant un abattement de 100 %.
- En revanche, il n'y a pas de différence entre la 1b et la 2, car les 15 % d'espace planté ajoutés sur dalle se substituent aux sols perméables.

Tableau comparatif des hypothèses 1a et 1b

	Solution technique		Bassin-versant récupéré (m ²)		Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré				Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	
	Existant	Projet	Existant	Projet	Existant		Projet		Existant	Projet
			m ²	m ²	%	mm	%	mm	%	%
Espace de la parcelle	Jardin en pleine terre		107	107	> 100	48	> 100	48	> 100	> 100
	Surface non abattue (cours + bâtiments)		753	0	0	0	0	0	0	0
		Recyclage pour les sanitaires et nettoyage	0	555	0	0	50	8	0	98
		Pavés poreux	0	198	0	0	> 100	86,5	0	100
TOTAL			860	860	12	6	68	31	12	99

© ATM

Hypothèse : PLU modifié

La modification du PLU actuellement à l'enquête publique prévoit pour l'article 13 deux changements importants:
 1- Traiter la totalité des espaces libres en végétalisant en pleine la moitié de leur surface.
 2- L'obligation de végétaliser les emprises de toitures terrasses supérieures à 200 m² avec un substrat de 10 cm hors couche drainante.
 Les bâtiments sur rue (250 m² possibles) et sur cour (305 m²) peuvent être concernés par cette règle.
 En considérant qu'un tiers de cette surface pourrait être végétalisée, on obtiendrait un abattement de 8 mm (pour la surface végétalisée).

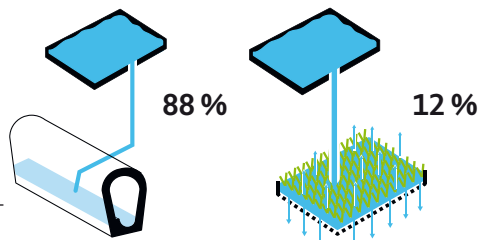


Les objectifs du plan de zonage pluvial sont atteints

État projeté hypothèse 1a

Rejet en égout

Infiltration



© Apur



Les objectifs du plan de zonage pluvial ne sont pas atteints

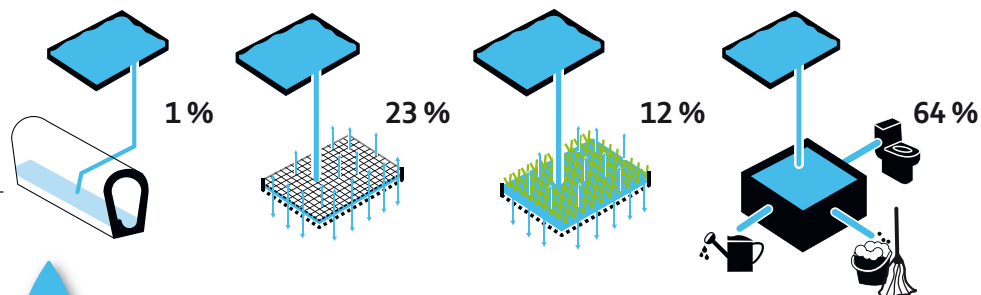
État projeté hypothèse 1b

Rejet en égout

Sols poreux

Sols végétalisés

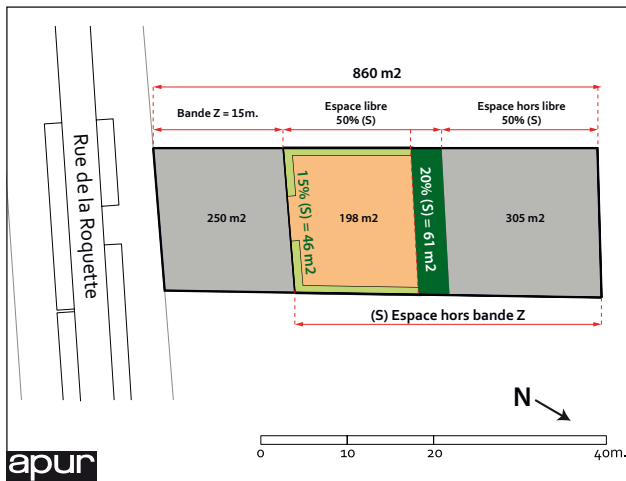
Réutilisation



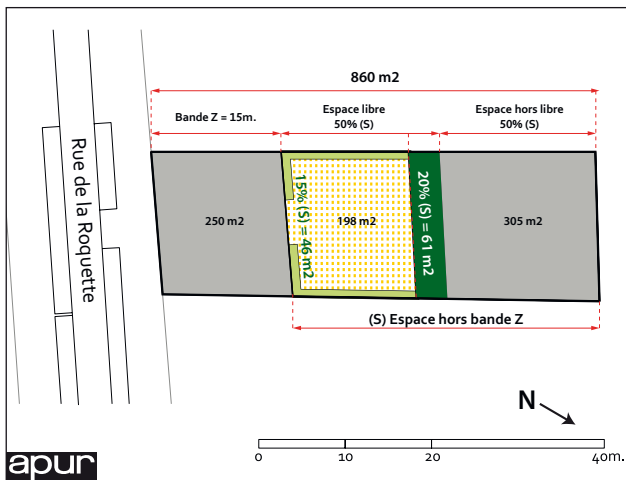
© Apur



Les objectifs du plan de zonage pluvial sont atteints



Plan et schéma de l'hypothèse 4a, avec les recommandations de l'article 13 du PLU



Plan et schéma de l'hypothèse 4b, avec les recommandations de l'article 13 du PLU + autres dispositifs

Légende

□ Limites du secteur □ 823 Bassins versants et superficie

Espaces privés

■ Espaces constructibles ■ Jardins en pleine terre
 ■ Cours intérieurs imperméables ■ Murs végétalisés
 ■ Cours intérieurs perméables

Hypothèse 4a : article 13 PLU

L'hypothèse 4 de ce secteur comprend, hors bande Z, une superficie d'espace planté en pleine de terre de 20 % (61 m²) et une superficie de 15 % de mur végétalisé (46 m²), d'après l'article 13 du PLU.

En ajoutant ces espaces plantés, on obtient un abattement annuel sur le site de 12 % (voir tableau).

Hypothèse 4b : article 13 PLU + autres dispositifs

En complément des 61 m² de jardin en pleine terre, d'autres modes de gestion des eaux pluviales sur cette parcelle peuvent permettre d'augmenter l'abattement :

Les sols

Les cours intérieures non plantées représentent 198 m², soit 23 % de la superficie totale de la parcelle. Un revêtement en pavés poreux peut y être installé (abattement de 100 %).

Le végétal

Un jardin en pleine terre de 61 m² (7 % de la surface de la parcelle) est créé. Il est autonome en matière de gestion des eaux pluviales. Des murs végétalisés ont un linéaire d'environ 40 m.

La réutilisation

À l'échelle de la parcelle, on récupère la totalité de la surface des toits pour la réutilisation sanitaire : 555 m² au maximum, ce qui permet l'alimentation des sanitaires de 179 personnes (pour une surface d'apport de 3,1 m² par personne). Une cuve de 4,5 m³ permettrait de stocker le volume d'eau nécessaire.

Conclusion

On obtient un abattement annuel de presque 100 % contre 12 % en respectant seulement l'article 13 du PLU en termes de végétation. Pour assurer un abattement des eaux pluviales le plus optimal possible, il faut multiplier et diversifier les techniques.

Comparaison des hypothèses 1a, 1b, 4a, 4b et 5

L'hypothèse 1a permet un meilleur abattement que la 4a, en effet, en termes d'abattement les murs végétalisés ne compensent pas la diminution d'espace planté en pleine terre. Cependant, en combinant les techniques, l'abattement est alors le même entre la 1b et la 4b car la perte d'espace planté est compensée par les sols poreux des cours.

Enfin, l'hypothèse 5 se situe entre la 1b et la 4b car les murs végétalisés se révèlent moins efficaces que les autres espaces plantés. En revanche, en ajoutant des sols perméables dans la 5, elle devient plus efficace que la 1b et la 4b, car des toitures végétalisées peuvent être mises en œuvre.

En fait, l'abattement des murs végétalisés est moins performant pour une pluie de 16 mm (33 % contre 100 % pour la pleine terre ou les pavés poreux). Mais cet écart est quasi nul sur l'abattement d'une pluie annuelle (1 %).

Tableau comparatif des hypothèses 4a et 4b

	Solution technique		Bassin-versant récupéré (m ²)		Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré				Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	
	Existant	Projet	Existant	Projet	Existant		Projet		Existant	Projet
			m ²	m ²	%	mm	%	mm	%	%
Espace de la parcelle	Jardin en pleine terre		61	61	> 100	48	> 100	48	100	100
	Façades végétalisées		46	46	33	5	33	5	90	90
	Surface non abattue (cours + bâtiments)		753	0	0	0	0	0	0	0
		Recyclage pour les sanitaires et nettoyage	0	555	0	0	50	8	0	98
		Pavés poreux	0	198	0	0	> 100	86,5	0	100
TOTAL			860	860	9	3,7	64	28,8	12	98

© ATM

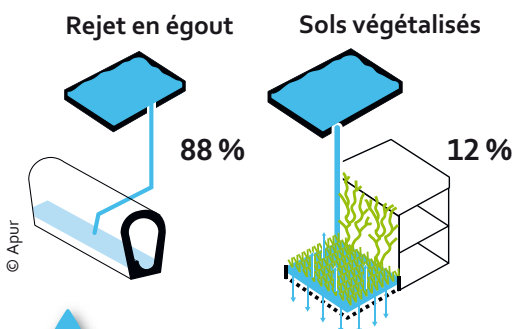
Hypothèse : PLU modifié

La modification du PLU actuellement à l'enquête publique prévoit pour l'article 13 deux changements importants :
 1- Traiter la totalité des espaces libres en végétalisant en pleine la moitié de leur surface.
 2- L'obligation de végétaliser les emprises de toitures terrasses supérieures à 200 m² avec un substrat de 10 cm hors couche drainante.
 Les bâtiments sur rue (250 m² possibles) et sur cour (305 m²) peuvent être concernés par cette règle.
 En considérant qu'un tiers de cette surface pourrait être végétalisé, on obtiendrait un abattement de 8 mm (pour la surface végétalisée).



Les objectifs du plan de zonage pluvial sont atteints

État projeté hypothèse 4a

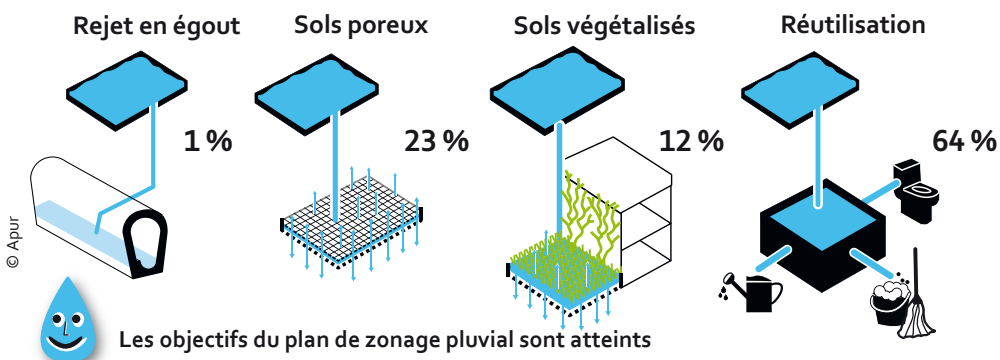


© Apur



Les objectifs du plan de zonage pluvial ne sont pas atteints

État projeté hypothèse 4b



© Apur



Les objectifs du plan de zonage pluvial sont atteints

2- L'ESPACE PUBLIC⁽¹⁾

MATÉRIAUX POREUX

ENROBÉ DRAINANT AVEC STRUTURE RÉSERVOIR

Descriptif



Exemple d'enrobé drainant au Japon

Aujourd'hui, à Paris, la plupart des chaussées sont en enrobé bitumineux, les trottoirs sont majoritairement en asphalte, et les bordures de trottoirs en granit. Ce revêtement classique, très imperméable, pourrait être remplacé par un enrobé poreux permettant l'infiltration de l'eau. La couche d'enrobé est soutenue par une couche de grave poreuse. En dessous, une épaisseur de grave assure le stockage des eaux pluviales avant leur infiltration. Ce revêtement pourrait être mis en œuvre sur les trottoirs, les pistes cyclables et le stationnement. Il pourrait aussi être mis en œuvre sur la chaussée.

L'enrobé drainant est plus résistant que la résine développée plus loin, et moins épais qu'un béton drainant pour une même résistance.

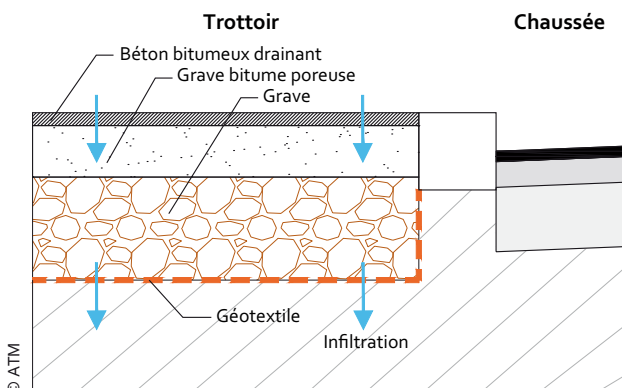
Entretien

L'enrobé peut se colmater, et nécessite donc un entretien particulier, qui comprend :

- En prévention, un hydrocurage à moyenne pression avec aspiration. Le balayage classique est à proscrire car il peut enfouir des débris dans le revêtement.
- Lorsque le colmatage du revêtement est avancé, un hydrocurage à haute pression avec aspiration.
- En hiver, le sablage et les fondants chimiques sont proscrits. Le revêtement doit être salé pour éviter la formation de verglas.

Remarque : selon le site internet de la société Sotraveer (www.sotraveer.com), spécialisée dans les travaux d'entretien en environnement routier, le décolmatage des enrobés drainants est une opération qui « *reste moins coûteuse qu'un rabotage des enrobés. [...] Cette opération est vraiment exceptionnelle* ».

Coupe de principe



Coupe de principe de l'enrobé drainant utilisé sur trottoir

Dimensionnement et excavation

Enrobé poreux	5 cm
Grave bitume poreuse	20 cm
Grave pour stockage	5 à 40 cm
Total	30 à 65 cm

Remarque : pour une concentration de l'infiltration de 1 (infiltration diffuse), une profondeur de grave d'environ 5 cm est suffisante pour le stockage et l'abattement de la pluie de 16 mm.

Exemples d'entreprises

• Eurovia	revêtement drainant Drainovia®
• Daniel Moquet	enrobé drainant noir Nerostar®
• Dubos	revêtement drainant Climatic®

(1) Pour des questions de faisabilité de réalisation des différentes solutions dans le contexte parisien, il a été décidé de ne jamais récupérer les eaux de chaussée dans les ouvrages prévus afin de préserver le coulage de caniveaux. Sur les espaces publics, seules les EP des trottoirs, des pistes cyclables et des stationnements sont ainsi récupérées. Concernant le stationnement, les seuls profils de voirie adaptés sont les profils dits en « Lincoln » car ils permettent de maintenir le coulage des caniveaux.

Avantages, inconvénients, contraintes

Avantages :

- Bonne qualité d'adhérence.
- Faible profondeur d'excavation.
- Perméabilité de l'enrobé drainant lors de la pose de l'ordre de 100 fois supérieure aux besoins en infiltration. Le décolmatage n'est donc théoriquement jamais nécessaire.
- Faible concentration de l'infiltration, voire infiltration diffuse (concentration de 1), donc peu d'impact sur le sous-sol et les fondations des bâtiments proches.
- Conservation des caniveaux, bouches de lavage existants, pas de travaux sur le réseau d'assainissement.
- Les descentes de toitures peuvent éventuellement être déconnectées du réseau et dirigées vers les tranchées.

