

Désimperméabiliser les villes

Guide opérationnel
pour (re)découvrir les sols urbains

CO-FINANCEURS



PARTENAIRES DU CONSORTIUM



Contributions

COORDINATION

Projet Désimperméabilisation des sols, services écosystémiques et résilience des territoires (DESSERT) : Christophe Schwartz, Laboratoire Sols et Environnement (LSE, UMR 1120 UL-INRAE)
Relecture et édition : Gaëlle Rigollet et Aurore Micand, Plante & Cité

RÉDACTION

Christophe Schwartz (Laboratoire Sols et Environnement [LSE, UMR 1120 UL-INRAE]) ; Véronique Beaujouan (L'Institut Agro Rennes-Angers) ; Federico Broggin (École nationale supérieure de paysage de Versailles-Marseille) ; Adeline Bulot (L'Institut Agro Rennes-Angers) ; Jean Noël Consalès (Institut d'Urbanisme et d'Aménagement Régional, UMR Telemme, Aix Marseille Université) ; Armand Corbel (Plante & Cité) ; Marie Cozzi (SCE) ; Robin Dagois (Plante & Cité) ; Hervé Daniel (L'Institut Agro Rennes-Angers) ; Pierre David (Wagon Landscaping) ; Mathieu Gontier (Wagon Landscaping) ; Romain Goudon (Laboratoire Sols et Environnement [LSE, UMR 1120 UL-INRAE]) ; Arnaud Herbreteau (Laboratoire Sols et Environnement [LSE, UMR 1120 UL-INRAE]) ; Pierre Lasseigne (SCE) ; Maïwenn Lothodé (SCE) ; Jean-Christophe Louvet (D&L Enromat, Groupe Luc Durand) ; Alexandre Moret (SCE) ; Stéphanie Ouvrard (Laboratoire Sols et Environnement [LSE, UMR 1120 UL-INRAE]) ; Ludovic Perridy (SCE) ; Geoffroy Séré (Laboratoire Sols et Environnement [LSE, UMR 1120 UL-INRAE]) ; Marlène Teixeira Da Silva (D&L Enromat, Groupe Luc Durand) ; François Vade pied (Wagon Landscaping) ; Claire Vieillard (Plante & Cité) ; Laure Vidal-Beudet (L'Institut Agro Rennes-Angers).

PARTENAIRES

PARTENAIRES DU CONSORTIUM



PARTENAIRES D'EXPÉRIMENTATION



FINANCEMENTS



GRAPHISME ET ILLUSTRATION

Maquette et mise en page : La Fabrique Rouge

Illustrations du document : Les dessins sont de Catherine Créhange. Pour les autres illustrations et tableaux, les sources et crédits sont mentionnés en fin de légende.

Photo de première / dernière de couverture : Yann Monel / Christophe Schwartz

MENTIONS LÉGALES

N° ISBN : 978-2-38339-037-4

Éditeur : Plante & Cité, 26 rue Jean Dixméras, 49006 Angers Cedex, France.

Date de parution : décembre 2024

Pour citer cette publication : Christophe Schwartz (coord.), Véronique Beaujouan, Federico Broggin, Adeline Bulot, Jean Noël Consalès, Armand Corbel, Marie Cozzi, Robin Dagois, Hervé Daniel, Pierre David, Mathieu Gontier, Romain Goudon, Arnaud Herbreteau, Pierre Lasseigne, Maïwenn Lothodé, Jean-Christophe Louvet, Alexandre Moret, Stéphanie Ouvrard, Ludovic Perridy, Geoffroy Séré, Marlène Teixeira Da Silva, François Vade pied, Claire Vieillard, Laure Vidal-Beudet, 2024. **Désimperméabiliser les villes. Guide opérationnel pour (re)découvrir les sols urbains.** Plante & Cité, 70 p.

Sommaire

Fondements du projet DESSERT	5
Projet DESSERT	6
Contexte	6
Objectifs	6
Application et valorisation	7
Préambule	9
Imperméabilisation des sols urbains : état des lieux	11
Sols urbains : définitions et enjeux	12
Diversité des sols imperméabilisés	14
Composition des sols imperméabilisés	16
Conséquences de l'imperméabilisation	18
Impacts sur le fonctionnement biologique et le développement des végétaux	18
Impacts sur les cycles hydrologiques	18
Impacts sur le fonctionnement thermique	19
Impacts sur le risque de contamination	19
Vue d'ensemble des impacts sur le fonctionnement des sols	19
Aménagement et scellement des sols	22
Artificialisation des sols et étalement urbain	22
Construction de bâti	22
Installation de revêtements de voirie	23
Compaction	24
Colmatage de surfaces perméables	24
Pourquoi desceller ?	25
Contexte réglementaire et opérationnel	26
Cadre réglementaire	26
Prise en compte des sols par le biais des dynamiques européennes	26
ZAN, vers un objectif de neutralité	26
Cadre tangible au sein des documents d'urbanisme	28
Restaurer les fonctions des sols	30
Renaturation : point sur le projet de DESSERT	32
Essais en conditions de laboratoire	32
Sites pilotes de terrain	33
Adapter l'intensité d'intervention au contexte pédoclimatique	35
Gain de fonctions et de services rendus par les sols après descellement	37
Évolution des sols dans le temps	38
Comment desceller ?	39
Comprendre les étapes d'un projet	40
Concevoir et étudier le projet	44
Diagnostic (DIA)	44
Avant-projet (AVP)	47
Rappel des trois hypothèses de descellement	49
Choisir les entreprises	52
Projet et Dossier de consultation des entreprises (PRO-DCE)	52
Transition études-travaux	53
Réaliser les travaux	54
Réaliser un état zéro pré-travaux	54
Définir le planning et le stockage	54
Suivi et état réalisé	55
Inviter à nouveau les services gestionnaires	55
Gérer les sols descellés	57
Outils et pratiques	57
Différents types de gestion	57
Adapter sa stratégie de descellement	62
Pour aller plus loin	63
Conclusion	64
Quelques définitions	66
Bibliographie	68

Liste des sigles

////////////////////////////////////

ACT : Assistance pour la passation des contrats de travaux

AVP : Avant-projet

BE : Bureau d'études

CCTP : Cahier des clauses techniques particulières

DCE : Dossier de consultation des entreprises

DIA : Diagnostic

ENAF : Espaces naturels agricoles et forestiers

GNT : Grave non traitée

ICU : Îlot de chaleur urbain

MOA : Maîtrise d'ouvrage

MOE : Maîtrise d'œuvre

OAP : Orientations d'aménagement et de programmation

OCSGE : Occupation du sol grande échelle

PAS : Projet d'aménagement stratégique

PLU(i) : Plan local d'urbanisme (intercommunal)

PRO : Études de projet

SAGE : Schéma d'aménagement et de gestion des eaux

SCoT : Schéma de cohérence territoriale

SDAGE : Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux

SRADDET : Schéma régional de développement d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires

UE : Union européenne

WRB : World reference base for soil resources (Base de référence mondiale pour les ressources en sols)



**Fondements
du projet DESSERT**

CONTEXTE

→ Face à l'augmentation de la population urbaine et à la densification du milieu urbain, les villes doivent s'adapter au changement climatique et au déclin de la biodiversité, en plus d'être agréables à vivre. Dans ce contexte, la prise en compte des sols dans les stratégies d'aménagement est un levier majeur puisque ces derniers assurent des fonctions écologiques*, en plus de rendre des services écosystémiques.

Au cours du XIX^e siècle, les villes se sont développées en considérant l'eau comme un déchet à évacuer. Ce phénomène a conduit à une massification de la minéralisation des sols et à leur imperméabilisation*. Aujourd'hui, ce modèle expose de nombreuses limites. En plus du sous-dimensionnement des réseaux d'assainissement et des contraintes environnementales, sociales et économiques associées aux îlots de chaleur urbains (ICU)*, s'ajoute une capacité de recharge des nappes fortement impactée. Le ruissellement de l'eau sur les surfaces scellées engendre une accumulation de polluants dans les réseaux d'assainissement et les milieux naturels. Les surfaces imperméabilisées sont également incompatibles avec la demande croissante de nature en ville, d'autant plus que l'eau des sols est une ressource précieuse pour tous les organismes vivants. De plus, couvrir les sols par un matériau imperméable est l'une des premières causes de leur dégradation en Europe.

La dégradation de la santé des sols en ville n'est cependant pas une fatalité. Des flux sont possibles entre surfaces artificialisées et non artificialisées, dans une forme de résilience, même incomplète. Face à une couverture pédologique urbaine dégradée, des solutions fondées sur la nature existent afin de requalifier, renaturer et refunctionaliser les sols. Ces solutions s'articulent largement autour du génie pédologique* et du génie végétal, contribuant ainsi à un génie écologique en perpétuelle évolution.

Des cadres législatifs et réglementaires existent pour favoriser ces approches. Des actions de préservation des espaces naturels, agricoles et forestiers, de création des trames brunes en milieu urbain, de désimperméabilisation* des sols et de renaturation* sont attendues. Pourtant, ces pratiques restent très peu documentées, tant sur le plan technique que scientifique, avec une faible compréhension des mécanismes d'évolution internes aux sols descellés. De plus, les procédés de construction ou de reconstitution de sols* fertiles sont en pleine évolution. Ils sont en partie discutés puisqu'ils consomment de grands volumes de terres décapées, qui sont ensuite importés en ville. Des solutions peuvent être puisées dans les techniques du génie pédologique, comme la création de sols fertiles à partir de déchets et sous-produits dont les caractéristiques sont compatibles avec la construction de sols sains, dans une logique de bioéconomie locale et d'économie circulaire. Il faut également porter une attention particulière à la pollution potentielle des matériaux de remblais* rencontrés sous les surfaces artificialisées. Des sols dégradés peuvent ainsi retrouver des fonctionnalités comparables à celles de sols naturels.