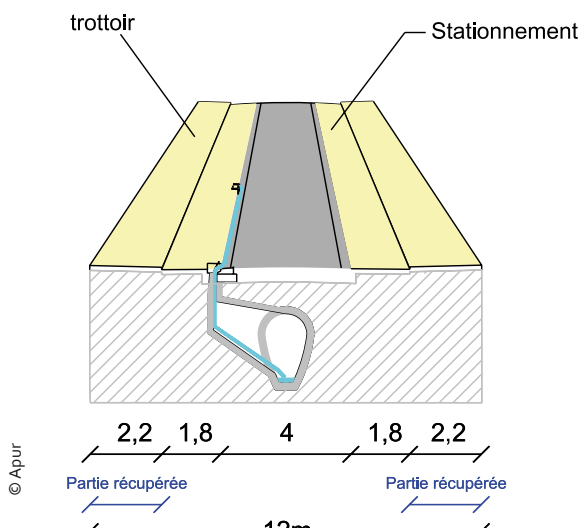
Inconvénients :

- Réparation délicate, facteur potentiellement limitant dans le contexte parisien étant donné l'encombrement du sous-sol et les travaux réguliers sur les réseaux.
- Le colmatage peut être accéléré par d'éventuels travaux à proximité.
- L'entretien par nettoyage mécanisé (balayeuse aspirante ou jet d'eau haute pression) pour limiter le risque de colmatage nécessite du matériel spécifique (mais peu coûteux).

Contraintes de mise en œuvre

- En phase de travaux, le colmatage doit être évité.
- La remise en circulation est immédiate après la mise en œuvre.

Hypothèses et simulation d'abattement



Trois cas de mise en œuvre peuvent être envisagés :

- 1 : mise en place sur trottoir uniquement - Récupération du trottoir uniquement
- 2 : mise en place sur piste cyclable ou stationnement uniquement - Récupération du trottoir et de la piste cyclable ou du stationnement
- 3 : mise en place sur trottoir et piste cyclable ou stationnement - Récupération du trottoir ou du stationnement

Les hypothèses et résultats de la piste cyclable développés ci-dessous sont valables pour le cas 3. Les résultats de simulation d'abattement sont disponibles en annexe pour les 3 cas et pour tous les types de profils.

Hypothèses pour le calcul n° 3

- Utilisation sur le trottoir et le stationnement
- Hauteur de grave choisie pour stocker une pluie annuelle
- 30 cm de grave de stockage avec 30 % de vide.

Dimensionnement et efficacité

Le tableau ci-dessous présente les résultats de simulation pour le profil C de la rue de 12 m :

Enrobé drainant avec structure réservoir - Cas 3 : Mise en place sur trottoir et sur piste cyclable ou stationnement - Récupération du trottoir et de la piste cyclable ou du stationnement	
Largeur de la rue (m)	12
Profil	C
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	86,5
Surface d'infiltration (m)	8
Bassin-versant récupéré (m)	8
Concentration de l'infiltration	1
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	86,5
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	100%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	67%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	100%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)	67%

Résultats de simulation pour le profil 12C – Enrobé drainant avec structure réservoir – Cas 3 - ATM

Cette solution apparaît particulièrement efficace pour l'abattement de la pluie de 16 mm et l'abattement du volume annuel de l'année de référence. Les résultats de simulation d'abattement sont disponibles en annexe pour tous les types de profils.

2- L'ESPACE PUBLIC

MATÉRIAUX POREUX

BÉTON DRAINANT

Descriptif



CC - Center for Neighborhood Technology

Pose de béton poreux dans l'Illinois

Le revêtement en asphalte parisien pourrait être remplacé par un béton poreux (ou perméable), absorbant jusqu'à 5 cm d'eau par seconde. La couche de béton drainant stocke l'eau avant son infiltration dans le sol.

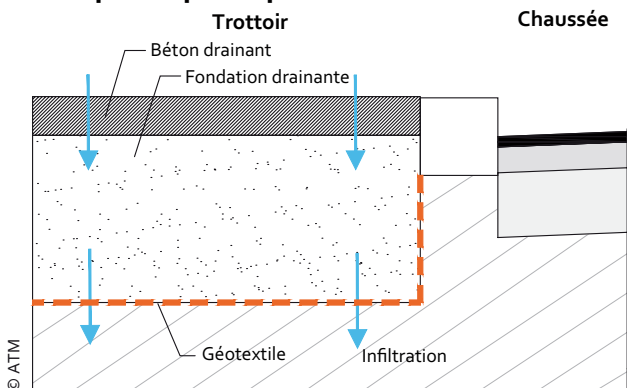
Ce béton peut être employé sur les espaces piétons, sur les pistes cyclables ainsi que sur les stationnements. Il n'est en revanche pas adapté aux voies circulées, car c'est un matériau plus fragile qu'une chaussée classique ou un enrobé drainant.

Entretien

Le béton drainant peut se colmater. Il nécessite donc un entretien particulier, qui comprend :

- En prévention, un hydrocurage à moyenne pression avec aspiration. Le balayage classique est à proscrire car il peut enfouir des débris dans le revêtement.
- Lorsque le colmatage du revêtement est avancé, un hydrocurage à haute pression avec aspiration.
- En hiver, le sablage et les fondants chimiques sont proscrits. Le revêtement doit être salé pour éviter la formation de verglas.

Coupe de principe



© ATM

Coupe de principe de l'enrobé drainant utilisé sur trottoir

Dimensionnement et excavation

À titre indicatif, l'épaisseur minimale en fonction du type d'usage est la suivante :

	Épaisseur minimale
Espace piéton (aucune circulation motorisée)	Zone non circulée : 12 cm

Épaisseur minimale du béton drainant selon le type de voirie
Source : Valeurs de pré-dimensionnement d'EGIS pour le béton Lafarge Hydromédia

Remarque : le béton drainant est mis en œuvre sur une couche de fondation drainante, la profondeur d'excavation est donc sensiblement supérieure à l'épaisseur de la couche de béton.

Exemples d'entreprises :

• Lafarge	béton drainant Hydromédia®
-----------	----------------------------



CC - Center for Neighborhood Technology

Détail d'un béton poreux dans l'Illinois

Avantages, inconvénients, contraintes

Avantages :

- Nombreuses couleurs possibles
- Pas de travaux sur la chaussée
- Perméabilité du béton drainant lors de la pose de l'ordre de 100 fois supérieure aux besoins en infiltration. Le décolmatage n'est donc théoriquement jamais nécessaire
- Faible concentration de l'infiltration, voire infiltration diffuse (concentration de 1), donc peu d'impact sur le sous-sol et les fondations des bâtiments proches
- Conservation des caniveaux, bouches de lavage existants, pas de travaux sur le réseau d'assainissement.
- Les descentes de toitures peuvent éventuellement être déconnectées du réseau et dirigées vers les tranchées.

Inconvénients :

- Profondeur d'excavation généralement supérieure à l'enrobé drainant
- Différence d'aspect inévitable entre le revêtement neuf et l'ancien
- Le nouveau calepinage peut nuire à l'aspect général et parfois à la tenue mécanique
- Le colmatage peut être accéléré par d'éventuels travaux à proximité
- L'entretien par nettoyage mécanisé (balayeuse aspirante ou jet d'eau haute pression) pour limiter le risque de colmatage nécessite du matériel spécifique (mais peu coûteux).

Contraintes de mise en œuvre

- En phase de travaux, le colmatage doit être évité
- Durée de séchage du matériau de l'ordre de 1 mois avant la mise en circulation, facteur potentiellement limitant dans le contexte parisien

Hypothèses et simulation d'abattement

Celles-ci sont semblables à celles retenues pour l'enrobé drainant avec structure réservoir (voir plus haut).

Dimensionnement et efficacité

Avec l'épaisseur adéquate, l'efficacité du béton drainant est la même que celle de l'enrobé poreux avec structure stockante, les résultats de calcul sont donc identiques.

L'épaisseur de béton doit être dimensionnée en fonction de la

pluie que l'on souhaite abattre, des surfaces récupérées, du type de circulation ainsi que de la perméabilité du sol. En fonction de l'épaisseur appliquée, le béton peut être adapté à un passage occasionnel de poids lourds.

La capacité de stockage du béton doit être suffisante, en prenant en compte la pente du terrain. En cas de forte pente en long, pour ralentir le ruissellement, des sortes de « murets » de bief en béton non poreux peuvent être mis en œuvre régulièrement dans la couche de béton poreux.

2- L'ESPACE PUBLIC

MATÉRIAUX POREUX

RÉSINE DRAINANTE

Descriptif



© Apur

Expérimentation d'une résine type permeaway, boulevard Bourdon, Paris 4^e.

La résine drainante est l'association d'un liant synthétique poreux et de gravillons. Elle possède des qualités décoratives (la couleur du gravillon lui donne son aspect) et anti-dérapantes, du fait de sa rugosité due à l'apport de granulats. Comme tout autre revêtement (béton, enrobé...), la résine drainante s'applique directement sur une structure porteuse. Elle est particulièrement adaptée au revêtement de petites surfaces en contexte urbain : trottoirs, pistes cyclables, stationnements, allées, fosses d'arbres etc. Elle est carrossable mais uniquement dans les zones de faible trafic de véhicules légers. Ce matériau a déjà fait l'objet d'expérimentations à Paris, mais reste assez onéreux.

Il existe trois types de résine drainante :

- Résine drainante de voirie utilisée sur des terrains meubles
- Résine drainante pour les fosses d'arbre
- Résine drainante en couche mince sur support dur pour la réalisation de travaux neufs, le ragréage de béton, la restauration d'anciens revêtements de surface...

Dimensionnement et excavation

L'épaisseur du revêtement à mettre en œuvre dépend du support, du trafic, ainsi que de la dimension des granulats. Il dépend aussi de l'utilisation de la résine drainante (type de résine drainante) :

Mise en œuvre sur une surface meuble	Résine sur 3 à 4 cm suivant le trafic
	Couche de finition en sable de 1 à 2 cm
	Structure de granulats sur une épaisseur de 10 à 20 cm
Mise en œuvre pour les fosses d'arbre	Résine sur 3 à 4 cm
	Structure de granulats sur une épaisseur de 6 à 7 cm
Mise en œuvre en couche mince	Résine sur 0,6 à 1,5 cm. Le support d'application doit impérativement être dur, sec et propre.

Entretien

L'entretien est simple : nettoyage mécanisé par jet d'eau haute pression.

Exemples d'entreprises :

• Permeaway	résine drainante Permeaway Urban®, Permeaway Sun®
-------------	---

Avantages, inconvénients, contraintes

Avantages :

- Évite la formation de verglas.
- Mise en œuvre rapide et nécessitant peu d'engins (application manuelle à la raclette ou à la taloche, lissage à la règle).
- Bonne qualité d'adhérence.
- Produit écologique : mise en œuvre à froid, sans solvant.
- Remplacement et réparation aisés et rapides. La remise en circulation n'est cependant pas immédiate.
- Les descentes de toitures peuvent éventuellement être déconnectées du réseau et dirigées vers les tranchées.

Inconvénients :

- Revêtement pas adapté à la circulation de poids lourds.
- Le colmatage peut être accéléré par d'éventuels travaux à proximité.

Contraintes de mise en œuvre

- Réalisation par temps sec, hors grand froid et grosse chaleur.
- Le temps de séchage peut varier d'une heure à plusieurs jours suivant la résine utilisée.

Hypothèses et simulation d'abattement

Celles-ci sont semblables à celles retenues pour l'enrobé drainant avec structure réservoir (voir plus haut).

Dimensionnement et efficacité

La perméabilité de ce revêtement est du même ordre de grandeur que celle d'un enrobé ou d'un béton drainant. D'une utilisation comparable au stabilisé, il est cependant 3 000 fois plus perméable !

Suivant l'utilisation qui est en fait (mise en œuvre sur le trottoir, et/ou sur les pistes cyclables ou le stationnement, et/ou sur les fosses d'arbre), les résultats d'abattement sont similaires à ceux des enrobés et bétons drainant, ou des fosses d'arbre décaissées.

2- L'ESPACE PUBLIC

DISPOSITIFS LINÉAIRES OU DISCONTINUS

PAVÉS OU DALLES À JOINTS ENGAZONNÉS OU SABLÉS

Descriptif



© Apur

Pavés engazonnés, rue Cardinet, ZAC de Batignolles, Paris 17^e.

Le revêtement de sol parisien des trottoirs, aujourd'hui majoritairement en asphalte « noir », pourrait être remplacé par des pavés dont les joints ne sont pas scellés, mais engazonnés. Les joints et l'engazonnement permettent d'intercepter une partie des précipitations de la zone pavée. Cette technique n'offre aucune capacité de stockage des eaux pluviales, elle permet seulement de limiter le ruissellement.

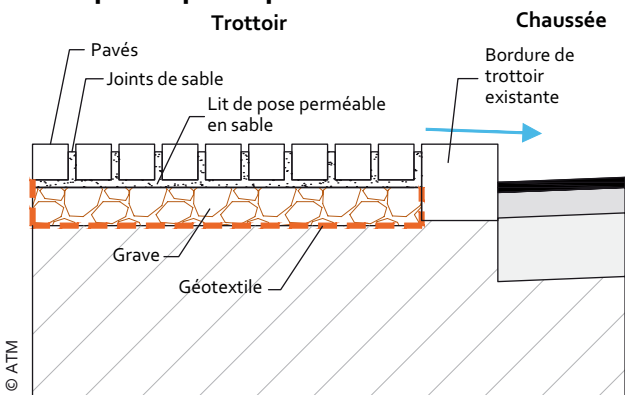
Ce matériau pourrait être mis en place sur la bande fonctionnelle du trottoir. En revanche, il est déconseillé sur la bande utile, car le piétinement peut gêner le développement du gazon. Les pavés à joints engazonnés sont donc surtout adaptés aux rues peu sollicitées, avec des trottoirs assez larges et peu encombrés.

Variante

Plutôt que d'être engazonnés, les joints des pavés peuvent être laissés en sable. Cette technique permet de ralentir le ruissellement et de favoriser l'évaporation sur des sols chauds, et l'infiltration si le sol et les joints le permettent. En revanche, le pavage doit être accessible aux PMR (largeur de joints inférieure à 2 cm).

Les pavés peuvent être remplacés par des dalles clivées, dispositif courant à Paris, comme par exemple dans la rue de Malte. Posé sur un mélange grave + sable, sans sous-couche, ce dispositif est plus durable, et facilite les interventions sur le réseau enterré. Bien que la surface des dalles soit sensiblement plus importante que celle des pavés, le coefficient de ruissellement est du même ordre de grandeur avec des joints poreux.

Coupe de principe



© ATM

Coupe de principe d'un revêtement en pavés à joints engazonnés

Dimensionnement et excavation

	Épaisseur finie	
	Trottoir	Véhicule moyen (Sol pauvre)
Pavés	8 cm	8 cm
Lit de pose perméable	5 cm	5 cm
Couche de base	10 cm	15 cm
Couche de fondation	0 cm	71 cm
Total	23 cm	100 cm

Épaisseur finie des revêtements en pavés à joints engazonnés mis en œuvre à San Francisco – Source: APUR

Entretien

- Tonte régulière du gazon

Avantages, inconvénients, contraintes

Avantages :

- Pas d'infiltration concentrée : le matériau limite le ruissellement en interceptant l'eau et en favorisant l'évapotranspiration et l'infiltration (sans stockage). Cette technique peut donc être utilisée partout. Le sol n'a pas besoin d'avoir une perméabilité particulièrement bonne.
- Le mobilier urbain peut toujours être implanté sur la bande pavée
- Les bordures de trottoirs, avaloirs, bouches de lavage et caniveaux peuvent être conservés
- Pas de travaux sur le réseau d'assainissement
- Pas de problématique de colmatage
- Verdissement des rues et lutte contre les îlots de chaleur.
- Les descentes de toitures peuvent éventuellement être déconnectées du réseau et dirigées vers les tranchées.