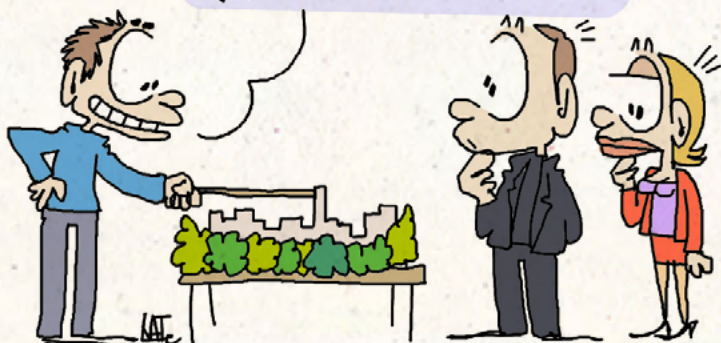
Dans ce contexte, le projet Désimperméabilisation des Sols, Services Écosystémiques et Résilience des Territoires (DESSERT) est né d'un partage d'idées entre un pédologue et un paysagiste membres du projet et a été mené dans un format de laboratoire vivant entre 2021 et 2024. Si les conséquences fortement négatives du scellement sur les propriétés bio-physico-chimiques et le fonctionnement des sols sont connues, très peu de travaux de recherche se sont pour l'instant attachés à évaluer le potentiel de refunctionalisation des sols, en particulier via leur désimperméabilisation. DESSERT a voulu remédier à cette situation.

OBJECTIF

→ Le projet DESSERT est une recherche innovante en aménagement urbain. Ses objectifs s'inscrivent dans une disruption, en développant des solutions innovantes pour une transition écologique qui s'accompagne d'un nouvel état d'équilibre de l'écosystème urbain. Le projet a

IMAGINER LA VILLE VERTTE

... ET ON CONSERVERAIT ICI ET LÀ
QUELQUES ÎLOTS DE BITUME
(À TITRE ANECDOTIQUE)...



nécessité l'acquisition de nombreuses données de qualification et de quantification du système sols urbains désimperméabilisés - eau - plantes. La production de connaissances a permis de caractériser les états initiaux et de modéliser les effets de solutions de désimperméabilisation en termes d'opérationnalité (guide pratique, formation) pour la planification et le projet urbain. Par la constitution même de son consortium, DESSERT a souhaité développer des modes de collaboration multi-acteurs entre chercheurs, bureaux d'études, entreprises du paysage et des travaux publics, urbanistes et décideurs. Cette collaboration était destinée à imaginer, construire et évaluer des solutions de désimperméabilisation en ville grâce à différentes tâches, réparties sur quatre années de réalisation.

Lors d'une première étape, un état de l'art a été réalisé sur différents travaux nationaux et internationaux concernant les sols urbains (état, fonction, services, lien avec l'aménagement).

Dans un second temps, un travail d'inventaire a concerné les modalités d'imperméabilisation et de désimperméabilisation des sols. Une typologie de système sol-revêtement a été proposée.

La tâche « Désimperméabilisation des sols urbains et effets sur leur état, leur fonctionnement et leur aptitude à rendre des services écosystémiques » a pris la forme de retours d'expérience externes et internes au projet de chantiers de désimperméabilisation des sols urbains et d'essais en conditions de laboratoire sur des systèmes sols désimperméabilisés-plantes.

Ces approches successives ont permis d'orienter la stratégie d'élaboration du présent guide, qui fait l'objet de la tâche 4 du projet DESSERT.

Enfin, la tâche 5 du projet concerne la dissémination des résultats de la recherche : communication scientifique et technique, formation initiale et formation continue des acteurs qui prévoit un transfert de compétences, à la fois vers les acteurs socio-économiques actuellement en fonction et vers les futurs acteurs encore en formation initiale.

APPLICATION ET VALORISATION

→ En matière de valorisation, les acquis du projet ont abouti à la proposition de ce guide technique pour une prise en compte accrue de la ressource sol dans les projets d'aménagement ou de renouvellement urbain.

L'enjeu est alors de se fonder sur une écologie renforcée des paysages urbains, en prenant en considération le développement de corridors écologiques, en particulier de la recreation de

continuités pédologiques pouvant participer à rendre des services écosystémiques (régulation des inondations, biodiversité, qualité des eaux) et à réguler des enjeux socio-économiques (qualité de vie des habitants). *

Ce guide opérationnel accompagne les projets concrets de descellement* de sols urbains dans les pratiques d'aménagement et éclaire les acteurs qui les portent. Il vise également à diffuser les résultats d'une recherche collaborative et pluridisciplinaire auprès des parties prenantes des villes. Les sols urbains ne concernent pas seulement les pédologues. En ville, plus qu'ailleurs, il est essentiel de croiser et d'enrichir mutuellement des approches scientifiques disciplinaires (e.g., histoire, archéologie, économie, urbanisme, paysagisme, génie civil) et les points de vue des opérateurs. Cela constitue une condition indispensable pour connaître et (a)ménager le capital sol collectivement. C'est en cela que le projet est innovant, puisqu'il a engendré la collaboration étroite entre des équipes de recherche issues de trois champs disciplinaires (pédologie-agronomie, écologie et urbanisme), trois opérateurs de l'aménagement urbain (entreprises de travaux publics, d'aménagement, du paysage) et d'un centre technique agissant à l'interface des différents acteurs.

Si cet ouvrage s'adresse principalement aux gestionnaires d'espaces verts et d'espaces publics urbains, aux concepteurs d'espaces paysagers, aux aménageurs du milieu urbain et aux bureaux d'étude dédiés aux sols et à l'environnement, il peut aussi intéresser des publics plus larges de chercheurs, d'enseignants, d'étudiants et de citoyens curieux d'un aménagement urbain durable.

Pour diffuser les résultats au plus grand nombre, cet ouvrage propose d'abord un état des lieux de l'imperméabilisation des sols urbains, puis aborde l'importance de desceller ces surfaces. Enfin, il décrit la procédure à suivre pour effectuer ces opérations. Des exemples sont mobilisés tout au long des explications, en provenance du projet DESSERT, mais pas seulement.



Un consortium construit pour favoriser d'indispensables regards croisés : un laboratoire vivant . / C. Schwartz

Préambule

→ Deux termes cohabitent pour décrire les opérations visant à supprimer la couverture imperméable qui recouvre les sols scellés : désimperméabilisation et descellement. Le terme « désimperméabilisation » connaît un réel succès à l'échelle française, notamment grâce à la mobilisation du Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) en tant qu'expert sur les problématiques d'environnement, d'infrastructure, de climat et d'énergie, qui accompagne les acteurs locaux (en particulier les collectivités) par la publication de fiches techniques opérationnelles. Il est important de noter que ce terme est polysémique, car il englobe à la fois le fait de supprimer un revêtement existant pour permettre le cycle de l'eau, et le fait d'aménager des territoires en réduisant la part dédiée aux sols imperméabilisés. Ce dernier sens est bien souvent utilisé dans les documents d'urbanisme, notamment dans le Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE).

Le terme « descellement » (« unsealing » ou « desealing » en anglais) prédomine dans les publications scientifiques internationales traitant de la méthodologie et des conséquences d'opérations d'ablation partielle ou totale du scellement en surface. Cette approche considère une large gamme d'effets qui vont au-delà de la régulation du cycle de l'eau. Les termes « scellement » et « descellement » sont donc à privilégier pour leur signification explicite et pour mettre en relief l'échelle considérée de l'écosystème sol. D'autres expressions techniques sont essentielles pour comprendre ce guide. Elles sont signalées par un astérisque (*) et sont développées pages 66-67.



Des opérations de descellement, à différentes échelles spatiales (parcelle, rue, quartier, ville), sont déjà mises en œuvre dans les pays industrialisés. En France, de nombreuses villes ont déployé des programmes de descellement et de végétalisation de cours d'écoles et de collèges (Projet OASIS, ville de Paris, plan de désimperméabilisation de la Métropole de Lyon) ou d'infrastructures routières pour obtenir des bénéfices microclimatiques, pédagogiques, et psychosociaux. Ces projets s'appuient sur des préconisations de mises en œuvre du Cerema, des Conseils d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement ou encore de la Commission européenne. Souvent, les pratiques de mise en œuvre sont peu décrites et empiriques.