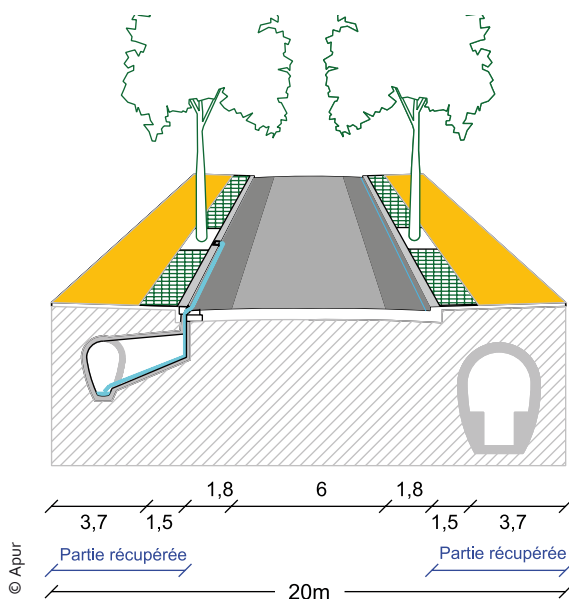
Inconvénients :

- Faible abattement de pluie, en particulier pour les événements pluvieux importants
- Aucune capacité de rétention
- Remplacement facile des pavés, mais intervention chronophage
- Les éventuels travaux sur les réseaux enterrés peuvent limiter la durée de vie du revêtement. Mais, si les pavés utilisés sont en pierre, ils peuvent être réutilisés (dépose, stockage et retaille si nécessaire avant leur remise en place).

Contraintes de mise en œuvre

- La pose et le calepinage sont réalisés manuellement. L'intervention est longue et demande une main-d'œuvre qualifiée.

Hypothèses et simulation d'abattement



Hypothèses

- Mise en place sur la bande fonctionnelle du trottoir. Une bande utile de 3 m est systématiquement gardée, l'encombrement des trottoirs parisiens pouvant être important. Utilisation uniquement si la largeur du trottoir est d'au moins 4,5 m (c'est-à-dire une largeur de pavés à joints engazonnés d'au moins 1,5 m).
- Coefficient de ruissellement du revêtement de 0,7 pour une pluie annuelle de 12,5 mm (pluie annuelle de durée 1h), c'est-à-dire que pour ce type d'événement pluvieux, 30 % des précipitations tombant sur les pavés sont abattus. Les pavés engazonnés permettent alors l'abattement d'une lame d'eau de $0,3 \times 12,5 = 3,75$ mm.

Le calcul d'abattement de pluie ci-dessus est valable pour un profil en long assez plat (de l'ordre de 0,5 % à 3 %) et une pente en travers de l'ordre de 1 à 2 % caractéristique des trottoirs parisiens.

Simulation d'abattement

L'efficacité des pavés engazonnés est meilleure lors des pluies courantes. L'abattement varie en effet en fonction de la période de retour d'un événement pluvieux et de sa durée : plus la pluie est intense et courte, plus l'eau ruisselle et moins les pavés engazonnés sont efficaces. Ce revêtement ne participe donc

que très peu à réduire les volumes de ruissellement lors d'événements pluvieux exceptionnels. En revanche, sur l'année, le volume abattu est loin d'être négligeable.

Le tableau ci-dessous présente les résultats de simulation pour le profil F de la rue de 20 m.

Pavés à joints engazonnés - Mise en place sur trottoir	
Largeur de la rue (m)	20
Profil	F
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	3,75
Surface d'infiltration (m)	4,4
Bassin-versant récupéré (m)	10,4
Concentration de l'infiltration	2,4
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	1,6
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	10%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	5%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	33%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)	17%

Résultats de simulation pour le profil 20F – Pavés à joints engazonnés – Mise en place sur trottoir - ATM

Les résultats de simulation d'abattement sont disponibles en annexe pour tous les types de profils.

2- L'ESPACE PUBLIC

DISPOSITIFS LINÉAIRES OU DISCONTINUS

TRANCHÉE DRAINANTE SÈCHE

Descriptif



© STEA

Tranchée drainante sèche avec caniveau en béton poreux – ZAC Boucicaut, Paris 15^e

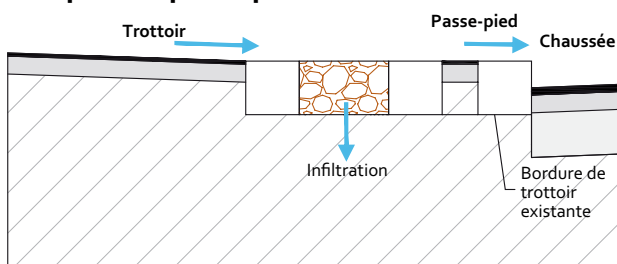
Une tranchée drainante sèche est une tranchée garnie de pierres. Elle collecte les eaux et les stocke avant leur infiltration dans le sol. L'ouvrage peut stocker l'équivalent de 30 % de son volume, taux qui varie selon le matériau utilisé pour le remplir.

Une tranchée drainante sèche pourrait être mise en place sur les trottoirs parisiens. Dans le cas d'une voirie avec stationnement, une bande piétonne praticable (passe-pied) d'au moins 80 cm doit être assurée pour faciliter l'accès aux stationnements. Le trottoir doit donc être relativement large. Seules les eaux du trottoir sont récupérées.

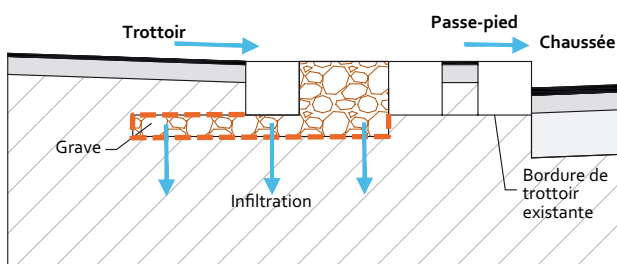
Variantes

- La surface de la tranchée drainante peut être recouverte d'une résine drainante, de façon à ce que les pierres ne soient pas visibles et que la solution soit plus compatible avec le paysage des rues parisiennes.
- La tranchée drainante assurant le stockage peut être étendue sous le trottoir, de manière à maximiser les possibilités de stockage et la surface (donc la vitesse) d'infiltration. Cela nécessite alors des travaux sur toute la largeur du trottoir, mais l'ouvrage est potentiellement moins profond et la concentration de l'infiltration s'en trouve très réduite (voire infiltration diffuse). La largeur de la tranchée sèche en surface peut alors être réduite, et peut donc être adaptée à des trottoirs moins larges. De plus, la surface d'infiltration étant plus grande, le temps de vidange de l'ouvrage est plus court. L'abattement sur le volume annuel est donc bien meilleur, même avec une perméabilité du sous-sol médiocre.

Coupes de principe



Tranchée drainante



© ATM

Tranchée drainante étendue

Entretien

- Pas d'entretien spécifique de la tranchée drainante.

Dimensionnement et excavation

Les calculs d'abattement ont été réalisés pour une tranchée drainante de 50 cm de largeur pour 30 cm de profondeur. La profondeur d'excavation pourra aussi être plus importante s'il est décidé de laisser une certaine revanche entre le trottoir et la tranchée drainante (par exemple 5 cm), de manière à ce que celle-ci soit plus efficace pour des pluies courtes mais très intenses (orages d'été).

Avantages, inconvénients, contraintes

Avantages :

- Différents effets visuels possibles (résine drainante, cailloux, revanche ou non etc.).
- Pas d'entretien spécifique.
- Au-delà d'une pluie annuelle, l'eau en surplus ruisselle jusqu'au caniveau et est rejetée normalement au réseau. Il n'y a donc pas besoin de raccordement de l'ouvrage au réseau d'assainissement.
- Les bouches de lavage et caniveaux sont conservés.
- Il n'est pas nécessaire d'empêcher l'accès des véhicules ou des piétons à l'ouvrage.
- Les descentes de toitures peuvent éventuellement être déconnectées du réseau et dirigées vers les tranchées.

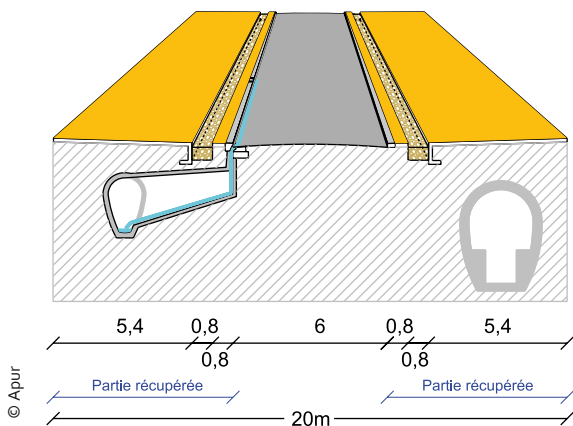
Inconvénients :

- Ne peut être mis en œuvre que sur des profils avec des trottoirs assez larges
- L'eau du passe-pied n'est pas récupérée.
- Concentration de l'infiltration. Elle peut être diminuée en mettant en place une tranchée plus large et moins profonde. Elle peut éventuellement être prolongée sous le trottoir pour augmenter la surface d'infiltration et la capacité de stockage.
- Dans le contexte parisien avec des nombreuses entrées de bâtiments, la tranchée drainante doit être régulièrement interrompue. Cela a l'avantage pour les rues en pente de créer des biefs.
- L'implantation semble compliquée dans des rues avec alignements d'arbre, les racines risquant d'être endommagées.

Contraintes de mise en œuvre

- La mise en œuvre est relativement aisée et peu coûteuse, les matériaux (cailloux, sable, géotextile et éventuellement résine drainante) étant assez « communs ».

Hypothèses et simulation d'abattement



Hypothèses

- Pas d'implantation sur les profils de rues plantées
- Tranchée drainante avec 30 % de vide
- Tranchée drainante de 50 cm de largeur pour 30 cm de profondeur.

Simulation d'abattement

L'infiltration est généralement très concentrée avec cette technique. On pourra la diminuer en mettant en place une tranchée plus large et moins profonde, ou en prolongeant la tranchée sous le trottoir.

Le tableau ci-dessous présente les résultats de simulation pour le profil C de la rue de 20 m.

Tranchée drainante sèche - Mise en place sur le trottoir - Récupération du trottoir uniquement, hors passe-pied	
Largeur de la rue (m)	20
Profil	C
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	86,5
Capacité de rétention maximale (mm)	86,5
Dimensions de la tranchée drainante (m)	0,50 x 0,09 (L x H)
Surface d'infiltration (m)	1
Bassin-versant récupéré (m)	8,8
Concentration de l'infiltration	8,8
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	9,8
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	61%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	27%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	99%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)	44%

Résultats de simulation pour le profil 20C – Tranchée drainante sèche – Mise en place sur trottoir - ATM

Les résultats de simulation d'abattement sont disponibles en annexe pour tous les types de profils.

2- L'ESPACE PUBLIC

DISPOSITIFS LINÉAIRES OU DISCONTINUS

TRANCHÉE DRAINANTE PLANTÉE

Descriptif



© Apur

Tranchée drainante plantée, Japon

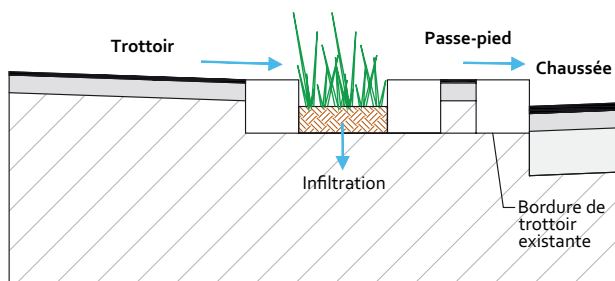
La tranchée drainante plantée (que l'on peut assimiler à une noue d'infiltration) est une version végétalisée de la tranchée drainante sèche. L'éventuel massif de grave (non obligatoire) est recouvert d'une couche de terre où sont plantés des végétaux. La tranchée doit être décaissée, généralement de 10 à 20 cm selon sa largeur, afin d'avoir une capacité de rétention suffisante avant infiltration de l'eau à travers la première couche de terre.

Le massif de grave éventuellement placé sous la terre végétale permet d'assurer un drainage plus rapide de l'ouvrage (ressuyage). La tranchée plantée est ainsi moins humide et mieux intégrée au contexte urbain de Paris.

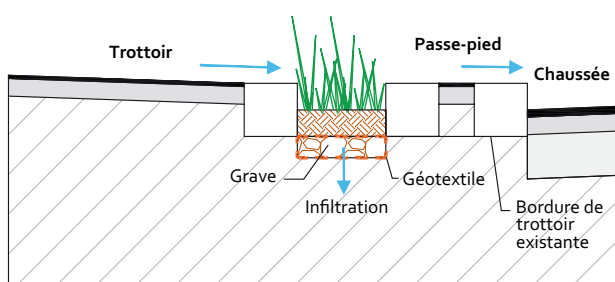
Variante

Le massif de grave pourrait être prolongé sous toute la largeur du trottoir de manière à mieux répartir l'infiltration (diminution de la concentration de l'infiltration).

Coupes de principe



Tranchée drainante plantée (noue) sur trottoir



© ATM

Tranchée drainante plantée (noue) sur trottoir

Entretien

- Entretien classique d'un espace végétalisé (coupe des végétaux, ramassage des feuilles mortes etc.).
- Pas d'entretien spécifique de l'éventuel massif de grave.

Dimensionnement et excavation

Les calculs d'abattement ont été réalisés pour une tranchée drainante plantée de 50 cm de largeur et décaissée de 9 cm environ (lame d'eau maximale qui peut s'infiltrer en une journée pour une perméabilité du sol de 1×10^{-6} m/s). Suivant les végétaux plantés, une épaisseur de terre végétale de 10 à 40 cm (voire plus) est nécessaire. L'ajout d'une épaisseur de grave (typiquement 20 à 30 cm) vient éventuellement augmenter la profondeur d'excavation.

Avantages, inconvénients, contraintes

Avantages :

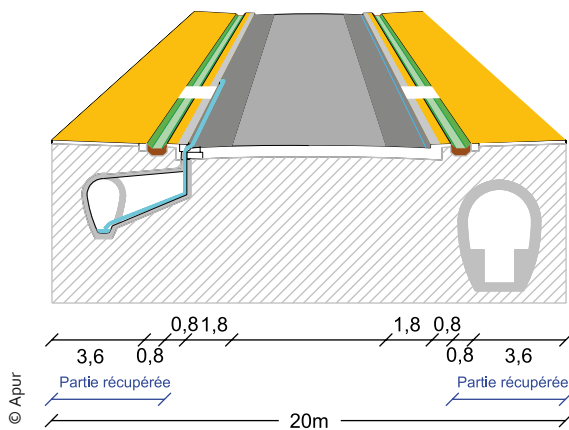
- Gestion des eaux pluviales visible et pédagogique : l'eau « raconte une histoire »
- Favorise l'apparition « d'îlots de fraîcheur urbains » en période de canicule par une végétation plus présente et bien alimentée en eau
- Végétaux bien alimentés en eau, nécessitant donc peu (voire pas) d'arrosage
- Entretien classique
- Les descentes de toitures peuvent éventuellement être déconnectées du réseau et dirigées vers les tranchées

- Cette technique pourrait être adaptée pour les plates-bandes plantées existantes à Paris et qui ne reçoivent pas les eaux de ruissellement des trottoirs. Il suffirait de baisser leur bordure ou de les interrompre pour permettre le passage de l'eau.

Inconvénients :

- Ouvrage plus profond que la tranchée drainante sèche, surtout si une épaisseur de grave est mise en œuvre
- Accumulation possible de déchets due au décaissé de l'ouvrage

Hypothèses et simulation d'abattement



Hypothèses :

- Pas d'implantation sur les profils de rues plantées (on pourrait cependant imaginer que cela soit possible, sans épaisseur de grave supplémentaire)
- Récupération des eaux pluviales du trottoir uniquement
- Tranchée drainante de 50 cm de largeur pour 9 cm de décaissé, plus 10 à 40 cm de terre végétale et 20 à 30 cm de grave.

Dimensionnement et efficacité

L'infiltration est généralement très concentrée avec cette technique. On pourra la diminuer en mettant en place une tranchée plus large et moins profonde, ou en prolongeant l'éventuelle couche de grave sous le trottoir.

Le tableau ci-dessous présente les résultats de simulation pour le profil C de la rue de 20 m.

Tranchée drainante plantée (noue) - Mise en place sur le trottoir - Récupération du trottoir uniquement, hors passe-pied	
Largeur de la rue (m)	20
Profil	C
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	86,5
Capacité de rétention maximale (mm)	86,5
Dimensions de la tranchée drainante (m)	0,50 x 0,09 (L x H)
Surface d'infiltration (m)	1
Bassin-versant récupéré (m)	8,8
Concentration de l'infiltration	8,8
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	9,8
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	61%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	27%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	99%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)	44%

Résultats de simulation pour le profil 20C – Tranchée drainante plantée – Mise en place sur trottoir - ATM

Les résultats de simulation d'abattement sont disponibles en annexe pour tous les types de profils.

2- L'ESPACE PUBLIC

DISPOSITIFS LINÉAIRES OU DISCONTINUS

FOSSE D'ARBRE DÉCAISSÉE

Descriptif



© ATM

Fosse d'arbre décaissée et végétalisée, Romainville (93)

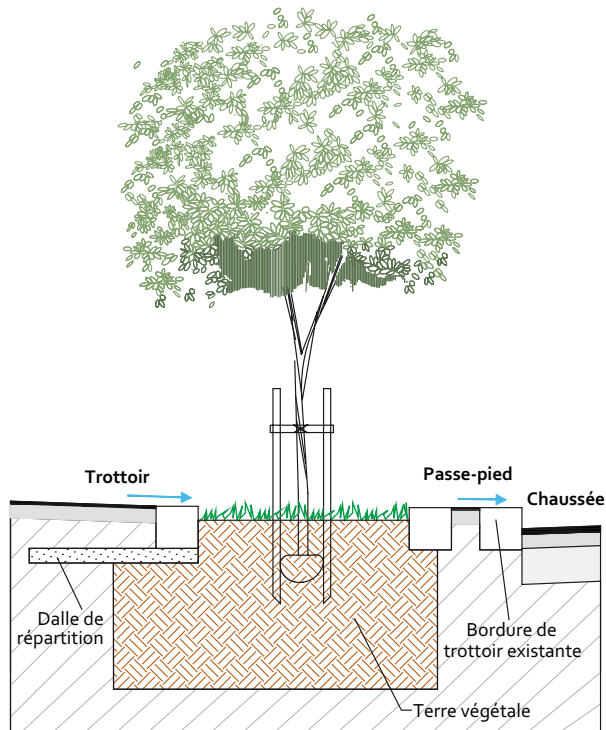
Dans les rues parisiennes avec alignement d'arbres, la distance moyenne entre deux arbres est de 7 m. Décaisser le fond des fosses d'arbre de quelques centimètres par rapport au niveau du trottoir permettrait de stocker des eaux de ruissellement et de les infiltrer. Cela participerait également à l'alimentation en eau de la végétation. Cette technique a longtemps été préconisée à Paris (voir plus haut, « l'Eau et le Végétal »).

Le fond de la fosse peut être en terre, gravillonnée, en matériau poreux (résine drainante) ou être tapissé d'une strate végétalisée basse. La fosse peut même être recouverte d'une grille, comme c'est le cas aujourd'hui à Paris.

Entretien

- Entretien classique d'une fosse d'arbre : ramassage des déchets, taille des végétaux etc.

Coupe de principe



© ATM

Fosse d'arbre décaissée

Dimensionnement et excavation

Les dimensions des fosses d'arbre parisiennes peuvent tout à fait être conservées. La seule modification à réaliser est un léger décaissé, qui doit impérativement être faible pour une bonne intégration urbaine et paysagère, et pour des questions de sécurité des usagers. Le décaissé peut être de l'ordre de 10 à 20 cm.



© Apur

Fosse d'arbre alimentée par l'eau de ruissellement, parvis du collège Lucie Aubrac, Villetaneuse (93)

Avantages, inconvénients, contraintes

Avantages :

- Gestion des eaux pluviales visible et pédagogique : l'eau « raconte une histoire » (si absence de grille ou matériau poreux).
- Favorise les « îlots de fraîcheur urbains » en période de canicule.
- Végétaux bien alimentés en eau, qui nécessitent donc peu (voire pas) d'arrosage.
- Entretien classique.
- Dimensions des fosses existantes conservées.
- Les descentes de toitures peuvent éventuellement être déconnectées du réseau et dirigées vers les fosses d'arbre.

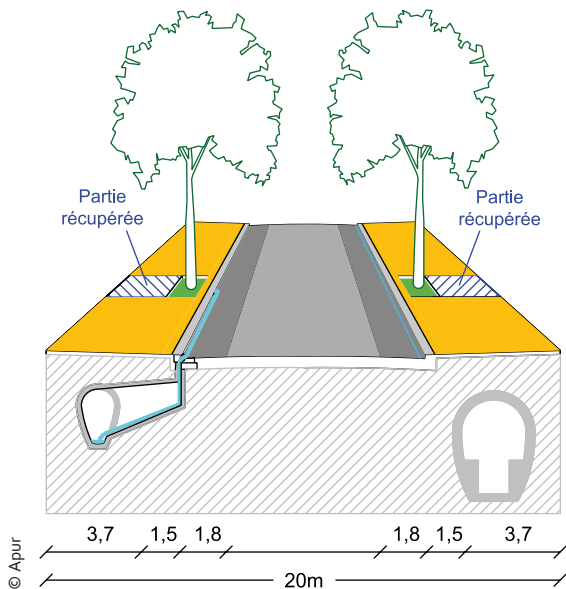
Inconvénients :

- Accumulation possible de déchets due au décaissé de l'ouvrage (si absence de grille ou matériau poreux).
- Ne peut pas être réalisé, avec un décaissé trop important, sur une fosse avec un arbre existant.

Contraintes de mises en œuvre :

- Aucune contrainte par rapport à une fosse d'arbre classique.

Hypothèses et simulation d'abattement



Quatre cas d'utilisation peuvent être envisagés :

- 1- mise en place sur le trottoir, avec récupération de l'eau par ruissellement direct uniquement.
- 2- mise en place sur le trottoir, avec récupération par caniveau.
- 3- mise en place sur le stationnement en Lincoln, avec récupération de l'eau par ruissellement direct du trottoir uniquement
- 4- mise en place sur le stationnement en Lincoln, avec récupération par caniveau.

Les hypothèses et résultats développés ci-dessous sont valables pour le cas 1. Les résultats de simulation d'abattement sont disponibles en annexe pour les 3 cas et pour tous les types de profils.

Hypothèses

- Contrairement aux autres techniques présentées ci-dessus, le calcul d'abattement n'est pas réalisé pour un mètre linéaire mais pour 7 mètres (distance moyenne entre deux arbres à Paris).
- Fosses d'arbres de 1,5 mètre de côté.
- Fosse d'arbre décaissée de 9 cm.
- Récupération de l'eau du trottoir par ruissellement direct.

Simulation de l'abattement

Le tableau ci-dessous présente les résultats de simulation pour le profil F de la rue de 20 m :

Fosse d'arbre décaissée - Calcul pour 7 m linéaires (soit la distance moyenne entre 2 arbres) - Implantation sur le trottoir avec récupération de l'eau par ruissellement direct uniquement	
Largeur de la rue (m)	20
Profil	F
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	86,5
Capacité de rétention maximale (mm)	86,5
Dimensions de la fosse d'arbre (m)	1,5 x 1,5 x 0,09 (L x l x H)
Surface d'infiltration (m)	4,5
Bassin-versant récupéré (m)	15,6
Concentration de l'infiltration	3,5
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	25,0
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	100%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	11%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	100%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)	11%

Résultats de simulation pour le profil 20F – Fosse d'arbre décaissée Implantation sur le trottoir avec récupération de l'eau par ruissellement direct uniquement - ATM

L'abattement de pluie est très bon sur le bassin-versant récupéré, mais beaucoup plus limité sur l'ensemble du profil, puisque la partie récupérée est peu étendue. L'ajout d'un caniveau d'alimentation des fosses d'arbre (cas 2 et 4) permet d'augmenter sensiblement l'abattement sur l'ensemble du profil.

Les résultats de simulation d'abattement sont disponibles en annexe pour tous les types de profils.

Tableau de synthèse des solutions techniques pour les espaces publics parisiens

	Utilisation		Récupération		Concentration de l'infiltration	Abattement possible de la pluie de 16 mm sur la totalité du profil	Abattement possible du volume annuel sur la totalité du profil	Avantages et inconvénients				Contraintes		
	Sur trottoir	Sur stationnement et piste cyclable	Trottoir	Stationnement et piste cyclable				Lutte contre les îlots de chaleur	Réemploi	Biodiversité	Dimension pédagogique	Profondeur d'excavation	Contraintes de mise en œuvre	Contraintes d'entretien
Enrobé drainant	X		X		1	24% à 100%	24% à 100%							
		X	X	X	1,6 à 5,5	32% à 73%	32% à 73%							
	X	X	X	X	1	40% à 100%	40% à 100%							
Béton drainant	X		X		1	24% à 100%	24% à 100%							
		X	X	X	1,6 à 5,5	32% à 73%	32% à 73%							
	X	X	X	X	1	40% à 100%	40% à 100%							
Résine drainante	X		X		1	24% à 100%	24% à 100%							
		X	X	X	1,6 à 5,5	32% à 73%	32% à 73%							
	X	X	X	X	1	40% à 100%	40% à 100%							
Pavés ou dalles à joints engazonnés ou sablés		X			1,5 à 3	3% à 15%	11% à 50%							
	En partie													
	X													
Tranchée drainante sèche	X		En partie		7,2 à 16	18% à 36%	24% à 91%							
	X		En partie		7,2 à 16	18% à 36%	24% à 91%							
Fosse d'arbre décaissée	X		En partie		3 à 6	7% à 15%	7% à 15%							
	X		X		14 à 28	12% à 23%	31% à 58%							
		X	En partie	En partie	4,1 à 6,4	6% à 14%	7% à 14%							
	X	X	X	X	19 à 30	6% à 17%	18% à 50%							

Très favorable Favorable Peu favorable

2- L'ESPACE PUBLIC

AUTRES DISPOSITIFS POSSIBLES



© Apur

Installation artistique stockant l'eau pluviale, Amsterdam



© BMW Guggenheim Lab - NC - SA

Bancs stockant, Mumbai



© Stormworks

Jardinière alimentée par l'eau de pluie, New-York



CC - barndnc

Déconnexion de gouttière, États-Unis



© Apur

Bordure perméable discontinue, Japon



© Apur

Arrêt de bus de la RATP planté, Paris

3- L'ESPACE PRIVÉ

TOITS VÉGÉTALISÉS, JARDINS SUR DALLE

Descriptif



© Apur

Toiture végétalisée au-dessus d'une résidence étudiante, Paris 13^e

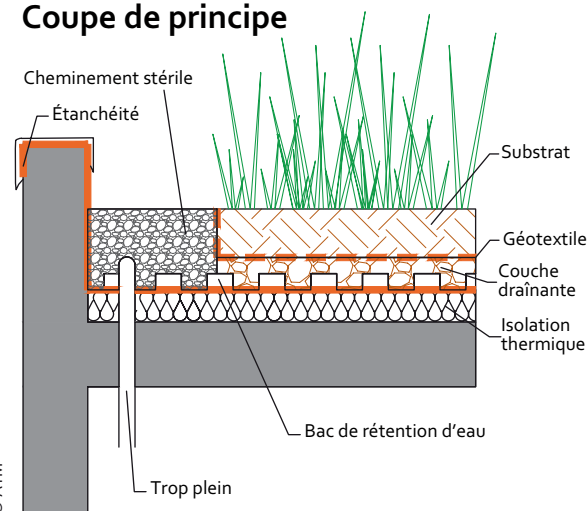
Traditionnellement, les toits parisiens sont réalisés en zinc et sont en pente. Toutefois, au fil du temps, des bâtiments plus modernes se sont installés dans de nombreux quartiers, dont certaines toitures peuvent être plates ou à faible pente (maximum 20°). Ces toitures pourraient être végétalisées. Dans ce cas, outre leur effet potentiellement bénéfique en matière de régulation thermique (évapotranspiration) et de biodiversité, les toitures végétalisées permettent un abatement significatif des volumes d'eau pluviale ruisselés. Ces dispositifs sont préconisés pour les toits relativement plats ayant un potentiel d'ensoleillement suffisant. Toutefois, une large gamme de plantations existe et peut s'adapter à de nombreuses orientations.



© Apur

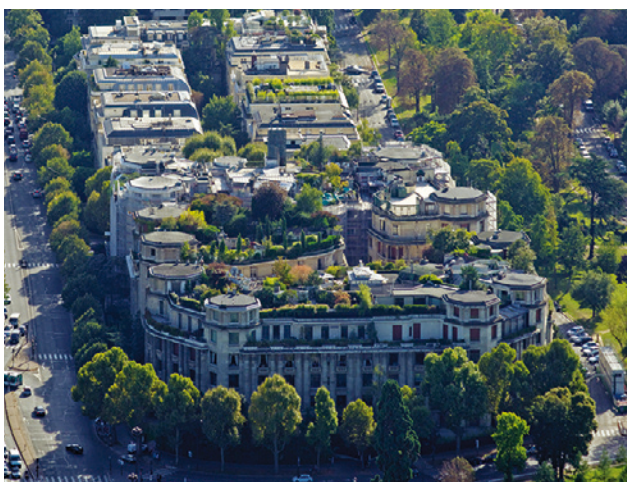
Toiture végétalisée sur un immeuble, Paris 13^e

Coupe de principe



© ATM

Coupe de principe d'une toiture végétalisée



© ph.guignard@air-images.net

Terrasses boulevard Suchet, Paris 16^e



© G. Picard - Mairie de Paris - DU

Jardin associatif sur le toit du gymnase des Vignolles, Paris, 20^e

Avantages, inconvénients, contraintes

Avantages :

- Abattement d'une part importante des eaux pluviales reçues même pour une hauteur de substrat relativement faible.
- Ces toitures, si elles sont basses, sont visibles depuis les bâtiments adjacents et apportent donc un confort visuel et paysager non négligeable dans un contexte parisien très minéral. Elles participent à la création d'îlots de fraîcheur en ville.
- Très peu d'entretien pour des toitures dites « extensives » (hauteur de substrat inférieure ou égale à 10 cm).
- Faible coût et subventions possibles par l'Agence de l'eau et la Région ;
- Traitement de la pollution chronique, les surverses pouvant alors rejoindre un dispositif d'infiltration au sol ;
- Pour le bâtiment : isolation thermique / isolation acoustique / rafraîchissement.

Inconvénients :

- Les toitures végétalisées dites « intensives » (plus de 10 cm de substrat), nécessitent un entretien régulier
- Les toitures extensives ont de moins bonnes performances environnementales (biodiversité, lutte contre les ICU, isolation, abattement).

Contraintes de mises en œuvre :

- Charge supplémentaire pour le bâtiment, qui doit donc pouvoir la supporter. À titre d'exemple, le poids d'un toit végétalisé avec un substrat de 20 cm peut varier de 100 à 300 kg/m² (selon le type de substrat, d'étanchéité, de plantation, de structure etc.) (Source : www.optigreen.fr). Des végétalisations plus légères existent (50 kg/m²), mais le volume abattu est moindre, de même que l'intérêt écologique et le confort urbain.