Travaux d'aménagement et de végétalisation de la cour de l'école Jules Ferry à Malzéville. / C. Schwartz

Un inventaire des pratiques de descellement en France métropolitaine a notamment été possible grâce à une enquête menée de juin à septembre 2021 par Plante & Cité auprès de ses structures adhérentes (collectivités locales, bureaux d'études en paysage, bureaux d'études géotechniques, entreprises de paysage, structures d'enseignement et de recherche, organismes professionnels), complétée grâce aux projets menés par les partenaires DESSERT (SCE et Wagon Landscaping). L'enquête était constituée d'un questionnaire regroupant une soixantaine de questions semi-ouvertes, avec majoritairement des réponses à choix multiples. Les informations collectées étaient réparties en différentes catégories :

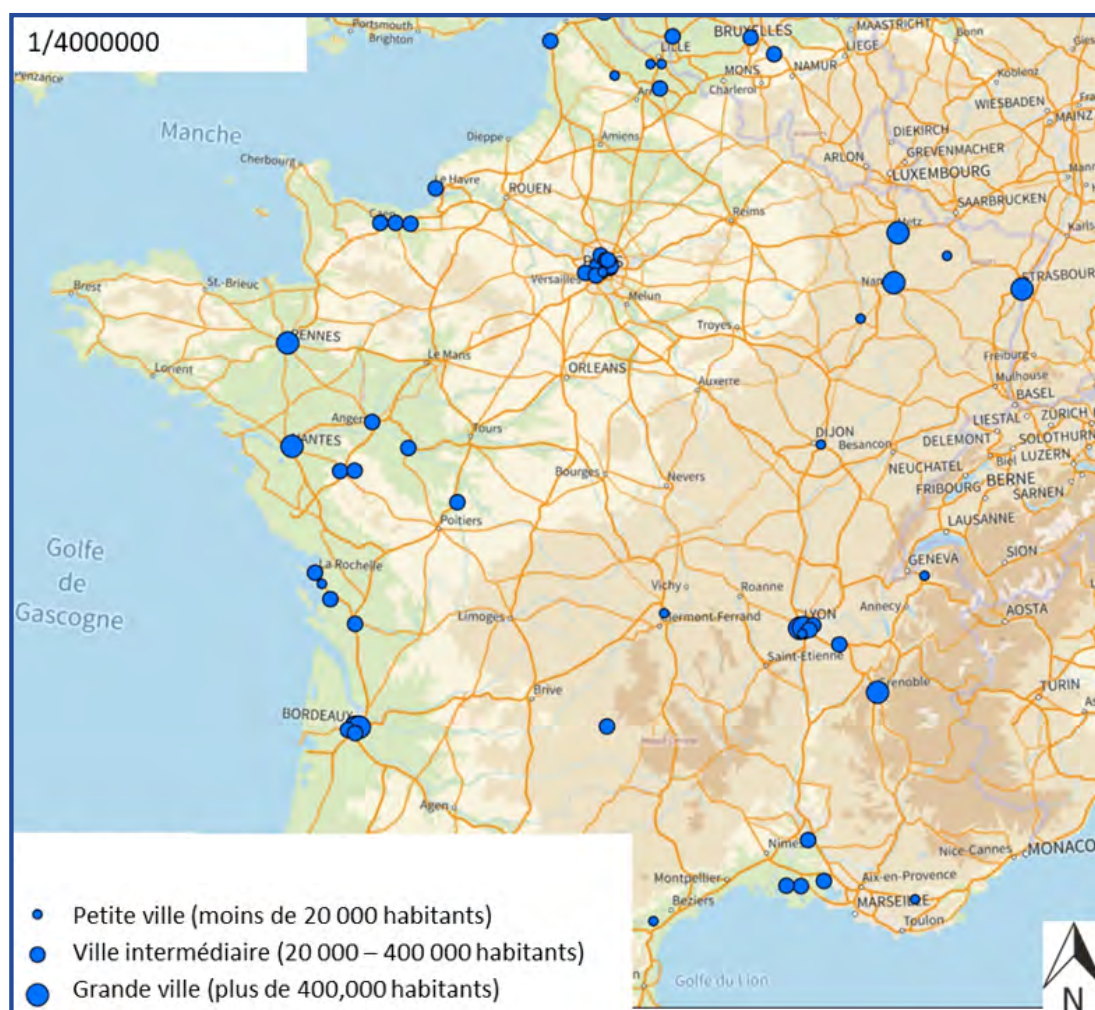
- informations sur la structure répondante ;
- description générale du projet renseigné, avec des informations sur la localisation, la période de réalisation, le ou les types d'usages présents avant et après le projet ;
- objectifs de descellement et volonté d'inscrire le projet dans une démarche d'économie circulaire ;
- caractéristiques des sols avant et après descellement, la nature du matériau de revêtement et son devenir ;

- mise en place d'une opération de végétalisation et description des palettes végétales ;

- retour sur le projet et coûts de mise en œuvre.

L'enquête a permis de collecter des informations sur 47 opérations de descellement, complétées par la description de 10 opérations des partenaires du projet DESSERT, soit au total 57 opérations décrites sur le territoire métropolitain français. Ces projets se sont déroulés entre 2009 et 2021, avec une accélération des pratiques à partir de 2017. Ils sont répartis dans des villes de toutes tailles : 11 opérations dans huit métropoles (> 400 000 habitants), 33 opérations dans des villes de taille intermédiaire (20 000 à 400 000 habitants) et 13 opérations dans des petites villes françaises (< 20 000 habitants).

Les surfaces descellées au cours des opérations sont hétérogènes avec une valeur médiane de 1 150 m² et une valeur moyenne de 4 754 m². Dans 75 % des opérations, la surface concernée est inférieure à cette moyenne, et dans 39 % des cas, elle est inférieure à 500 m², quel que soit le type d'usage. Les données récoltées sont approfondies tout au long du guide à travers des encarts dédiés.



Localisation des opérations de descellement en France métropolitaine en fonction de la taille des villes. / Projet DESSERT



Imperméabilisation des sols urbains : état des lieux

Sols urbains : définitions et enjeux



→ Si les sols urbains ont longtemps été un sujet d'étude « exotique » dans le paysage scientifique, ils font aujourd'hui l'objet d'un intérêt croissant. Jusqu'à il y a quelques décennies, ils étaient largement ignorés par les sciences du sol et parfois qualifiés de non-sols. Historiquement, leur gestion s'est principalement concentrée sur des approches sanitaires et économiques, en réponse à des crises sanitaires majeures causées par la contamination des sols, elle-même liée aux activités industrielles et à des pressions foncières.

Leur bonne connaissance est indispensable, en particulier pour limiter les risques de dissémination des polluants, afin de préserver la santé humaine et celle des écosystèmes. Bien qu'il ne s'agisse pas de remettre en cause cette logique d'évaluation des risques liés à la contamination des sols, il est nécessaire d'intégrer le compartiment sol des villes dans la réponse aux enjeux environnementaux. Cela requiert des approches intégrant davantage la qualité et la multifonctionnalité des sols urbains.

Ces sols anthropisés résultent de diverses activités humaines, comme l'apport de matériaux exogènes, le décapage, la compaction, la contamination ou encore la fertilisation intense, qui s'ajoutent aux facteurs de la pédogenèse (e.g., temps, climat, activité biologique, topographie). Ces deux termes ne sont donc pas totalement synonymes. Afin d'éviter le plus possible toute confusion, il est essentiel de distinguer de manière explicite le sol urbain en tant que couverture pédologique des aires urbaines du sol anthropisé en tant que sol avec forte influence humaine. Les sols urbains sont fréquemment des sols anthropisés, mais ils peuvent également être des sols (pseudo)naturels, puisque très peu modifiés par l'Homme. La proportion de sols anthropisés et naturels parmi les sols urbains peut ainsi varier significativement d'une aire urbaine à l'autre.

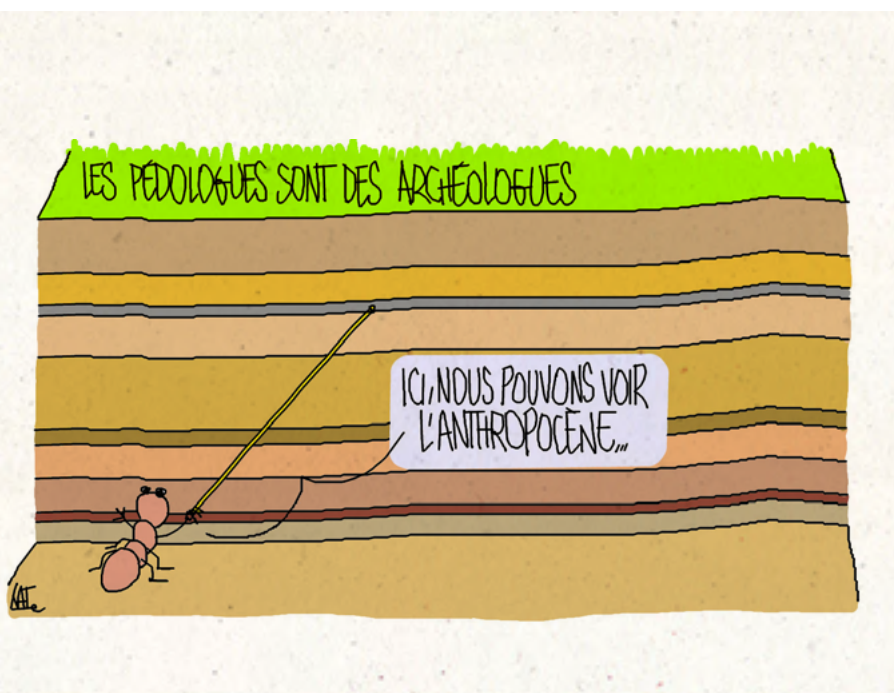
Faire la distinction entre Anthrosol et Technosol est également essentiel. Ces termes relèvent de classifications scientifiques qui permettent de décrire les sols en fonction du degré et de la nature de l'anthropisation.