Hypothèses et simulation d'abattement

Hauteur du substrat (cm)	Hauteur de pluie abattue (mm)
5	4
10	8
15	12
20	16
30	22
50	32

Tableau de l'abattement de la pluie en 24h suivant la hauteur de substrat – Projet de zonage pluviale parisien DPE/STEA

Hypothèses

- Installation sur des toits terrasses principalement
- Les toitures basses légèrement pentues peuvent également être végétalisées (potentiel de création d'îlots de fraîcheur plus important car toiture plus proche du sol)

L'abattement de la pluie dépend principalement de la hauteur de substrat. Le tableau ci-contre, tiré du projet de zonage pluvial parisien, présente l'abattement de la pluie en 24h suivant la hauteur de substrat.

Simulation de l'abattement

À partir de ces données, il a été possible de modéliser l'abattement de la pluie réalisé sur la chronique annuelle de pluie type. Le tableau suivant présente ces résultats :

Hauteur de substrat (cm)	5	10	15	20	30	50
Lame d'eau journalière abattue (mm)	4,0	8,0	12,0	16,0	22,0	32,0
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	25%	50%	75%	100%	100%	100%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	73%	98%	99%	100%	100%	100%
Nombre de jours de rejet sur l'année	94	94	94	0	0	0

Abattement annuel de la pluie suivant la hauteur de substrat – ATM

3- L'ESPACE PRIVÉ

JARDINIÈRES DE PIED D'IMMEUBLES

Descriptif



© ATM

Exemple d'une descente EP qui pourrait facilement être déviée vers une jardinière de pied d'immeuble, rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5^e

La majorité des descentes d'eau pluviale des bâtiments parisiens sont en façade. Ces descentes sont réglementairement séparatives, l'eau usée n'y transite donc pas (mais le cas existe toujours dans l'habitat ancien). Il paraît donc possible de déconnecter ces descentes d'EP au-dessus du niveau du sol, avant qu'elles rejoignent le réseau d'assainissement. À ce titre, des jardinières de pied d'immeuble pourraient être installées dans les cours ou le long des façades côté rue. Situées en point haut du nivellement, elles ne permettraient pas de récupérer les eaux de la voirie, mais pourraient abattre les précipitations de la surface des toitures inclinées vers ces façades. Des trop-pleins seraient prévus en cas de surplus d'eau.

Les photos ci-dessous, prises dans le secteur d'étude 4 (Censier, voir plus loin), confirment que ce principe existe déjà à Paris, et qu'il suffirait, en d'autres situations analogues, de dévier la descente EP afin que les eaux pluviales arrivent directement dans les jardinières existantes ou susceptibles d'être créées.

Ce système favorise le « verdissement » de la ville et la création d'îlots de fraîcheur par une végétation bien alimentée en eau.



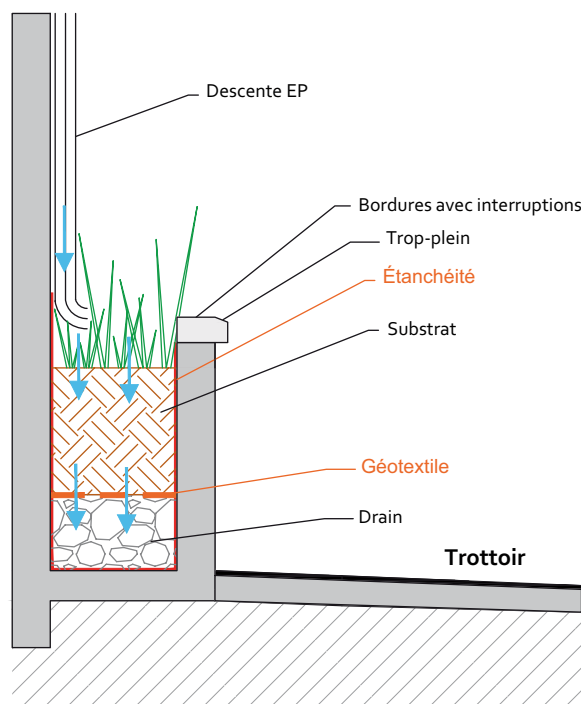
© ATM



© ATM

Exemple d'aménagement d'une jardinière en pied d'immeuble récupérant les EP, rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5^e

Coupe de principe



© ATM

Coupe de principe d'une jardinière de pied de bâtiment

Avantages, inconvénients, contraintes

Avantages :

- Esthétique et paysager, verdissement et création d'îlot de fraîcheur en ville
- Facilité de mise en œuvre, les descentes EP en façade étant existantes et réglementairement séparatives sur les façades (eaux pluviales uniquement)
- Sur la coupe de la page précédente, le drainage et la surverse pourraient se faire dans un caniveau (à grille ou non) et non directement sur le trottoir
- Dispositif existant à Paris.

Inconvénients :

- Sur les espaces publics, la mise en œuvre n'est possible que lorsque la largeur du trottoir ou les emprises privées sont suffisantes
- Dans l'hypothèse d'une infiltration de ces eaux, et non d'un drainage avec rejet à ciel ouvert, la question de la concentration de l'infiltration se pose (surface récupérée par rapport à la surface d'infiltration) : impact sur le sous-sol.

Contraintes de mises en œuvre :

- Dispositif à adapter aux entrées de bâtiment, aux vitrines des commerces etc.
- Mise en œuvre simple et peu coûteuse.

Hypothèses et simulation d'abattement

Hypothèses

- Jardinières de 50 cm de large, 50 cm de substrat, avec un drainage et une surverse sur le trottoir.
- L'abattement d'eau pluviale est quantifié avec les mêmes hypothèses que pour les toitures végétalisées, provenant du projet de zonage pluvial parisien : un substrat de 50 cm de hauteur permet un abattement de 32 mm.
- Trop-plein placé au minimum à 32 mm au-dessus de la terre végétale et de préférence de 5 à 20 cm au-dessus. En effet, plus le trop-plein est haut, plus le volume « filtré » par les jardinières est important.

Simulation de l'abattement

Le tableau ci-dessous présente les résultats de simulation suivant la concentration de la filtration :

Jardinières de pied d'immeuble									
Largeur de la jardinière (cm)	50								
Hauteur de substrat (cm)	50								
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	32								
Capacité de rétention maximale (mm)	32								
Concentration de la filtration	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	16	10,7	8	6,4	5,3	4,6	4,0	3,6	3,2
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	100%	67%	50%	40%	33%	29%	25%	22%	20%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	100%	99%	98%	96%	90%	80%	73%	66%	62%

Même pour une concentration de filtration élevée, cette solution apparaît particulièrement efficace pour l'abattement du volume annuel de l'année de référence. Les résultats de simulation d'abattement sont disponibles en annexe pour tous les types de profils.

3- L'ESPACE PRIVÉ

SOLS PERMÉABLES EN CŒUR D'ÎLOT

Descriptif



Cour perméable, photomontage Apur, Paris 20^e

Les cœurs d'îlots représentent une surface non négligeable de Paris. Ces espaces sont nécessairement difficiles à raccorder aux réseaux d'assainissement puisque ceux-ci se trouvent sous les espaces publics. L'introduction de solutions visant à supprimer leur raccordement, ou au moins à diminuer les volumes ruisselés, paraît donc intéressante.

La mise en œuvre de sols perméables en cœur d'îlot pourrait ne concerner que l'infiltration diffuse. Toutefois, ce type de revêtement ne convient pas aux cours et venelles sur sous-sol bâti (caves ou parkings souterrains). Dans ce cas, des jardins sur dalle semblent plus adaptés (cf. toits végétalisés, jardins sur dalle). La concentration des volumes d'EP pourrait cependant être envisagée lorsque des puits ou puisards existent et que la nappe phréatique n'est pas trop proche du terrain naturel.

De nombreux types de sols perméables peuvent être adaptés :

- Pavés ou dalles à joints engazonnés ou sablés
- Résine drainante
- Pavés poreux.



Cour perméable et plantée, Paris 4^e



Sols perméables, Village Saint-Paul, Paris 4^e



Jardin privé avec dalles perméables, Chicago

Avantages, inconvénients, contraintes

Type de sols perméables	Avantages	Inconvénients	Contraintes de mise en œuvre
Pavés à joints engazonnés ou sablés	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'infiltration concentrée : le matériau limite le ruissellement en interceptant l'eau et en favorisant l'évapotranspiration et l'infiltration (sans stockage). Cette technique peut donc être utilisée partout. Le sol n'a pas besoin d'avoir une perméabilité particulièrement bonne. • Pas de problématique de colmatage • Verdissement du cœur d'îlot et lutte contre les îlots de chaleur urbains 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible abattement de pluie, en particulier pour les événements pluvieux importants • Aucune capacité de rétention • Remplacement facile des pavés, mais intervention chronophage et nécessitant une main-d'œuvre qualifiée 	<ul style="list-style-type: none"> • La pose et le calepinage sont réalisés manuellement. L'intervention est longue et nécessite une main-d'œuvre qualifiée.
Dalles engazonnées ou sablées	<ul style="list-style-type: none"> • Verdissement du cœur d'îlot et lutte contre les îlots de chaleur urbains 	<ul style="list-style-type: none"> • Revêtement peu adapté aux PMR, il ne peut donc pas être mis en œuvre sur toute la surface du cœur d'îlot • Une fertilisation régulière peut être nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation hors période de gel et de préférence hors grosse chaleur • Le temps de mise en service peut varier suivant le produit, mais est en général supérieur à 2 semaines
Résine drainante	<ul style="list-style-type: none"> • Évite la formation de verglas • Mise en œuvre rapide et nécessitant peu d'engins (application manuelle à la raclette ou à la taloche, lissage à la règle) • Bonne qualité d'adhérence • Produit écologique : mise en œuvre à froid, sans solvant • Remplacement et réparation aisés et rapides. La remise en circulation n'est cependant pas immédiate. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le colmatage peut être accéléré par d'éventuels travaux à proximité 	<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation par temps sec, hors grand froid et grosse chaleur • Le temps de séchage peut varier d'une heure à plusieurs jours suivant la résine utilisée.
Pavés poreux	<ul style="list-style-type: none"> • Effet visuel proche de l'existant à Paris 	<ul style="list-style-type: none"> • Le colmatage peut être accéléré par d'éventuels travaux à proximité 	<ul style="list-style-type: none"> • La pose et le calepinage sont réalisés manuellement. L'intervention est longue et nécessite une main-d'œuvre qualifiée.

Hypothèses et simulation d'abattement

Hypothèses

Ces dispositifs sont d'autant plus efficaces que la pente du terrain est faible, ce qui est souvent le cas en cœur d'îlot, et que la perméabilité du sol est bonne.

- Pavés à joints engazonnés et dalles engazonnées : implantation sur un tiers de la surface des cours intérieures. En effet, une partie des cours est utilisée pour les locaux poubelles, abris vélos etc., et il est préférable de conserver un cheminement en revêtement « dur ». La concentration de l'infiltration est donc de 3.

- Résine drainante et pavés poreux : implantation sur 2/3 de la surface des cours intérieures. La concentration de l'infiltration est donc de 1,5.
- Seuls les deux tiers de la surface des cours intérieures peuvent être support de ce type de revêtement, une partie de ces cours étant utilisées pour les locaux poubelles, abris vélos, etc.
- L'efficacité d'abattement des dalles engazonnées et des pavés poreux est du même ordre que celle des résines drainantes.

Simulation de l'abattement

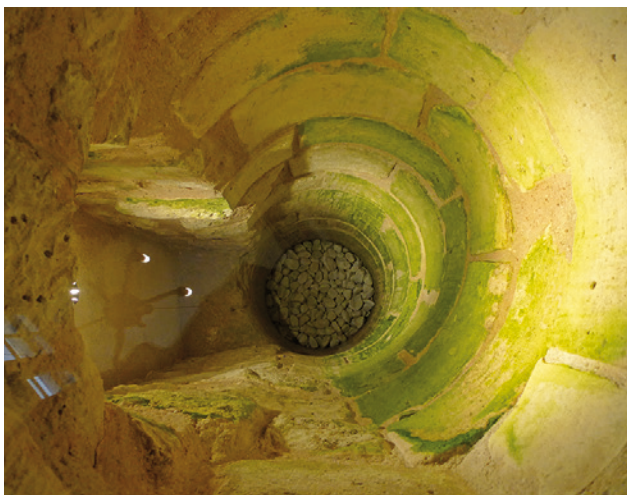
	Pavés à joints engazonnés en cœur d'îlot	Dalles engazonnées en cœur d'îlot	Résine drainante / pavés poreux en cœur d'îlot
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	3,75	86,5	86,5
Concentration de la filtration	3,0	3,0	1,5
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	1,3	28,8	57,7
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	8%	100%	100%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	27%	100%	100%

Simulation d'abattement - Pavés à joints engazonnés en cœur d'îlot - Dalles engazonnées en cœur d'îlot - Résine drainante/ pavés poreux en cœur d'îlot – ATM

3- L'ESPACE PRIVÉ

PUITS D'INFILTRATION

Descriptif



© Apur

Ancien puits de puisage, hôtel le Clos Notre-Dame, Paris 6^e

Les puits d'infiltration permettent d'infiltrer des eaux pluviales en profondeur. Un dispositif filtrant (béton poreux par exemple) et une chambre de décantation juste sous le niveau du sol permettent une première filtration des eaux pluviales.

Des puits d'infiltration (puisards) et des puits d'alimentation en eau ont existé à Paris (de l'ordre de 20 000 à 30 000 ont été recensés au XIX^e siècle dans le Paris ancien). Ils ont été interdits et parfois condamnés. Ceux qui existent encore sont aujourd'hui méconnus. Selon leur état et la profondeur de la nappe phréatique, leur remise en service pourrait être envisagée.



© Apur

Ancien puits de puisage dans une cave d'immeuble, Paris 6^e

Avantages, inconvénients, contraintes

Avantages :

- Faible emprise au sol
- Possibilité d'infiltrer sous les couches perméables ou à risque (argiles, gypse, etc.)

Inconvénients :

- Concentration des EP en un seul point d'infiltration
- Coût élevé
- Vérification régulière du bon fonctionnement de l'infiltration

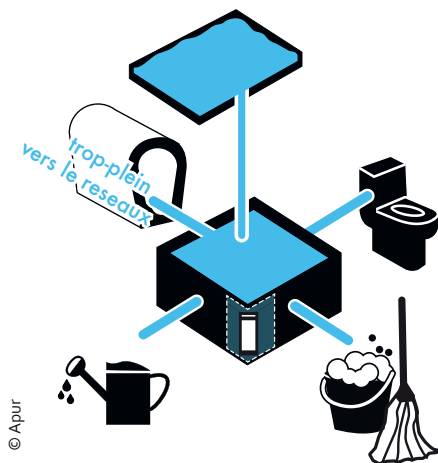
Contraintes de mises en œuvre :

- Travaux coûteux nécessitant des entreprises spécialisées et qualifiées.
- Des études complémentaires doivent montrer que le sous-sol ne présente aucun risque.
- Nécessité d'un ouvrage en amont permettant d'alimenter le puits de façon régulière.
- Trop-plein direct vers le réseau d'assainissement proscrit pour éviter un rejet permanent en cas de colmatage.

3- L'ESPACE PRIVÉ

RÉCUPÉRATION DANS UNE CUVE DE STOCKAGE L'EXEMPLE DES SANITAIRES

Descriptif



Principe de fonctionnement d'une cuve de stockage pour la réutilisation de l'eau de pluie

Avec le changement climatique, la ressource en eau devient de plus en plus précieuse. Même si aujourd'hui l'eau ne manque pas en région parisienne, sa potabilisation coûte cher, alors que tous les usages ne nécessitent pas la même qualité d'eau.

La récupération des eaux pluviales pour des usages domestiques consiste en l'installation d'une cuve de stockage qui récupère les eaux issues des surfaces non accessibles des bâtiments (toitures non accessibles en particulier, conformément à la réglementation en vigueur). Cette eau peut ensuite être utilisée pour l'arrosage, le nettoyage ou l'alimentation des toilettes par exemple, grâce à un système de pompe, ou même parfois gravitairement.

Parmi les réutilisations possibles, seul le cas d'une alimentation des toilettes sera examiné à ce stade.



Système de récupération des eaux pluviales pour l'alimentation des sanitaires - Philharmonie de Paris, Paris 19^e

Avantages, inconvénients, contraintes

Avantages :

- Limite la consommation d'eau potable pour l'usage des sanitaires.
- Consommation en eau constante toute l'année, donc abatement « durable » et facilement prévisible.
- Particulièrement adapté pour des toilettes très utilisés : bars, restaurants, cinémas, théâtres etc. car le nombre de raccordement est alors minimal pour une utilisation maximale.
- Pourrait être alimenté en appoint par le réseau ENP.

Inconvénients :

- Difficulté de raccordement dans les étages d'immeubles existants, notamment pour des immeubles anciens.
- Impossible à mettre en œuvre lorsque les gouttières en façade ne sont pas en séparatif (eau pluviale uniquement).

Contraintes de mises en œuvre :

- Un apport en eau potable ou non potable (réseau) doit impérativement être conservé, d'où une double alimentation, chaque réseau devant être clairement et durablement identifié.
- Sur des bâtiments anciens, les modifications des réseaux peuvent s'avérer complexes.
- La mutualisation peut être compliquée à mettre en place, car les îlots sont constitués de plusieurs copropriétés.
- Suivant la configuration des lieux, un long linéaire de réseaux peut être nécessaire, d'où une installation parfois coûteuse.
- Un comptage du volume d'eaux pluviales consommées doit être mis en place afin d'estimer le montant de la taxe d'assainissement dans le cas d'une récupération pour les WC.
- La cuve ne peut être reliée directement à l'égout afin de s'assurer que le dispositif soit entretenu en cas de dysfonctionnement. Un trop plein est acceptable vers un autre organe de gestion des eaux pluviales.

Hypothèses et simulation d'abattement

Hypothèses

- Coefficient de ruissellement des toitures : 1.
- Consommation journalière moyenne par personne pour les toilettes : 25L (Source : www.eaufrance.fr).
- Cuve d'un volume égal à la consommation journalière du nombre de personnes qui l'utilise, soit 25L par personne (ou 0,025 m³). Ainsi, la cuve est vidée chaque jour et son volume est toujours disponible lorsqu'il pleut plusieurs jours de suite.

Simulation de l'abattement

		Nombre de personnes				
		1	50	200	500	
Besoin journalier en eau pour les sanitaires (m ³)		0,025	1,25	5	12,5	
Volume de la cuve (m ³)		0,025	1,25	5	12,5	
Abattement de la pluie de	4 mm	Surface maximale récupérable (m ²)	6,3	313	1 250	3 125
		Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré	25 %			
		Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré	73 %			
		Nombre de jours de rejet	94			
		Autonomie en eau	35 %			
	8 mm	Surface maximale récupérable (m ²)	3,1	156	625	1 563
		Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré	50 %			
		Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré	98 %			
		Nombre de jours de rejet	5			
		Autonomie en eau	23 %			
	12 mm	Surface maximale récupérable (m ²)	2,1	104	417	1 042
		Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré	75 %			
		Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré	99 %			
		Nombre de jours de rejet	1			
		Autonomie en eau	16 %			
	16 mm	Surface maximale récupérable (m ²)	1,6	78	313	781
		Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré	100 %			
		Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré	100 %			
		Nombre de jours de rejet	0			
		Autonomie en eau	12 %			

La réutilisation d'eau de pluie pour les sanitaires : un dispositif particulièrement adapté aux grandes villes

Lorsque l'on cherche à faire de la réutilisation, on souhaite habituellement :

- Réduire les volumes d'eau pluviale qui partent en égout
- Réduire les consommations d'eau potable utilisée

Ces deux objectifs sont difficiles à atteindre simultanément, car réduire les volumes d'eau pluviale nécessite d'avoir des cuves souvent vides pour absorber les pluies alors que la recherche d'économies d'eau potable nécessite d'avoir de grandes cuves pour être le plus autonome possible.

Le contexte parisien (bâti dense, peu d'espace disponible et existence d'un réseau d'ENP) tend à privilégier la mise en place

de petites cuves de récupération pour les sanitaires (WC) de lieux fréquentés où les cuves sont susceptibles de se vider fréquemment. L'autonomie en eau potable sera moindre mais l'existence d'un réseau d'Eau non potable peut servir d'appoint.

Afin d'éviter d'installer trop de réseaux à l'intérieur des immeubles existants, les cuves pourraient être installées principalement au rez-de-chaussée ou dans les caves et parkings afin d'alimenter par exemple, restaurants, bars, salles de cinéma, salles de concert...

Ces cuves dimensionnées en fonction des besoins en eau et d'une réduction maximale des rejets en égouts (et non en fonction de la pluviométrie) peuvent être de taille réduite et donc répondre à la fois aux contraintes du contexte urbain et aux objectifs fixés par le zonage pluvial.

3- L'ESPACE PRIVÉ

ALIMENTATION DES RÉSERVOIRS DE CHASSE

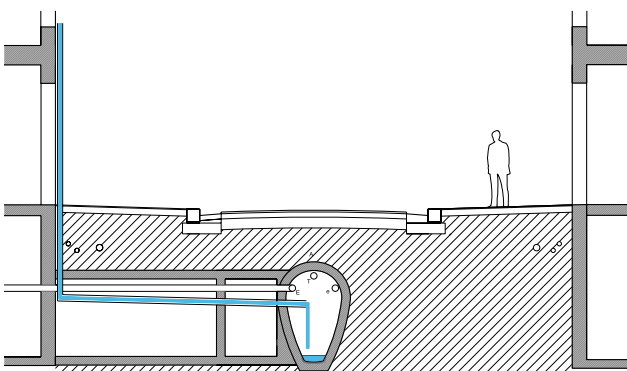
Descriptif



© Apur

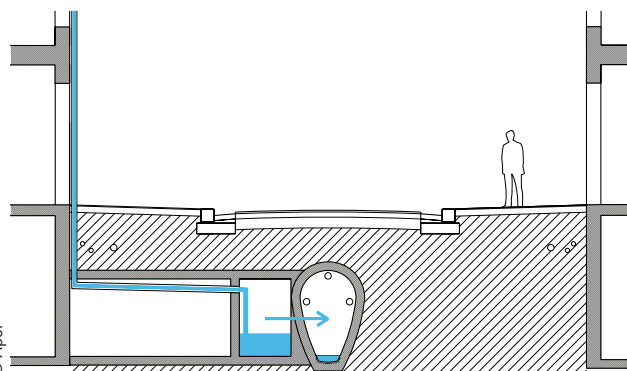
Réservoir de chasse

Le réseau d'assainissement parisien est équipé de nombreux réservoirs de chasse, destinés au curage régulier des égouts, dont certains ne sont plus alimentés par le réseau d'eau non potable. Les EP pourraient être dirigées vers ces réservoirs. La récupération est possible par la connexion des avaloirs ou des descentes de toiture aux réservoirs de chasse non raccordés au réseau d'eau non potable.



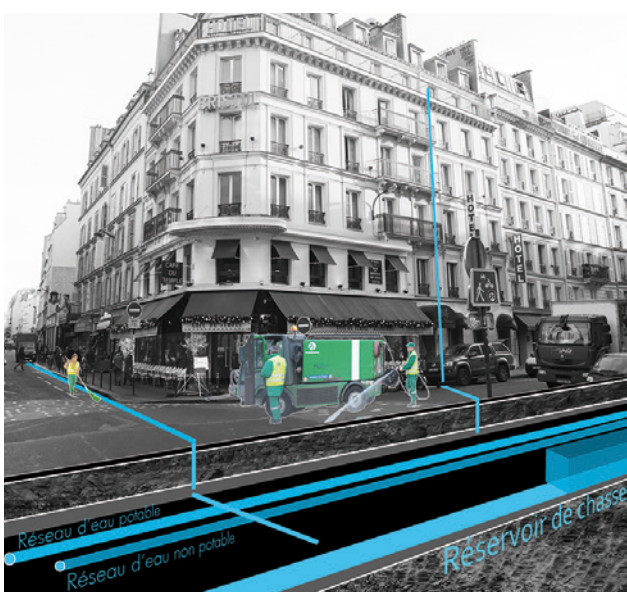
© Apur

Coupe sur la connexion des gouttières vers les eaux usées avant de se déverser dans les égouts



© Apur

Projet de déconnexion des gouttières, l'eau de pluie se déverse dans un réservoir de chasse



© Apur

Vue en coupe du carrefour rue du Faubourg du Temple et rue de Malte. État actuel : les gouttières sont reliées directement à l'égout.



© Apur

État projet : connexion des gouttières vers les réservoirs de chasse des égouts

Avantages, inconvénients, contraintes

Avantages :

- Facilité de mise en œuvre, les réservoirs de chasse étant déjà réalisés, lorsque les gouttières en façade sont bien en séparatif (eau pluviale uniquement)
- Réutilisation de l'ensemble des eaux pluviales du bassin-versant récupéré, quelle que soit l'importance de la pluie
- Pas de déconnexion du réseau d'ENP car uniquement alimentation des réservoirs de chasse clôturés
- Remise en service de réservoir de chasse sans augmentation des volumes d'ENP consommés.

Inconvénients :

- Chasses d'eau conditionnées par la pluviométrie
- Le réservoir doit être situé à proximité d'un avaloir ou d'une

- descente de toiture et le raccordement doit être possible
- Pas d'abattement réel du volume d'eau pluviale à traiter en station d'épuration : le rejet au réseau est seulement en partie retardé. Les débits en temps de pluie peuvent même être augmentés de façon ponctuelle au moment de la chasse.

Contraintes de mises en œuvre :

- Raccordement des avaloirs ou des descentes de toiture au réservoir non connecté au réseau d'eau non potable.
- Mise en place d'un dégrillage à l'entrée des avaloirs et entretien régulier de ce dispositif
- Remise en service du système de déclenchement automatique de la chasse et remise en état du réservoir existant lorsque nécessaire.

Hypothèses et simulation d'abattement

Hypothèses

- Capacité du réservoir de chasse de 5 m³
- Alimentation du réservoir uniquement par les eaux pluviales
- Les chasses se déclenchent dès que le réservoir est plein, même par temps de pluie.

Simulation de l'abattement

L'objectif de cette simulation est de définir la surface d'apport (bassin-versant récupéré) pour que la fréquence de chasse soit satisfaisante, c'est-à-dire entre 1 et 5 chasses par jour. Le réservoir de chasse n'étant alimenté que par l'eau de pluie, les chasses n'interviendront que ces jours-là.

La chronologie de pluie utilisée présente 155 jours de pluie par an, pour une pluviométrie totale annuelle de 699 mm, soit en moyenne 4,5 mm par jour de pluie. L'objectif est donc de trouver les surfaces générant un volume de 5 à 25 m³ (1 à 5 chasses) pour une pluie de 4,5 mm :

Réservoirs de chasse					
Capacité de rétention maximale (m ³)	5				
Nombre de chasses par jour de pluie	1	2	3	4	5
Superficie du bassin-versant à récupérer (m ²)	222	443	665	887	1 109

Résultats de simulation - réservoir de chasse – ATM

Tableau de synthèse des solutions techniques pour les espaces privés parisiens

	Récupération		Type d'évacuation			Abattement possible de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré	Abattement possible du volume annuel sur le bassin-versant récupéré	Avantages et inconvénients				Contraintes	
	Toitures	Sol	Infiltration	Évapotranspiration	Réutilisation			Lutte contre les flots de chaleur	Réemploi	Biodiversité	Dimension pédagogique	Contraintes de mise en œuvre	Contraintes d'entretien
Toits végétalisés, jardins sur dalle	X	X		X		25% à 100%	73% à 100%						
Jardinières en pied d'immeuble	X			X		20% à 100%	62% à 100%						
Sols perméables en cœur d'îlot		X	X			8%	27%						
		X	X			100%	100%						
Puits d'infiltration	X	X	X			100%	100%						
Recyclage / sanitaires, arrosage, nettoyage	X				X	6% à 100%	22% à 100%						
Recyclage / réservoirs de chasse	X	X			X	100%	100%						

Très favorable
 Favorable
 Peu favorable

Conclusion

Le contexte métropolitain en matière de gestion des eaux pluviales dans lequel s'inscrit Paris est une formidable opportunité pour la ville de repenser la gestion de ces eaux et, plus globalement, de faire évoluer la perception de leur présence en ville. En effet, le SIAAP arrivant au terme d'un politique de modernisation de ses usines et du développement de son infrastructure de transport, ne sera plus en mesure de traiter des volumes d'eau supplémentaires générés par l'accroissement de l'imperméabilisation des sols.

Le temps du « tout tuyau » doit laisser place à des techniques moins lourdes et moins onéreuses remettant l'eau au cœur de l'aménagement urbain. Il aura fallu un siècle et de nombreux débats pour imperméabiliser et assainir la ville sur la base d'une vision strictement hydraulique et centralisée. Les limites de cette conception et l'urgence du changement climatique imposent de concevoir la ville autrement, de renouer avec sa perméabilité sans qu'un nouveau siècle soit nécessaire.

Ces procédés, qualifiés de « plus doux », font souvent appel à des techniques anciennes et au bon sens pour gérer l'eau de pluie au plus près de son point de chute. Tranchées urbaines sèches ou plantées, fosses d'arbres décaissées, revêtements perméables, sol fertile (pleine terre) renouent peu à peu avec des techniques de gestion de l'eau qui ont longtemps eu cours dans les villes et les campagnes.

Les simulations hydrauliques réalisées sur les espaces publics et les espaces privés parisiens (des profils de voies et tissus urbains représentatifs) montrent que, contrairement à ce que prétendent les critiques les plus courantes, de nombreux dispositifs se révèlent performants en termes d'abattement des pluies et d'adaptation au contexte parisien.

Mais surtout, ces mêmes techniques sont un moyen de repenser les espaces publics et privés de Paris en enrichissant leurs spécificités (maîtrise du nivellement, matériaux de qualité, végétation plus présente et vigoureuse...), de répondre au tropisme aquatique des citoyens en diversifiant les rapports à l'eau (création de bassins permanent ou éphémère, lisibilité du cheminement de l'eau, recyclage...), de réaliser des économies importantes (passage d'une ingénierie lourde à des dispositifs plus légers...).

Une gestion des eaux pluviales renouvelée va donc bien au-delà des seuls objectifs affichés généralement (lutte contre les débordements de réseaux et les déversements d'eaux usées à la ressource). Elle permet aussi de réduire les effets des îlots de chaleur, de favoriser le réemploi et d'améliorer considérablement la biodiversité en ville...

Le zonage pluvial (ou Plan Pluie à Paris) peut être une formidable opportunité pour Paris d'atteindre des objectifs environnementaux ambitieux. Une des conditions de réussite réside dans la capacité à combiner les solutions techniques et à les adapter en fonction des contextes. Cela nécessite à la fois de tirer les leçons des expériences menées en France et à l'étranger depuis plusieurs années, d'engager davantage d'expérimentations concrètes, de développer des stratégies de projet qui permettent de dépasser les fonctionnements en silos qui font souvent obstacle à la mise en œuvre des techniques dites « alternatives ».

Au XXI^e siècle, l'eau ne peut plus apparaître uniquement comme une menace (inondation, vecteur de maladie...), elle doit aussi être considérée comme une ressource à préserver, une ressource et une présence essentielles au devenir des villes.