Les Anthrosols sont des sols fortement modifiés ou créés par l'Homme. S'ils sont souvent observés en milieu urbain, ils le sont aussi parfois en milieu rural, dans des conditions particulières. Cette catégorie regroupe différents types de sols :

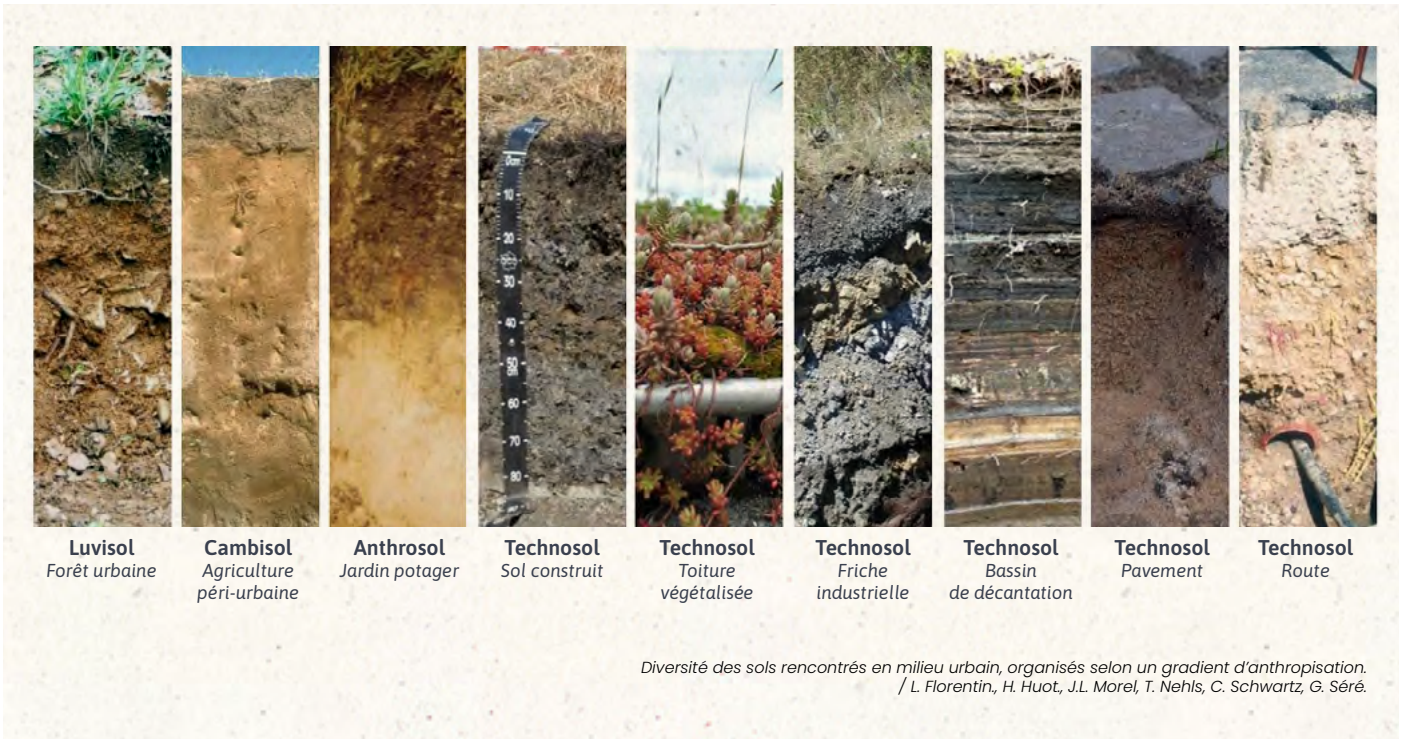
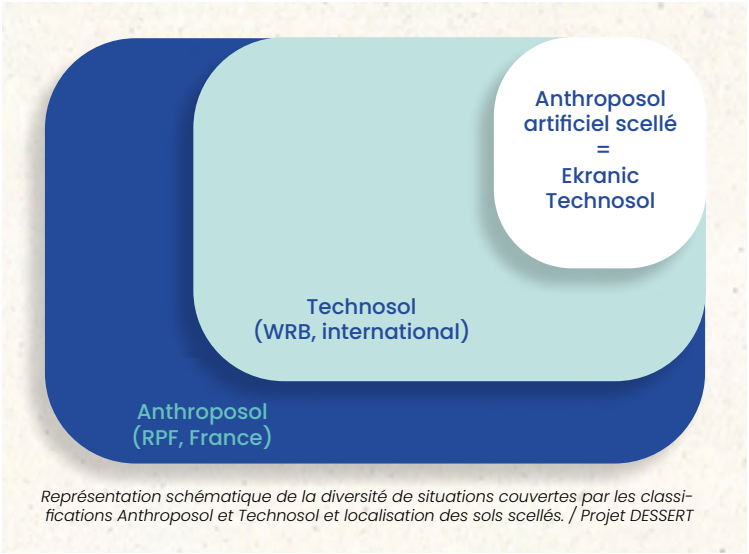
- les Anthrosols transformés, qui résultent de modifications profondes dues à des activités humaines, sans intention d'améliorer la fertilité du sol ;
- les Anthrosols artificiels, formés à partir de dépôts de matériaux non pédologiques, toujours sans améliorer la fertilité du sol ;
- les Anthrosols reconstitués, créés délibérément pour restaurer la fertilité grâce à l'apport et la formulation de matériaux pédologiques ;
- les Anthrosols construits, qui restaurent également la fertilité, mais grâce à l'apport de déchets.

Les Technosols sont des sols dominés par des matériaux d'origine humaine. Un sol est considéré comme tel lorsqu'il contient au minimum 20 % d'artefacts (matériaux créés, fortement modifiés ou amenés en surface par l'Homme ; cette définition exclut donc de fait la terre végétale*) sur une profondeur d'au moins 100 cm sous la surface, et/ou lorsqu'il est imperméabilisé par des matériaux d'origine humaine (scellement anthropique en surface ou en profondeur).

La polysémie du terme « sol urbain » rend son appréhension complexe. Sur le plan spatial, il désigne la couverture pédologique du milieu urbain. Dans ce cas, on considère que tout sol situé dans une aire urbaine est un sol urbain. Ce terme est aussi fréquemment utilisé comme un synonyme de « sol anthropisé », c'est-à-dire un sol modifié par l'Homme, nommé Anthrosol* selon le Référentiel Pédologique* proposé en France, et Technosol* selon la Base de référence mondiale (WRB) proposée par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.



Il est donc important de noter que la catégorie des Anthroposols recouvre une plus grande diversité de situations que celle des Technosols. Les deux référentiels permettent de décrire simplement les sols imperméabilisés qui sont au cœur de ce guide. En France, ils sont désignés comme Anthroposols artificiels scellés, tandis que dans la classification internationale, ils sont nommés Ekranic Technosol (ayant un matériau technique dur apparaissant à ≤ 5 cm de la surface du sol).



Diversité des sols imperméabilisés



→ D'un point de vue pédologique, l'imperméabilisation ou scellement artificiel est défini depuis 2006 comme la déconnexion du sol sous-jacent des autres compartiments de l'écosystème (biosphère, atmosphère, hydrosphère, anthroposphère) par la couverture avec un matériau imperméable (enrobé bitumineux, béton de ciment) ou la modification drastique des propriétés du sol pour le rendre imperméable. Elle est notamment la conséquence des besoins sociétaux actuels en termes de transport, de logement et d'activités, incluant par exemple la sécurité publique, les services de secours, et de nombreux secteurs économiques (industries, construction, secteur minier).

Le scellement naturel d'un sol, lui, fait référence à une couche de surface qui limite l'infiltration de l'eau. Elle peut être due à différentes causes, notamment à l'impact de la pluie (croûte de battance sur des terres à dominante limoneuse) et au travail du sol (compaction). Dans ces cas, l'imperméabilisation résulte d'une dégradation de la structure et d'une diminution de la porosité du sol. Contrairement à ces formes de scellements temporaires, souvent observées en milieu rural sur

des terres agricoles, le scellement en milieu urbain est artificiel, volontaire, extensif et permanent.

Au début des années 80, la recherche distinguait quatre grands types de scellement artificiel :

- scellement total de la surface du sol (i.e. voies de circulation, bâtiments) ;
- scellement partiel de la surface du sol par la mise en place d'un pavement ;
- scellement en profondeur recouvert par une couche de sol (e.g., parking souterrain) impliquant l'interruption des échanges entre le sol et les compartiments naturels sous-jacents ;
- scellement vertical par des murs ou des panneaux construits ou insérés dans le sol.

Le degré de scellement d'un sol peut être évalué en fonction du pourcentage de sa surface recouverte par un matériau imperméable.



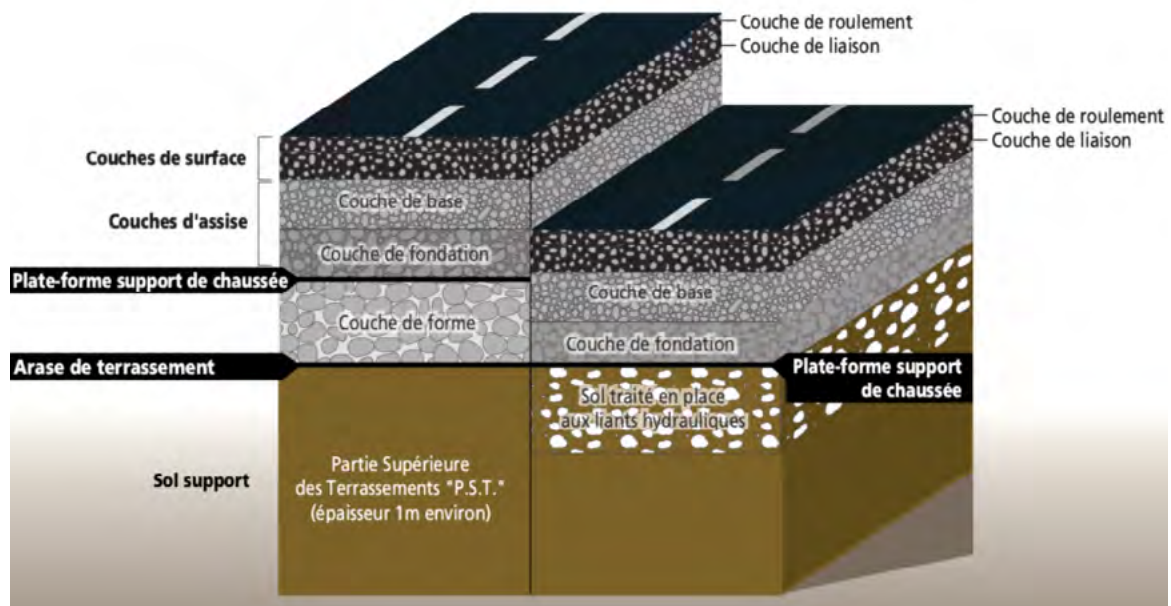
Exemples de profils de sols scellés. / C. Schwartz



La construction d'une chaussée*

Parmi les sols urbains scellés, les « chaussées » des infrastructures de transport sont les usages les plus représentés (routières, ferroviaires, aéroportuaires, de tramway, industrielles). Ce sont des structures multicouches, conçues pour répartir les contraintes mécaniques appliquées par des charges lourdes, et pour résister au trafic et aux agressions climatiques (cycles de température, gel-dégel, pluie) qui dégradent au cours du temps les performances initiales des matériaux et de leurs interfaces.