Le travail constant engagé depuis plusieurs années par les services de la DPE pour mettre en œuvre ce changement doit aujourd'hui pouvoir être porté et accompagné pour que l'eau devienne un facteur de résilience urbaine incontestable sur lequel la ville de demain doit s'appuyer.

III- ANNEXES

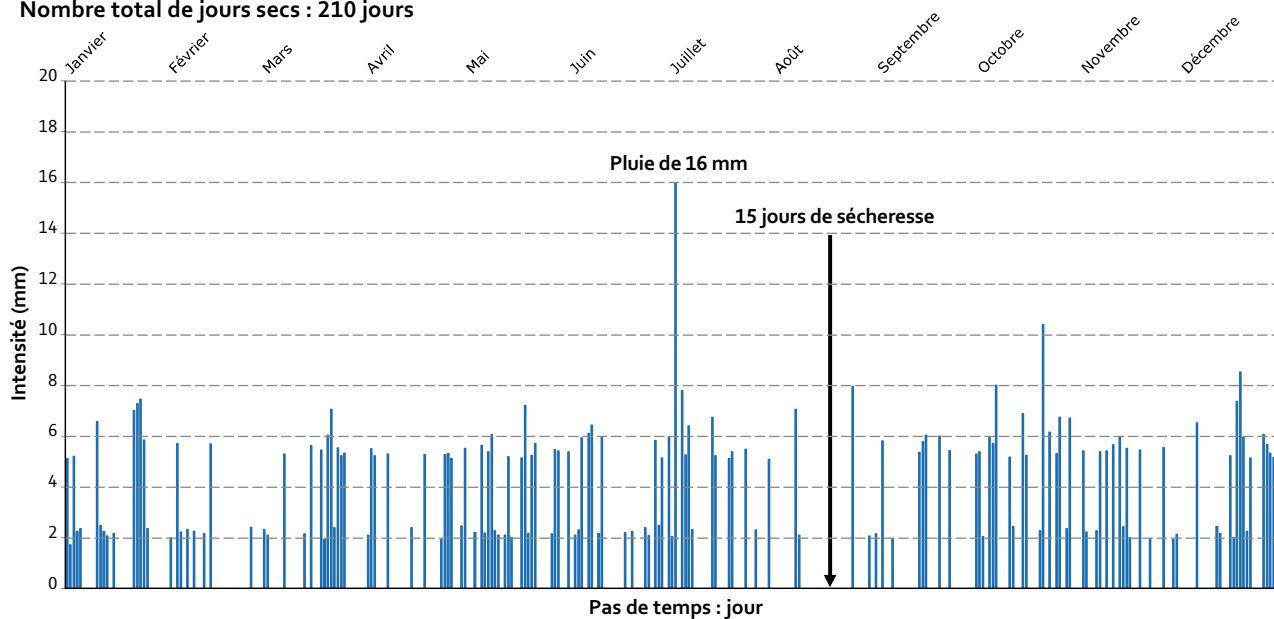
Méthode de calcul de l'abattement

La méthode de calcul de l'abattement des différents dispositifs se base sur une année de précipitations de référence, élaborée par la DEA de Seine-Saint-Denis ⁽⁹³⁾ et l'agence Composante Urbaine à partir de 30 ans de données pluviométriques en Île-de-France (1977 à 2004). Cette année de référence a été adaptée pour les besoins de l'étude. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Pas de temps journalier
- 155 jours de pluie
- Une pluie de 16 mm (pluie de période de retour annuelle de durée environ 2h)
- Une période de sécheresse de 15 jours
- Total des précipitations annuelles : 699 mm

Pluviométrie Seine-Saint-Denis de référence (moyenne des années 1977 à 2004)

Nombre total de jours secs : 210 jours



Pluie de référence utilisée

Source : Direction de l'Eau et de l'Assainissement du Conseil Général du 93 et Composante Urbaine, adaptée par ATM

Hypothèses de calcul retenues

Les hypothèses suivantes ont été retenues pour les calculs de l'ensemble des dispositifs :

Coefficient de ruissellement

Il a été considéré un coefficient de ruissellement de 1 pour tous les espaces minéralisés : espaces publics, toitures, cours intérieures etc. Cela signifie que l'on considère que toute l'eau tombant sur ces espaces ruisselle pour se retrouver dans les dispositifs de gestion des EP. Les volumes réellement ruisselés sont donc surestimés et l'abattement des diverses solutions sous-estimé.

Bassins-versants récupérés et profils des espaces publics

Pour des questions de faisabilité de réalisation des différentes solutions dans le contexte parisien, il a été décidé de ne jamais récupérer les eaux de chaussée dans les ouvrages prévus afin de préserver le coulage de caniveaux. Sur les espaces publics, seules les EP des trottoirs, des pistes cyclables et des stationnements sont ainsi récupérées. Concernant le stationnement, les seuls profils de voirie adaptés sont les profils dits en « Lincoln » car ils permettent de maintenir le coulage des caniveaux. Afin d'adapter cette étude au cas particulier de Paris, tous des calculs ont été réalisés selon des profils types des voiries parisiennes et, pour simplifier les calculs, des pistes cyclables... Les dimensions suivantes ont été considérées :

- Largeur du stationnement : 1,8 m
- Dimensions des fosses d'arbre : 1,5 m x 1,5 m
- Distance moyenne entre chaque arbre : 7 m

La largeur des bordures a été négligée dans tous les calculs. À titre d'exemple, les calculs pour la solution technique « enrobé drainant » font l'hypothèse que l'enrobé est aussi mis en place sur la bordure.

Pente longitudinale des espaces publics

Pour des questions évidentes de simplicité et de clarté, la pente longitudinale des espaces publics n'est pas prise en compte dans les calculs. Une forte pente du profil en long peut réduire l'efficacité des dispositifs ou le volume de stockage des différents ouvrages.

Infiltration et perméabilité du sol

Certaines des techniques présentées permettent l'abattement de la pluie en infiltrant une partie des eaux dans le sol et le sous-sol.

Dans le contexte parisien l'infiltration n'est pas toujours envisageable. D'après le règlement du zonage pluvial de Paris :

- L'infiltration concentrée est proscrite en cas de présence de gypse ludien, d'une zone argileuse ou de remblai de mauvaise qualité sur une épaisseur supérieure à 3M.
- En zone de sol sensible, l'infiltration forcée en surface est tolérée, à condition qu'une étude de sol montre l'absence d'impact sur la stabilité du sous-sol.
- Les puits d'infiltration sont envisageables si l'infiltration est réalisée au-delà des horizons sensibles.

Pour toutes les techniques favorisant l'infiltration de l'eau de pluie, il a été considéré une perméabilité du sol de $K=1 \times 10^{-6}$ m/s pour calculer l'abattement de pluie. Si l'on exprime cette perméabilité en millimètres infiltrés par jour, cela représente 86,5 mm/j. Il s'agit d'une perméabilité faible. Pour des sols plus perméables, les dispositifs développés dans ce rapport seraient donc plus efficaces. Un taux de concentration de l'infiltration est donné pour chaque cas étudié. Il s'agit du rapport entre la surface récupérée (bassin-versant récupéré) et la surface permettant l'infiltration.

Lecture des résultats

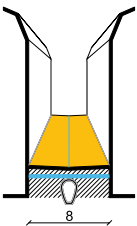
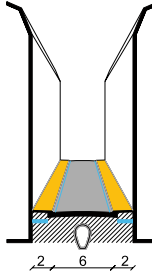
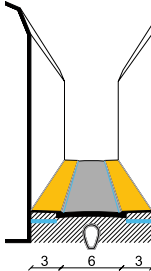
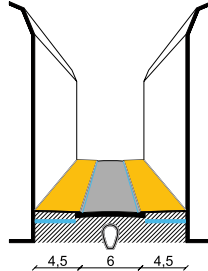
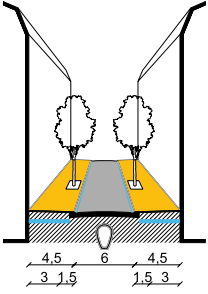
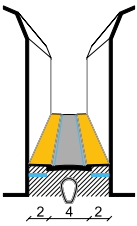
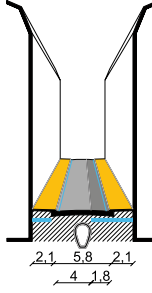
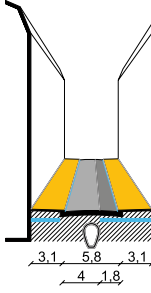
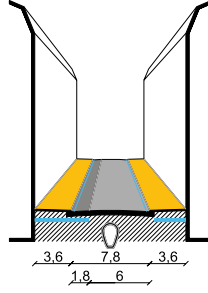
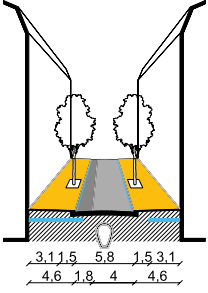
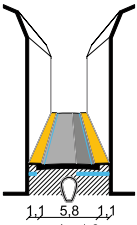
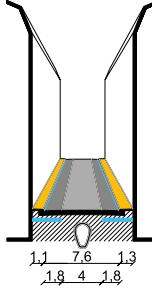
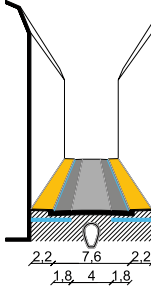
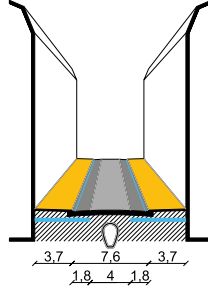
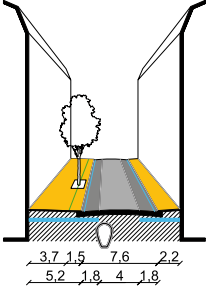
Chaque solution technique est accompagnée d'un tableau présentant les résultats des simulations pour le profil le plus adapté à la technique en question. Les définitions du tableau sont les suivantes :

Nom du profil	
Largeur de la rue (m)	Les rues caractéristiques de Paris vont de 8 à 30 m de largeur. Elles ont été classées en groupes représentatifs.
Profil	Pour chaque largeur de rue, différents profils existent. Chaque profil est dénommé par une lettre. Tous les profils types de Paris sont donnés en annexe.
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	Il s'agit de la lame d'eau maximale qu'est capable d'abattre le dispositif en une journée s'il ne récupère que les eaux de pluie qui tombent directement dans l'ouvrage. Suivant les cas, cette lame d'eau peut dépendre de plusieurs facteurs : <ul style="list-style-type: none"> • Capacité maximale du dispositif • Perméabilité du sol (pour les ouvrages d'infiltration) • Évapotranspiration (pour les toitures végétalisées, jardins sur dalle, jardinières) • Besoin en eau (pour le recyclage pour l'alimentation des toilettes).
Surface d'infiltration (m)	Il s'agit de la surface du dispositif permettant l'infiltration. Pour les espaces publics, cette surface est calculée en mètres carrés par mètres linéaires (m ² /ml), unité homogène à des mètres.
Bassin-versant récupéré (m)	Il s'agit de la surface récupérée dans l'ouvrage de gestion des eaux pluviales, incluant la surface de l'ouvrage lui-même. L'unité est aussi des m ² /ml, homogène à des mètres.
Concentration de l'infiltration	C'est le rapport bassin-versant récupéré/surface d'infiltration.
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	Suivant le principe d'équivalence proposé par le zonage pluvial parisien, il s'agit du rapport lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1/concentration de l'infiltration.
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	C'est le rapport lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré/16 mm.
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	C'est le résultat du calcul (abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré) x (bassin-versant récupéré)/largeur de la rue.
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	Il s'agit du résultat de la simulation journalière sur l'année de référence construite, suivant la lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré. Cela représente l'efficacité de la solution technique en matière d'abattement sur une année complète.
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)	C'est le résultat du calcul (abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré) x (bassin-versant récupéré) / (largeur de la rue).

Les calculs d'abattement de chaque solution technique ont aussi été réalisés pour l'ensemble des profils types parisiens. Les résultats se trouvent en annexe dans des tableaux réalisés sur le même modèle.

Classification de types de voies à Paris

Par largeur des voies en fonction du rapport entre les espaces de circulation des piétons et des voitures

Rue de 8 à 10 mètres 99 km de linéaire 7% des rues de Paris	Rue de 10 à 12 mètres 198 km de linéaire 14% des rues de Paris	Rue de 12 à 15 mètres 360 km de linéaire 25,5% des rues de Paris	Rue de 15 à 20 m non plantée 198 km de linéaire 14% des rues de Paris	Rue de 15 à 20 m plantée
A  8	A 19%  2 6 2	A 23%  3 6 3	A 14,5%  4,5 6 4,5	D 16%  4,5 6 4,5 3 1,5 1,5 3
Chaussée : 0% Stationnements : 0% Trottoirs : 100% Potentiellement Poreux : 100%	Chaussée : 60% Stationnements : 0% Trottoirs : 40% Potentiellement Poreux : 40%	Chaussée : 50% Stationnements : 0% Trottoirs : 50% Potentiellement Poreux : 50%	Chaussée : 40% Stationnements : 0% Trottoirs : 60% Potentiellement Poreux : 60%	Chaussée : 40% Stationnements : 0% Trottoirs : 60% Potentiellement Poreux : 60%
B 35%  2 4 2	B 41%  2,1 5,8 2,1 4 1,8	B 28%  3,1 5,8 3,1 4 1,8	B 9%  3,6 7,8 3,6 1,8 6	E 18,5%  3,1 1,5 5,8 1,5 3,1 4,6 1,8 4 4,6
Chaussée : 50% Stationnements : 0% Trottoirs : 50% Potentiellement Poreux : 50%	Chaussée : 40% Stationnements : 18% Trottoirs : 42% Potentiellement Poreux : 60%	Chaussée : 33% Stationnements : 15% Trottoirs : 52% Potentiellement Poreux : 67%	Chaussée : 40% Stationnements : 12% Trottoirs : 48% Potentiellement Poreux : 60%	Chaussée : 27% Stationnements : 12% Trottoirs : 61% Potentiellement Poreux : 73%
C 54%  1,1 5,8 1,1 4 1,8	C 40%  1,1 7,6 1,3 1,8 4 1,8	C 49%  2,2 7,6 2,2 1,8 4 1,8	C 19%  3,7 7,6 3,7 1,8 4 1,8	F 23%  3,7 1,5 7,6 2,2 5,2 1,8 4 1,8
Chaussée : 50% Stationnements : 22% Trottoirs : 28% Potentiellement Poreux : 50%	Chaussée : 40% Stationnements : 36% Trottoirs : 24% Potentiellement Poreux : 60%	Chaussée : 33% Stationnements : 30% Trottoirs : 37% Potentiellement Poreux : 67%	Chaussée : 27% Stationnements : 24% Trottoirs : 49% Potentiellement Poreux : 73%	Chaussée : 27% Stationnements : 24% Trottoirs : 49% Potentiellement Poreux : 73%

Rue de 20 à 30 m non plantée		Rue de 20 à 30 m plantée		Rue plus de 30 mètres		
213 km de linéaire 15% des rues de Paris		213 km de linéaire 15% des rues de Paris		205 km de linéaire 14,5% des rues de Paris		
A 16%		D 27%		D 34%		
Chaussée : 30% Stationnements : 0% Trottoirs : 70% Potentiellement Poreux : 70%		Chaussée : 30% Stationnements : 0% Trottoirs : 70% Potentiellement Poreux : 70%		Chaussée : 40% Stationnements : 0% Trottoirs : 60% Potentiellement Poreux : 60%		
B 5%		E 19%		E 16%		
Chaussée : 30% Stationnements : 9% Trottoirs : 61% Potentiellement Poreux : 70%		Chaussée : 30% Stationnements : 9% Trottoirs : 61% Potentiellement Poreux : 70%		Chaussée : 40% Stationnements : 6% Trottoirs : 54% Potentiellement Poreux : 60%		
C 5%		F 28%		F 21%		
Chaussée : 30% Stationnements : 18% Trottoirs : 52% Potentiellement Poreux : 70%		Chaussée : 30% Stationnements : 18% Trottoirs : 52% Potentiellement Poreux : 70%		Chaussée : 40% Stationnements : 12% Trottoirs : 48% Potentiellement Poreux : 60%		Chaussée : 27% Stationnements : 12% Trottoirs : 61% Potentiellement Poreux : 73%