La construction d'une chaussée passe par plusieurs étapes : décapage si besoin des horizons superficiels du sol, terrassement (préparation du terrain, aplanissement, compactage de l'arase de terrassement), mise en œuvre d'une couche de forme optionnelle, qui participe au fonctionnement mécanique de la chaussée, puis mise en place d'une ou deux couches d'assise qui répartissent les charges mécaniques appliquées en surface pour limiter la déformation du sol. Enfin, une couche d'accrochage est répandue pour lier entre elles les couches d'assise et de roulement.



Coupe transversale des différentes couches constitutives d'une chaussée. / Cim Béton

Composition des sols imperméabilisés

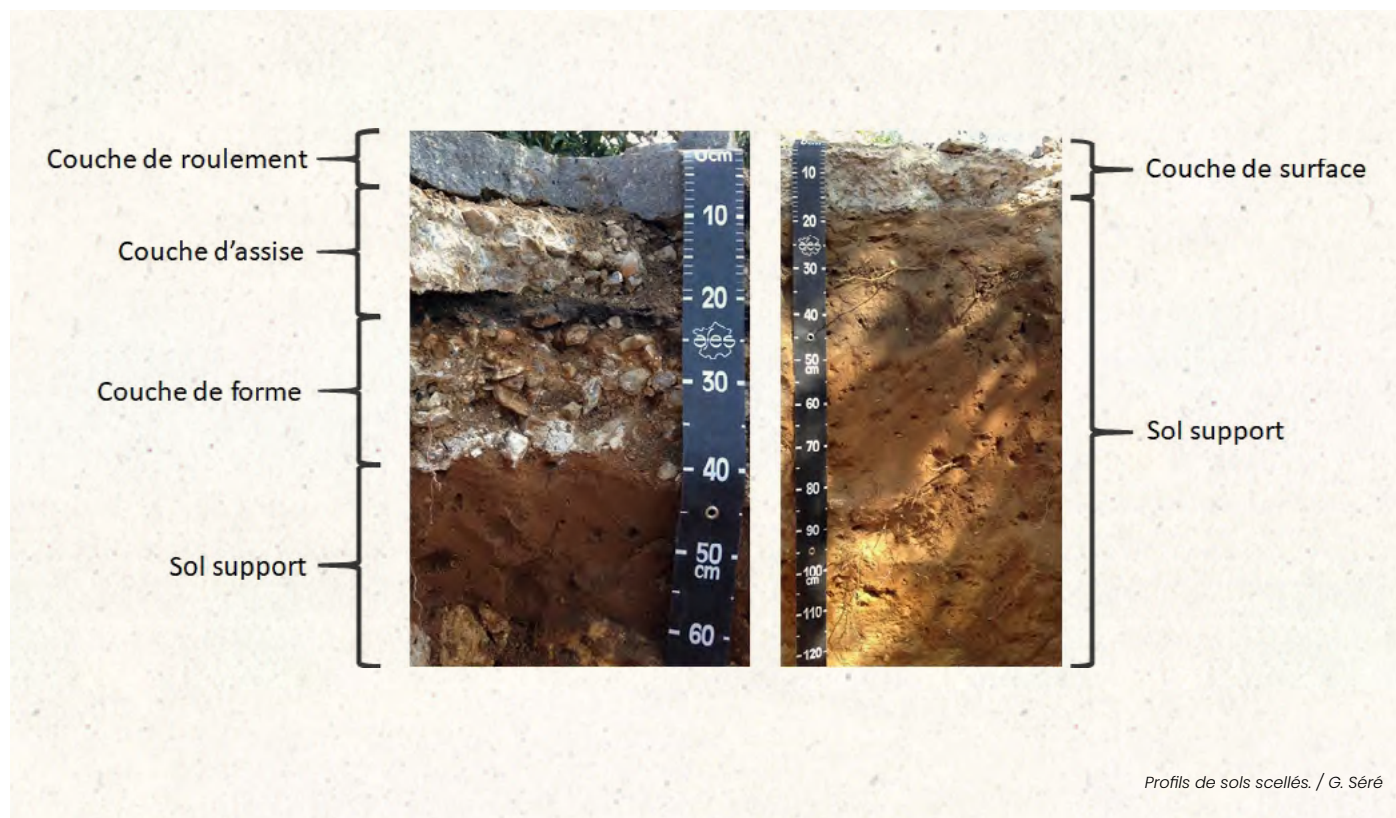


→ Le profil typique d'un sol scellé est constitué de la succession suivante de couches ou d'horizons :

- horizon de surface constitué du matériau de scellement ;
- de matériaux grossiers, d'origine naturelle ou anthropique, qui appartiennent la plupart du temps à la catégorie des artefacts, mais qui peuvent également être rattachés au qualificatif « transportic » (WRB) dans le cas de matériaux déplacés (e.g., gravier, cendre, remblais grossier, laitier) ;
- horizons pédologiques provenant du sol originel en place avant l'opération de génie civil, éventuellement tronqué par les travaux d'excavation. Il convient de noter que, dans certains cas, une forme de polycyclicité peut se développer, entraînant l'enfouissement d'horizons riches en matière organique ou la formation d'une succession de chaussées. Dans cette dernière situation, deux matériaux de scellement peuvent par exemple être superposés (chaussée neuve sur une chaussée dégradée).

Parmi les types de matériaux constitutifs des sols scellés, on peut mentionner la présence :

- de granulats de carrière pouvant être utilisés seuls (graves non traitées, GNT) ou en mélange avec des liants hydrauliques (grave-ciment) ou hydrocarbonés (grave-bitume) ;
- de mélanges terre-pierre, constitués de 60 % de pierres anguleuses dont la taille est comprise entre 40 et 120 mm et de 40 % de terre végétale souvent mélangée avec du compost. Les pierres favorisent la création d'un squelette rigide dont la portance doit résister au moins à 30 MPa, la terre venant remplir la porosité entre les pierres ;
- de la partie supérieure des terrassements correspondant au premier mètre de sol sur lequel repose la structure de voirie (couche de forme, couches d'assise et revêtement de surface). Ce sol est souvent remanié, compacté et éventuellement traité à la chaux ou au liant hydraulique pour assurer la stabilité de l'ouvrage (les sols fins contenant plus de 35 % d'éléments inférieurs à 63 µm sont sensibles à l'eau et à la déformation) ;
- de nombreux autres matériaux comme des géotextiles, géomembranes géosynthétiques, géogrilles ou encore des réseaux et canalisations.



[PARK]ING, WAGON LANDSCAPING, COURTRAI, 2009



1



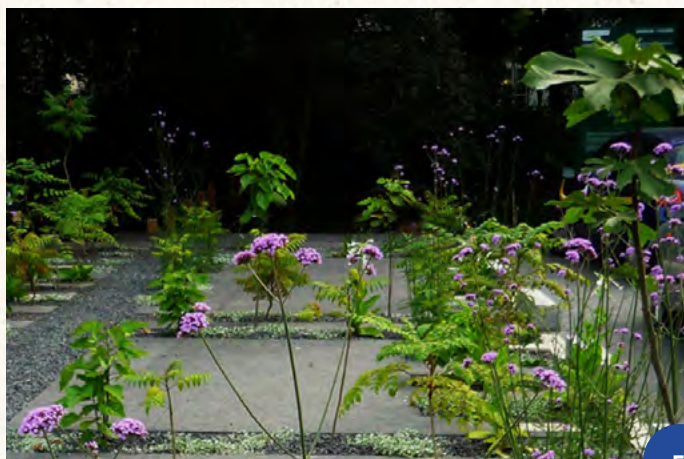
2



3



4



5



6

→ **En centre-ville, une parcelle en creux, arborée au bord d'un parking** (1), a été confiée à Wagon pour le festival de jardin Secret Garden. Le défi était de recycler ce coin de parking en jardin et d'hybrider les usages en transformant quelques places de stationnement (2, 3, 4). La forme du jardin s'insère dans le rythme du dessin d'un parking (5). Wagon a répondu à des questions sur les méthodes de fertilisation de ce type de sol, sur la palette végétale associée et sur la valorisation esthétique d'une dalle en enrobée d'un parking (6).

Superficie : 600 m² / Coût : 30 000 €

Conséquences de l'imperméabilisation

IMPACTS SUR LE FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE ET LE DÉVELOPPEMENT DES VÉGÉTAUX

→ L'imperméabilisation des sols engendre une perte de la capacité à produire de la biomasse et réduit la séquestration de carbone. Les sols scellés sont fréquemment qualifiés de biologiquement inactifs ou « morts », car les apports de matériaux anthropiques qui ont permis l'installation du scellement ont engendré l'interruption des échanges avec les autres compartiments de l'écosystème, réduisant drastiquement le niveau d'activité biologique.

IMPACTS SUR LES CYCLES HYDROLOGIQUES

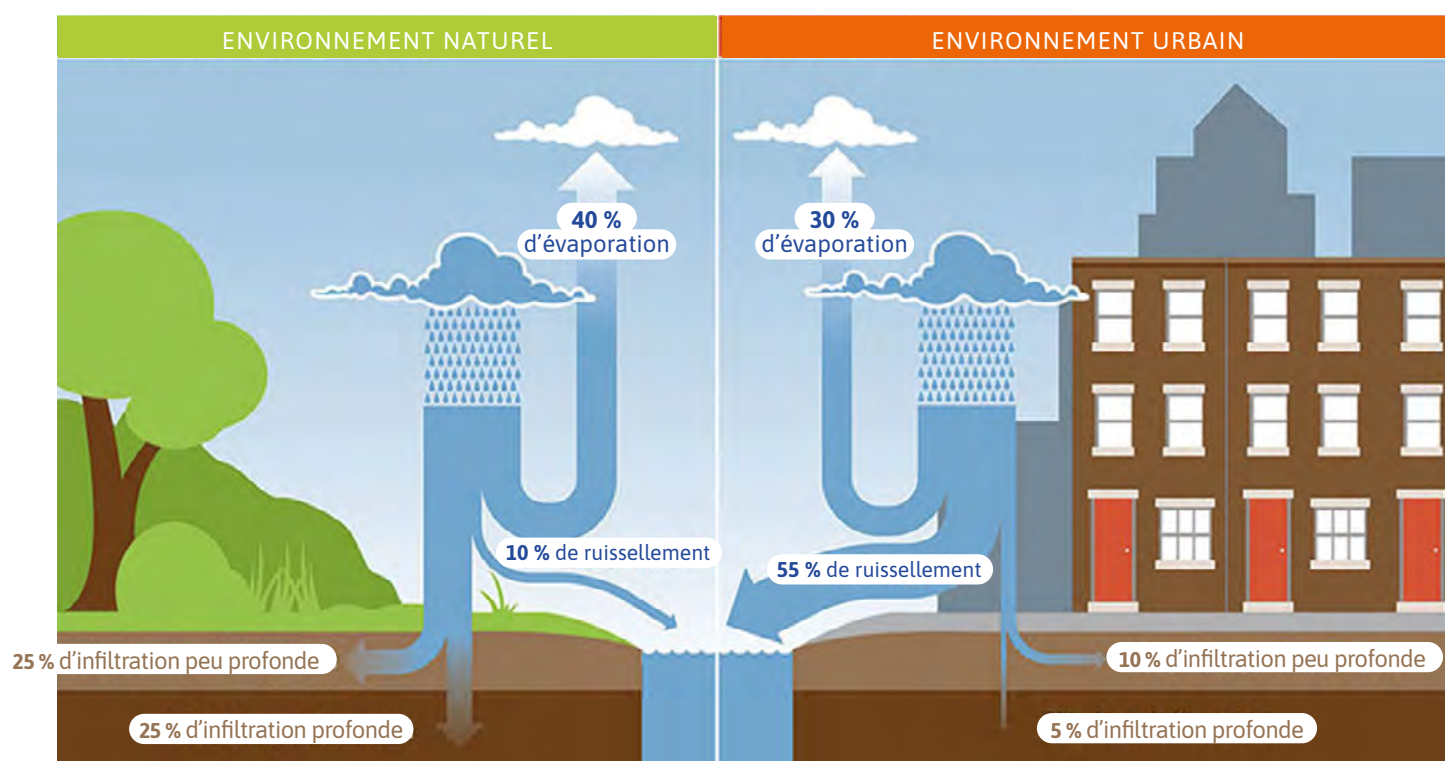
→ Le scellement des sols dégrade les cycles hydrologiques urbains en favorisant le ruissellement au détriment de l'infiltration et, dans une moindre mesure, de l'évapotranspiration. L'évaporation dépend en effet de la porosité et de la capacité

de rétention en eau des matériaux de scellement (faible pour les scellements totaux en zone plane, mais non négligeable pour les revêtements semi-perméables tels que les pavages). Sous le revêtement imperméable, la fréquence des alternances saisonnières humidification-dessiccation est fortement réduite.

Ceci se traduit notamment par une augmentation de la fréquence des inondations. Une autre conséquence est la limitation de la recharge des nappes phréatiques au droit des espaces urbains, au détriment du déversement dans les eaux superficielles. D'un point de vue qualitatif, les surfaces imperméabilisées engendrent la contamination des sols non scellés. En effet, puisque l'eau ne pénètre pas dans ces surfaces, elle ruisselle et emporte des polluants jusqu'aux sols non scellés à proximité, augmentant leur concentration en éléments traces métalliques.



Interactions sol-arbre à Nantes (gauche) et à Nancy (droite), dans un contexte d'imperméabilisation des sols urbains. / C. Schwartz



Modification du cycle hydrologique induit par l'urbanisation. / Philadelphia Water Stormwater Management Guidance Manual

IMPACTS SUR LE FONCTIONNEMENT THERMIQUE

→ Les interactions très limitées avec l'atmosphère diminuent fortement l'amplitude des oscillations ou cycles de température. De plus, la couleur foncée des matériaux utilisés pour le scellement génère un albédo plus faible que les surfaces naturelles, ce qui conduit à un stockage de l'énergie pendant la journée et une libération de chaleur pendant la nuit. Le phénomène de transpiration est également diminué puisque la végétation est absente, tout comme l'interception des rayonnements solaires par ses effets d'ombrage.

Enfin, la modification du cycle hydrologique évoquée précédemment diminue la contribution de l'évaporation qui, comme la transpiration, est une réaction endothermique. Tout ceci explique comment l'imperméabilisation contribue au phénomène d'ICU. Les températures maximales, ainsi que leurs variations, sont plus élevées pendant les périodes chaudes pour le pavage en béton que pour certains revêtements perméables et pour un sol végétalisé.

IMPACTS SUR LE RISQUE DE CONTAMINATION

→ Peu d'impacts positifs du scellement sur les fonctions du sol sont renseignés. Hors phénomène de lessivage latéral des polluants de surface, l'imperméabilisation permet néanmoins de contenir une éventuelle contamination du sol, en limitant fortement les transferts de polluants par

envol de poussières, volatilisation, prélèvement par des organismes biologiques et transferts hydriques sub-horizontaux ou sub-vectifs.

Il est à noter que le confinement est une technique largement utilisée en gestion des sites et sols pollués et dans les centres de stockages de déchets. Au-delà, comme cela a été évoqué ci-dessus, le scellement limite la contamination des sols se trouvant à proximité de sources de pollution atmosphérique (e.g., voies de circulation).

De manière étendue, les bassins de collecte des eaux de surface, qui constituent un autre exemple d'imperméabilisation des sols, contribuent également à réduire l'infiltration de polluants. Cependant, la concentration de ces derniers résulte d'un scellement à plus large échelle. Il faut alors systématiquement veiller à caractériser les sols lors d'opérations de désimperméabilisation afin d'éviter/limiter les risques de dissémination.

VUE D'ENSEMBLE DES IMPACTS SUR LE FONCTIONNEMENT DES SOLS

→ Dans un travail de revue très complet et approfondi, des auteurs ont recensé l'ensemble des impacts du scellement sur la capacité des sols à assurer des fonctions, en y ajoutant une dimension temporelle.

Cette dernière information met en lumière le fait que certaines des conséquences du scellement peuvent dépasser la période où le sol est imperméabilisé (e.g. séquestration de carbone, discontinuité écologique).

COMPARTIMENT	EFFET	CONTRIBUTION	CONSÉQUENCE
chaleur	confort thermique	xx	apparition d'îlots de chaleur
eau	augmentation du ruissellement	xxx	diminution de la filtration des eaux
		xxx	diminution de la recharge des nappes
		x	augmentation de l'apport d'eau aux surfaces adjacentes
		xx	augmentation du temps d'évacuation de l'eau
		xx	apparition de phénomènes d'anaérobiose (ex : fermentation)
		x	transfert de polluants
		xxx	augmentation du risque de crues éclairs
atmosphère	augmentation de l'érosion éolienne	xx	augmentation des particules en suspension dans l'air
biodiversité	perte en couvert végétalisé	xx	diminution de la biodiversité
		xxx	diminution de la capacité à absorber du carbone
paysage	augmentation de l'érosion hydrique	xx	augmentation de l'érosion de surfaces adjacentes
	uniformisation du paysage	x	perte esthétique
		xx	baisse de l'attractivité

Composants affectés, effets, temporalité et conséquences du scellement des sols (x : contribution mineure ; xx : contribution moyenne ; xxx : contribution majeure).
/ Scalenghe R. & Marsan F.A. (2009) The anthropogenic sealing of soils in urban areas, *Landscape and Urban Planning*, 90, 1-10



Désimperméabilisation et végétalisation des rues d'Angers afin de lutter contre les ICU. / G. Lecuir

QUE DALLE !, WAGON LANDSCAPING, DUNKERQUE



1



2



3



4



5



6

→ **Wagon Landscaping, avec l'Atelier 710**, est intervenu sur la demande de la ville de Dunkerque sur la gare d'eau de l'île Jeanty.

Que Dalle ! est un jardin expérimental pour transformer l'enrobé d'un ancien quai de déchargement en sol accueillant une reconquête végétale. En premier lieu, la dalle a été découpée (à l'aide d'une raboteuse) (1) et décompactée (à l'aide d'une minipelle

équipée d'un brise-roche hydraulique) (2). Le sol a ensuite été enrichi et travaillé avec une terre argileuse qui permet de retenir l'eau dans un sol, à l'origine, très drainant (3, 4). Pour ce projet, aucun déchet n'a été exporté (5, 6).

Superficie : 300 m² / Coût : 11 000 €

Aménagement et scellement des sols



ARTIFICIALISATION DES SOLS ET ÉTALEMENT URBAIN

→ L'artificialisation* des sols contribue à leur imperméabilisation. Les pratiques d'aménagement les modifient et impactent leur perméabilité, par excavation/remplacement du matériau originel, recouvrement par des revêtements plus ou moins perméables, compaction ou apport massif de matériaux venant réduire la circulation de l'eau.