- Trottoirs
- Chaussée (voiture et bus)
- Stationnement
- Surface potentiel d'infiltration (trottoirs + stationnement)

Détails des calculs d'abattelements sur les profils de voiries

Enrobé drainant avec structure réservoir - Cas 1 : Mise en place sur trottoir uniquement - Récupération du trottoir uniquement									
Largeur de la rue (m)	8			10			12		
Profil	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	86,5								
Surface d'infiltration (m)	8	4	2,2	4	4,2	2,4	6	6,2	4,4
Bassin-versant récupéré (m)	8	4	2,2	4	4,2	2,4	6	6,2	4,4
Concentration de l'infiltration	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	87	87	87	87	87	87	87	87	87
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	100%	50%	28%	40%	42%	24%	50%	52%	37%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)	100%	50%	28%	40%	42%	24%	50%	52%	37%

Enrobé drainant avec structure réservoir - Cas 2 : Mise en place sur stationnement uniquement - Récupération du trottoir et du stationnement									
Largeur de la rue (m)	8	10		12		15			
Profil	C	B	C	B	C	B	C	E	F
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	86,5								
Surface d'infiltration (m)	1,8	1,8	3,6	1,8	3,6	1,8	3,6	1,8	3,6
Bassin-versant récupéré (m)	2,9	3,9	6	4,9	8	5,4	11	6,4	11
Concentration de l'infiltration	1,6	2,2	1,7	2,7	2,2	3,0	3,1	3,6	3,1
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	54	40	52	32	39	29	28	24	28
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	36%	39%	60%	41%	67%	36%	73%	43%	73%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)	36%	39%	60%	41%	67%	36%	73%	43%	73%

Enrobé drainant avec structure réservoir - Cas 3 : Mise en place sur trottoir et stationnement - Récupération du trottoir et du stationnement									
Largeur de la rue (m)	8			10			12		
Profil	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	86,5								
Surface d'infiltration (m)	8	4	4	4	6	6	6	8	8
Bassin-versant récupéré (m)	8	4	4	4	6	6	6	8	8
Concentration de l'infiltration	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	87	87	87	87	87	87	87	87	87
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	100%	50%	50%	40%	60%	60%	50%	67%	67%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)	100%	50%	50%	40%	60%	60%	50%	67%	67%

Enrobé drainant avec structure réservoir - Cas 1														
15						20						30		
A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	D	E	F
86,5														
9	7,2	7,4	9	9,2	7,4	14	12,2	10,4	14	12,2	10,4	18	16,2	14,4
9	7,2	7,4	9	9,2	7,4	14	12,2	10,4	14	12,2	10,4	18	16,2	14,4
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
60%	48%	49%	60%	61%	49%	70%	61%	52%	70%	61%	52%	60%	54%	48%
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
60%	48%	49%	60%	61%	49%	70%	61%	52%	70%	61%	52%	60%	54%	48%

Enrobé drainant avec structure réservoir - Cas 2					
20			30		
B	C	E	F	E	F
86,5					
1,8	3,6	1,8	3,6	1,8	3,6
7,9	14	7,9	14	9,9	18
4,4	3,9	4,4	3,9	5,5	5,0
20	22	20	22	16	17
100%	100%	100%	100%	98%	100%
40%	70%	40%	70%	32%	60%
100%	100%	100%	100%	100%	100%
40%	70%	40%	70%	33%	60%

Enrobé drainant avec structure réservoir - Cas 3														
15						20						30		
A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	D	E	F
86,5														
9	9	11	9	11	11	14	14	14	14	14	14	18	18	18
9	9	11	9	11	11	14	14	14	14	14	14	18	18	18
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
60%	60%	73%	60%	73%	73%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	60%	60%	60%
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
60%	60%	73%	60%	73%	73%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	60%	60%	60%

Pavés à joints engazonnés - Mise en place sur trottoir													
Largeur de la rue (m)	15				20				30				
Profil	A	D	E	F	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	3,75												
Surface d'infiltration (m)	3	3	3,2	2,2	8	6,2	4,4	8	6,2	4,4	12	10,2	8,4
Bassin-versant récupéré (m)	9	9	9,2	5,2	14	12,2	10,4	14	12,2	10,4	18	16,2	14,4
Concentration de l'infiltration	3,0	3,0	2,9	2,4	1,8	2,0	2,4	1,8	2,0	2,4	1,5	1,6	1,7
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	1,3	1,3	1,3	1,6	2,1	1,9	1,6	2,1	1,9	1,6	2,5	2,4	2,2
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	8%	8%	8%	10%	13%	12%	10%	13%	12%	10%	16%	15%	14%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	5%	5%	5%	3%	9%	7%	5%	9%	7%	5%	9%	8%	7%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	27%	27%	29%	33%	46%	42%	33%	46%	42%	33%	53%	50%	46%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)	16%	16%	18%	11%	32%	26%	17%	32%	26%	17%	32%	27%	22%

Tranchée drainante sèche - Mise en place sur le trottoir - Récupération du trottoir uniquement, hors passe-pied						
Largeur de la rue (m)	8	15		20		
Profil	A	A	B	A	B	C
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	86,5					
Capacité de rétention maximale (mm)	86,5					
Dimensions de la tranchée drainante (m)	0,50 x 0,30 (L x H)					
Surface d'infiltration (m)	0,5	1	0,5	1	1	1
Bassin-versant récupéré (m)	8	9	3,6	14	11,4	8,8
Concentration de l'infiltration	16,0	9,0	7,2	14,0	11,4	8,8
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	5,4	9,6	12,0	6,2	7,6	9,8
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	34%	60%	75%	39%	47%	61%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	34%	36%	18%	27%	27%	27%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)	91%	99%	99%	95%	98%	99%
Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)	91%	59%	24%	67%	56%	44%

Fosse d'arbre décaissée - Calcul pour 7 m linéaires (soit la distance moyenne entre 2 arbres) - Implantation sur le trottoir avec récupération de l'eau par ruissellement direct uniquement									
Largeur de la rue (m)	15			20			30		
Profil	D	E	F	D	E	F	D	E	F
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	86,5								
Capacité de rétention maximale (mm)	86,5								
Dimensions de la fosse d'arbre (m)	1,5 x 1,5 x 0,09 (L x l x H)								
Surface d'infiltration (m ²)	4,5	4,5	2,25	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Bassin-versant récupéré (m ²)	13,5	13,8	7,8	21	18,3	15,6	27	24,3	21,6
Concentration de l'infiltration	3,0	3,1	3,5	4,7	4,1	3,5	6,0	5,4	4,8
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	28,8	28,2	25,0	18,5	21,3	25,0	14,4	16,0	18,0
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	90%	100%	100%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	13%	13%	7%	15%	13%	11%	12%	12%	10%
<i>Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)</i>	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
<i>Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)</i>	13%	13%	7%	15%	13%	11%	13%	12%	10%

Fosse d'arbre décaissée - Calcul pour 7 m linéaires (soit la distance moyenne entre 2 arbres) - Implantation sur le trottoir avec récupération de l'eau par caniveau									
Largeur de la rue (m)	15			20			30		
Profil	D	E	F	D	E	F	D	E	F
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	86,5								
Capacité de rétention maximale (mm)	86,5								
Dimensions de la fosse d'arbre (m)	1,5 x 1,5 x 0,09 (L x l x H)								
Surface d'infiltration (m ²)	4,5	4,5	2,25	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Bassin-versant récupéré (m ²)	63	64,4	36,4	98	85,4	72,8	126	113,4	100,8
Concentration de l'infiltration	14,0	14,3	16,2	21,8	19,0	16,2	28,0	25,2	22,4
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	6,2	6,0	5,3	4,0	4,6	5,3	3,1	3,4	3,9
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	39%	38%	33%	25%	28%	33%	19%	21%	24%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	23%	23%	12%	17%	17%	17%	12%	12%	12%
<i>Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)</i>	95%	95%	90%	72%	80%	90%	60%	65%	70%
<i>Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)</i>	57%	58%	31%	50%	49%	47%	36%	35%	34%

Fosse d'arbre décaissée - Calcul pour 7 m linéaires (soit la distance moyenne entre 2 arbres) - Implantation sur le stationnement en Lincoln avec récupération de l'eau par ruissellement direct uniquement						
Largeur de la rue (m)	15		20		30	
	E	F	E	F	E	F
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	86,5					
Capacité de rétention maximale (mm)	86,5					
Dimensions de la fosse d'arbre (m)	1,5 x 1,5 x 0,09 (L x l x H)					
Surface d'infiltration (m ²)	2,25	2,25	2,25	4,5	2,25	4,5
Bassin-versant récupéré (m ²)	9,15	10,05	11,4	20,1	14,4	26,1
Concentration de l'infiltration	4,1	4,5	5,1	4,5	6,4	5,8
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	21,3	19,4	17,1	19,4	13,5	14,9
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	100%	100%	100%	100%	84%	93%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	9%	10%	8%	14%	6%	12%
<i>Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)</i>	100%	100%	100%	100%	100%	100%
<i>Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)</i>	9%	10%	8%	14%	7%	12%

Fosse d'arbre décaissée - Calcul pour 7 m linéaires (soit la distance moyenne entre 2 arbres) - Implantation sur le stationnement en Lincoln avec récupération de l'eau par caniveau						
Largeur de la rue (m)	15		20		30	
	E	F	E	F	E	F
Lame d'eau maximale abattue en une journée pour une concentration de l'infiltration de 1 (mm)	86,5					
Capacité de rétention maximale (mm)	86,5					
Dimensions de la fosse d'arbre (m)	1,5 x 1,5 x 0,09 (L x l x H)					
Surface d'infiltration (m ²)	2,25	2,25	2,25	4,5	2,25	4,5
Bassin-versant récupéré (m ²)	42,7	46,9	53,2	93,8	67,2	121,8
Concentration de l'infiltration	19,0	20,8	23,6	20,8	29,9	27,1
Lame d'eau maximale abattue sur le bassin-versant récupéré (mm)	4,6	4,1	3,7	4,1	2,9	3,2
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur le bassin-versant récupéré (%)	28%	26%	23%	26%	18%	20%
Abattement de la lame d'eau de la pluie de 16 mm sur l'ensemble du profil (%)	12%	12%	9%	17%	6%	12%
<i>Abattement du volume annuel de l'année de référence sur le bassin-versant récupéré (%)</i>	80%	74%	68%	74%	57%	61%
<i>Abattement du volume annuel de l'année de référence sur l'ensemble du profil (%)</i>	33%	33%	26%	50%	18%	35%

Bibliographie

Aurélie Lamé, *Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains*, 2013.

Mathieu Fernandez, *Approche topographique historique du sous-sol parisien 1800-2000*, 2015.

Corinne Bourgerie et Laurent Mailliet, *L'Arboriculture urbaine*, collection Mission du paysage, éditions de l'Institut pour le développement forestier, 1993.

Agnès Tajouri, *Solutions techniques et architecturales pour l'application du règlement de zonage pluvial d'assainissement de la Ville de Paris*, 2014.

Prolog Ingénierie, Artélia, Sépia Conseils, *Campagne d'études sur l'impact des techniques alternatives de gestions des eaux pluviales sur le sous-sol*, Rapport bibliographique, 2014.

Alexandre Nezeys (STEA/Paris), « *Un zonage pluvial pour Paris : réintégrer les eaux pluviales dans le grand cycle de l'eau* », Novatech, 2013.

DPE, *Règlement du zonage d'assainissement de la Ville de Paris*, 2013.

DPE, *Notice d'information sur les techniques alternatives*, 2013.

Les cahiers de la recherche architecturale n° 15/16/17 1^{er} trimestre 1985 intitulé « *1900-1940 Architecture et politiques sociales* ».

Sabine Barles, *La ville délétère. Médecins et ingénieurs dans l'espace urbain XVIII^e - XIX^e siècle*, Seyssel, Éditions Champ Vallon, 1999.

BARLES, S. « *L'invention des eaux usées : L'assainissement de Paris, de la fin de l'Ancien Régime à la seconde guerre mondiale* », p. 129-156, in : BERNHARDT, C., MASSARD-GUILBAUD, G. (eds.). *Le Démon moderne. La pollution dans les sociétés urbaines et industrielles d'Europe / The Modern Demon. Pollution in Urban and Industrial European Societies*. Clermont-Ferrand : Presses de l'Université Blaise Pascal (coll. « Histoires croisées »), 2002. 465 p.

Mairie de Paris, *Stratégies de conception des structures des chaussées de la voirie parisienne*, 1993.

Mairie de Paris, *Matériaux de revêtement des chaussées et trottoirs, Guide de l'Espace Public*, 1993.

Mairie de Paris, *Le nivellement*, Guide de l'Espace Public, 1993.

Emmanuel Bellanger et Eléonore Pineau, *Assainir l'agglomération parisienne. Histoire d'une politique publique interdépartementale de l'assainissement (XIX-XX^e siècles)*, Ivry-sur-Seine, SIAAP, Les Éditions de l'atelier, 2010.

Angèle Denoyelle, *L'arbre dans la ville*, 7 novembre 2014.

www.urbanisten.nl

<http://www.landezine.com/index.php/2012/07/passeig-de-st-joan-boulevard-by-lola-domenech/>

Préservation et valorisation de la ressource en eau brute : une gestion parisienne des eaux pluviales

Cette étude prolonge les réflexions sur gestion de l'eau brute en ville inscrites au programme partenarial de l'Apur depuis 2010. L'objectif est de dégager une vision prospective de la place des ressources alternatives à l'eau potable en milieu urbain et d'aider à mieux comprendre comment celles-ci sont prises en compte aujourd'hui et pourraient l'être à l'avenir, à différentes échelles.

Engagée dans le cadre du programme partenarial de 2014 et 2015, en lien avec la Direction de la propreté et de l'eau de la Ville de Paris (DPE), cette étude vise à territorialiser la gestion des eaux pluviales. Elle fait écho aux réflexions sur le Plan Pluie à Paris en proposant des déclinaisons à l'échelle de l'espace public et de l'espace privé (quartiers existants représentatifs, îlots, parcelles).

Cette approche est déclinée en deux grandes parties. La première est une lecture thématique des liens entre l'eau de pluie et la ville. Elle aborde les grands objectifs et enjeux liés au sous-sol, au sol, au végétal et au bâti. Pour chaque thème des préconisations résumées et illustrent les actions possibles. La seconde partie examine la transformation diffuse de l'existant à partir de cas représentatifs des tissus urbains parisiens (faubourgs denses, HBM, grand ensemble, parcelle type). Les dispositifs appliqués à ces exemples et susceptibles d'être mis en œuvre plus largement dans les espaces publics et les espaces privés à Paris sont ensuite étudiés sous forme de fiches techniques détaillées.

Il ressort des simulations effectuées qu'il est possible d'atteindre des objectifs ambitieux de réduction des rejets d'eau de pluie au réseau d'assainissement en agissant de manière diffuse sur le tissu existant et en diversifiant les techniques.

L'Apur, l'Atelier parisien d'urbanisme, est une association 1901 qui réunit la Ville de Paris, le Département de Paris, l'État (DRIEA, Insee, Mission de Préfiguration de la Métropole du Grand Paris), la Région Ile-de-France, la Chambre de Commerce et d'Industrie de Paris, la Régie Autonome des Transports Parisiens, Paris Métropole, l'AFTRP, Paris Habitat, la Société du Grand Paris, le Syctom et SNCF Immobilier.