Le scellement des sols est d'ailleurs l'une des composantes principales des phénomènes d'étalement urbain. Il s'agit de l'expansion du bâti sur des espaces périphériques engendrés par l'augmentation de la population locale (bien qu'il soit généralement associé à une diminution de la densité de population). Cet étalement est influencé par l'amélioration de la desserte des collectivités et par le besoin d'espace et de nature.

Il a également été accentué par la massification de l'automobile. Il peut s'opérer par « tâches d'huiles » lorsqu'il étend le contour des villes, en « doigts de gant » autour d'axes de circulation ou en « mitage » pour des formes plus éparpillées.

CONSTRUCTION DE BÂTI

→ L'implantation du bâti passe par une étape de terrassement des sols. Ces derniers sont creusés sur une certaine profondeur puis évacués, ou réutilisés sur place si possible. Cette étape est une condition pour assurer la stabilité du bâtiment et éviter tout risque d'effondrement *a posteriori*.

Le terrassement inclut donc une étape d'évacuation de la terre végétale, la pose des canalisations et des réseaux ou viabilisation, la pose d'un géotextile et le remblaiement pour assurer la planéité de l'ouvrage.



Surface scellée par du béton,
Campus Béthanie à Talence (33). / SCE



Voirie, stationnement et trottoir en enrobé,
Bourg Sous La Roche (85). / SCE



Travaux et pose d'enrobé sur route. / SCE

INSTALLATION DE REVÊTEMENTS DE VOIRIE

→ La mise en œuvre de voirie concerne la réalisation ou la réfection de zones de circulation pour les véhicules lourds ou légers, les piétons ou les vélos ou encore les zones de stationnement. Cela nécessite le recours à une grande diversité de techniques routières adaptées à chaque usage. L'intensité du trafic est un des critères clés dans le choix des solutions techniques. Dans tous les cas, la mise en place d'une voirie implique la constitution d'une structure porteuse dont le dimensionnement (épaisseur et nombre de couches d'assise) va dépendre du trafic envisagé, de la portance du sol et du type de revêtement de surface choisi (e.g., enrobés hydrocarbonés, bétons de ciment/de résine, pavés et dalles, stabilité).

Parmi les types de revêtements, on peut notamment citer :

- les produits hydrocarbonés, qui englobent plusieurs classes de revêtements (enrobés bitumineux, enduits superficiels, enrobés percolés, asphaltes coulés, produits spéciaux), destinés à un usage de voirie pour la circulation des véhicules ou le stationnement ;
- les enrobés à liant d'origine végétale, comme les huiles de cuisson, sont sensibles au UV et moins résistants au poinçonnement ;
- les bétons de ciment, constitués d'un mélange de granulats (graviers, sables), de ciments, d'eau et d'adjuvants chimiques. Leur usage est multiple et peu satisfait tous les types de trafic. Ils permettent des finitions de surface variées : couleur, surface avec relief après désactivation, différentes formes géométriques ;
- les bétons de résine sont constitués des éléments de base des bétons (granulats, sables). Le liant est ici composé d'une résine type polyester ou résine époxy. Ils offrent des résistances à la compression



Revêtement pavé joint-béton, Projet Cœur de Maine à Angers (49). / SCE

peu élevées et sont davantage utilisés en aménagements paysagers et zones de circulation pour piéton ou pour véhicules légers ;

- les sables stabilisés sont des matériaux naturels compactés mécaniquement, seuls ou en mélange avec un liant hydraulique pour renforcer leur résistance à la compression. Ils sont constitués de matériaux plutôt sableux avec une courbe granulométrique permettant un compactage optimal. Les choix de couleur et de taille des grains sont particulièrement appréciés pour leur bonne intégration paysagère dans les projets d'aménagements ;
- les pavés et dalles, en béton ou en pierres naturelles, sont des matériaux modulaires mis en œuvre sur un lit de pose en sable ou en béton de ciment de quelques centimètres qui sert de liaison avec la couche d'assise. Les joints sont remplis de sable (classique ou polymère), mortier ou liant époxy. Leur pose avec des joints plus larges (1 à 2 cm) remplis de terre sableuse favorise l'infiltration et la végétalisation.



Pose d'une dalle béton avant pavés, rue du Couëdic à Nantes (44). / SCE

COMPACTION

→ Le tassement progressif des surfaces perméables (sols, mélanges terre-pierre, terre végétale) sous l'action des facteurs climatiques conduit à la réduction de la capacité d'infiltration de l'eau et à l'augmentation du ruissellement. Ce phénomène peut être amplifié par les passages répétés de véhicules d'entretien ou de piétons, réduisant la porosité et augmentant la masse volumique du sol. Cela a également comme effet de réduire la capacité des racines et de la faune du sol à explorer le milieu et à contribuer au maintien de cette porosité.

COLMATAGE DE SURFACES PERMÉABLES

→ Certains usages peuvent contribuer à l'imperméabilisation de surfaces mises en place

avec des revêtements perméables qui offraient des solutions de gestion des eaux pluviales en les infiltrant au travers de leur structure (revêtements perméables).

Ces solutions techniques sont diverses et peuvent être sensibles au colmatage par des sédiments, des débris de végétaux ou tout autre type de débris comme les gommages de pneus. Plusieurs raisons peuvent entraîner ce colmatage, comme un choix du revêtement inapproprié en fonction de l'usage ou une gestion mal raisonnée/opérée. Il concerne les solutions techniques comme les bétons drainants, bétons de résine ou enrobés poreux. Pour les autres solutions comme les dalles alvéolées, un colmatage peut également subvenir avec l'accumulation de débris et de sédiments.



Travaux sur réseaux. / SCE



Travaux sur voirie et sur voie de tram à Nantes (44). / SCE



////////////////////////////////////

Pourquoi desceller ?

////////////////////////////////////

Contexte réglementaire et opérationnel



CADRE RÉGLEMENTAIRE

→ Le présent guide se centre sur l'échelle de l'aménagement de l'espace, et plus spécifiquement encore sur l'aménagement de l'espace urbain. Il est nécessaire de la replacer dans son contexte réglementaire et/ou opérationnel, notamment dans le cadre plus général de la planification et de l'urbanisme des territoires au sein desquels s'exercent les projets de descellement. Le vocabulaire employé ici reprend celui de la loi n° 85-704 du 12 juillet 1985, relative à la maîtrise d'ouvrage (MOA) publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre (MOE) privée, dite loi MOP, intégrée dans le code de la commande publique. Cette loi française met en place, pour les marchés publics, la relation entre MOA et MOE.

Comprendre le contexte de planification de projets de descellement des sols revient alors à examiner le chaînage descendant de lois, de règles, de dispositifs qui influent sur les logiques de descellement, depuis le cadre législatif national jusqu'aux Plans locaux d'urbanisme (PLU) des communes et des intercommunalités, dans lesquels sont plus particulièrement inscrites des pièces facultatives qui font le lien entre la planification et le projet : les Orientations d'aménagement et de programmation (OAP).

PRISE EN COMPTE DES SOLS PAR LE BIAIS DES DYNAMIQUES EUROPÉENNES

→ En matière de sols, l'ensemble du corpus national de lois, de règles et de dispositifs, qui s'exprime au travers des documents de planification et d'urbanisme locaux, est de plus en plus influencé par des réflexions qui s'élaborent à l'échelle européenne. Ainsi, en 2023, la Commission européenne propose, dans le cadre de son Pacte Vert pour l'Europe et de sa stratégie pour la protection des sols à l'horizon 2030, une directive pour la surveillance et la résilience des sols.

Ce texte vise à établir un cadre européen partagé, un socle commun d'analyse au sein de l'Union européenne (UE), pour le suivi et l'évaluation de la « santé » des sols. Il établit également « des mesures relatives à la gestion durable des sols et à la gestion des sites contaminés (identification et assainissement) ».

Les positions européennes affirmées dans ce texte sont justifiées par les fonctions et les services écosystémiques qu'assurent les sols en faveur des objectifs climatiques et environnementaux fixés par l'UE pour l'horizon 2030-2050.

ZAN, VERS UN OBJECTIF DE NEUTRALITÉ

→ La notion de Zéro artificialisation nette (ZAN), qui, depuis récemment, rebat les cartes de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme français, découle de ce cadre de réflexion et d'action européen. Défini par la loi Climat-Résilience de 2021, il doit, à terme, permettre d'établir le solde entre les surfaces nouvellement artificialisées et celles désartificialisées, à l'échelle d'un document de planification et d'urbanisme et sur une période donnée.

Comme son nom l'indique, il fixe un objectif de 0 % d'artificialisation nette des sols à l'horizon 2050, sur l'ensemble du territoire national. Par ailleurs, il sous-tend une réduction de moitié du rythme de l'artificialisation entre 2021 et 2031, par rapport à la période 2011-2021. Le texte de loi proposé et adopté en Commission mixte paritaire détermine ainsi une limite de 125 000 ha de droits à artificialiser sur la période 2021 à 2031, enveloppe foncière à laquelle doivent être ajoutés 10 000 ha réservés à la réalisation de projets d'envergure nationale ou européenne, et 2 500 ha liés à des périmètres spécifiques (Schéma directeur de la région Île-de-France, Corse, Outre-Mer).

Ce texte prévoit également « une garantie rurale », de fait généralisée, qui permet à n'importe quelle commune, indépendamment de sa taille et de sa densité, de disposer d'1 ha de droit à artificialiser pour assurer son développement. Cette surface est potentiellement mutualisable par les communes regroupées en intercommunalités et couvertes par un PLU « prescrit, arrêté ou approuvé avant le 22 août 2026 ». Dans l'attente de la révision de ces documents de planification et d'urbanisme, des outils sont toutefois mis à disposition des maires pour lutter contre l'artificialisation. Il s'agit d'un droit de préemption étendu à la renaturation, ainsi que la possibilité de surseoir à statuer sur les projets pouvant mettre en péril l'objectif de diminution de la consommation d'espaces naturels, agricoles ou forestiers.

La mise en œuvre du ZAN se fonde, en outre, sur une définition évolutive des surfaces artificialisées et non-artificialisées. Jusqu'en 2032, le décret n° 2022-763 du 29 avril 2022 contraint ainsi les efforts de lutte contre l'artificialisation aux seuls « espaces naturels, agricoles et forestiers ». Passée cette date, seront considérées comme artificialisées « les surfaces dont les sols sont soit imperméabilisés en raison du bâti ou d'un revêtement, soit stabilisés et compactés, soit constitués de matériaux composites ». Il en sera de même pour les surfaces « végétalisées herbacées (c'est-à-dire non ligneuses) qui sont à

usage résidentiel, de production secondaire ou tertiaire, ou d'infrastructures, y compris lorsqu'elles sont en chantier ou à l'état d'abandon ». À l'inverse, seront considérées comme non-artificialisées « les surfaces qui sont soit naturelles, nues ou couvertes d'eau, soit végétalisées, constituant un habitat naturel ou utilisées à usage de cultures (y compris les surfaces d'agriculture urbaine et les surfaces boisées ou arbustives dans l'espace urbain) ».

Il faut noter que « cette nomenclature n'a pas vocation à s'appliquer au niveau d'un projet pour lequel l'artificialisation induite est appréciée au regard de l'altération durable des fonctions écologiques ainsi que du potentiel agronomique du sol ». En outre, le décret

d'application de novembre 2023 détermine « les seuils de référence à partir desquels pourront être qualifiées les surfaces (50 m² pour le bâti et 2 500 m² pour les autres catégories de surface ; 5 m de large pour les infrastructures linéaires et au moins 25 % de boisement d'une surface végétalisée pour qu'elle ne soit pas seulement considérée comme herbacée) ». Il convient de souligner que cette distinction juridique entre les surfaces considérées comme artificialisées et comme non-artificialisées, à la fois fine et complexe, invite à une prudence accrue en matière d'identification et de qualification des espaces mobilisés à des fins de descellement et/ou de renaturation, notamment dans le cadre de procédures de compensation induites par la séquence « éviter, réduire, compenser » (ERC).

CATÉGORIES DE SURFACES	
Surfaces artificialisées	1° Surfaces dont les sols sont imperméabilisés en raison du bâti (constructions, aménagements, ouvrages ou installations).
	2° Surfaces dont les sols sont imperméabilisés en raison d'un revêtement (artificiel, asphalté, bétonné, couvert de pavés ou de dalles).
	3° Surfaces partiellement ou totalement perméables dont les sols sont stabilisés et compactés ou recouverts de matériaux minéraux.
	4° Surfaces partiellement ou totalement perméables dont les sols sont constitués de matériaux composites (couverture hétérogène et artificielle avec un mélange de matériaux non minéraux).
	5° Surfaces à usage résidentiel, de production secondaire ou tertiaire, ou d'infrastructures notamment de transport ou de logistique, dont les sols sont couverts par une végétation herbacée, y compris si ces surfaces sont en chantier ou sont en état d'abandon.
Surfaces non artificialisées	6° Surfaces naturelles qui sont soit nues (sable, galets, rochers, pierres ou tout autre matériau minéral, y compris les surfaces d'activités extractives de matériaux en exploitation) soit couvertes en permanence d'eau, de neige ou de glace.
	7° Surfaces à usage de cultures, qui sont végétalisées (agriculture, sylviculture) ou en eau (pêche, aquaculture, saliculture).
	8° Surfaces naturelles ou végétalisées constituant un habitat naturel, qui n'entrent pas dans les catégories 5°, 6° et 7°.

Nouvelle nomenclature des surfaces artificialisées et non-artificialisées.
/ D'après J. Castex, ancien Premier ministre, Legifrance. www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000045727061



Descellement naturel de trottoirs, Nantes. / C. Schwartz

À une échelle plus locale, le ZAN contribue à renforcer la dimension décisionnelle et planificatrice de l'échelon régional. C'est en effet à ce niveau territorial qu'une nouvelle instance de concertation doit être créée. La conférence régionale du ZAN doit ainsi réunir des représentants locaux (élus de communes, d'intercommunalités et de départements), régionaux et nationaux compétents en matière de planification et d'urbanisme. Le Schéma régional de développement d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) devient, de surcroît, le document stratégique privilégié pour fixer les objectifs de lutte contre l'artificialisation des sols à l'échelle locale. Néanmoins, la valeur ou la force prescriptive future du SRADDET en matière de ZAN pose question, dans la mesure où les documents de rang inférieur (Schéma de cohérence territoriale [SCoT], PLU) seront liés à lui par un simple rapport de « prise en compte ».

CADRE TANGIBLE AU SEIN DES DOCUMENTS D'URBANISME

→ En 2024, le descèlement est beaucoup plus directement et tangiblement envisagé au sein des SDAGE et de leurs déclinaisons locales, les Schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE). En effet, à travers la thématique de la gestion des eaux à différentes échelles territoriales, ces documents de planification insufflent non seulement de fortes logiques de lutte contre l'imperméabilisation des sols, mais font également montre de véritables intentions en matière de descèlement des surfaces scellées auprès des MOA publiques et privées, en proposant des moyens d'actions concrets (y compris sur un plan financier, notamment grâce aux aides de l'agence de l'eau) et en encadrant les documents de planification que sont les SCoT et les PLU.

Le cœur même du SCoT réside dans la lutte contre l'étalement urbain et donc contre l'artificialisation des sols. En effet, depuis son élaboration dans le cadre de la loi relative à la solidarité et renouvellement urbain de 2000, ce document de planification intercommunale n'a cessé d'évoluer en faveur d'un plus grand respect des composantes environnementales des territoires. En tant que document intégrateur des logiques imposées par la planification de rangs supérieurs (SDAGE, SAGE, Schéma régional de cohérence écologique, SRADDET), le SCoT apparaît comme le premier outil d'évaluation fine de la consommation d'espaces naturels agricoles et forestiers (ENAF) sur une période qui couvre les 10 années précédant son approbation. Sur cette base, lors de son élaboration, il doit établir des objectifs chiffrés pour limiter cette consommation d'ENAF, *a fortiori* à la périphérie des villes, en identifiant notamment les capacités territoriales en termes de densification, de mutation et de renouvellement urbain.

Dans sa nouvelle mouture, le SCoT est donc appelé à traduire directement les objectifs du ZAN fixés par le SRADDET. Dans son Plan d'aménagement stratégique (PAS), il doit ainsi déterminer des objectifs de réduction du rythme de l'artificialisation, par tranche de 10 années. Par la suite, il peut décliner ces ambitions par secteur géographique, dans son Document d'orientations et d'objectif. De fait, en matière de lutte contre l'artificialisation des sols, de leur imperméabilisation et de leur désimperméabilisation, le SCoT est de plus en plus amené à impulser les grandes orientations qui doivent concrètement être mises en œuvre dans le PLUi ou le PLU.

Le PLU, quant à lui, est un document de planification qui, « à l'échelle du groupement de

communes ou de la commune, traduit un projet global d'aménagement et d'urbanisme et fixe en conséquence les règles d'aménagement et d'utilisation des sols » (Code de l'urbanisme). C'est lui qui détermine juridiquement les affectations de ces derniers ainsi que les règles relatives à leur constructibilité ou à leur non-constructibilité. Malgré des logiques qui restent encore fortement cantonnées à la surface des sols, force est de constater que le PLU se dote, au fur et à mesure de ses évolutions, de plus en plus de dispositifs qui envisagent dans la profondeur le caractère biotique des composantes environnementales et écologiques fondamentales des milieux et des territoires.

Au-delà des seuls objectifs de lutte contre l'artificialisation, le PLU contient donc désormais des possibilités qui permettent d'agir directement en faveur du descellement des sols. Par exemple, les Coefficients de biotope par surface affectent des ratios d'étendues éco-aménageables, ou par extension non-imperméabilisées, aux différentes zones définies par le règlement du PLU. Ils sont cependant optionnels. On peut également trouver

les OAP, ces pièces facultatives du PLU qui, en fonction des cas, peuvent être soit thématiques, soit sectorielles, ou les deux à la fois. Opposables à toute demande d'autorisation d'urbanisme lorsqu'elles existent, elles permettent de tracer d'épais traits d'union entre les objectifs affichés de la planification et les réalisations concrètes des projets d'aménagement. À ce titre, elles sont de plus en plus employées par les collectivités pour encadrer des principes concrets de conception dans des secteurs où elles ne détiennent pas forcément la maîtrise foncière, ou pour imposer des thèmes environnementaux et écologiques majeurs (e.g., biodiversité, trame verte et bleue) aux acteurs de la fabrique territoriale. Il est très probable que dans un avenir proche, les OAP soient davantage mobilisées pour concrétiser les logiques de descellement déterminées par les documents de planification, sur les sols des territoires à ménager et à aménager.



Des projets de descellement et de revégétalisation existent également à l'étranger, comme pour l'ancien aéroport Alter Flugplatz en Allemagne qui accueille désormais une forêt. / F. Broggin

Restaurer les fonctions des sols

→ La réduction du scellement des sols dépend, d'une part, de différents leviers d'action dictés par une politique d'aménagement innovante, et résulte, d'autre part, d'une ferme volonté de faire évoluer les pratiques d'aménagement. Une opération de descellement passe en premier lieu par la définition d'objectifs de restauration de fonctions écologiques ou de services écosystémiques perdus, à l'échelle du site à desceller.

Au premier rang des préoccupations, se situe la gestion de l'eau urbaine à travers les fonctions d'infiltration et de filtration des eaux dans le sol. Elles favorisent principalement la régulation des inondations, et, dans une moindre mesure, celle de la qualité de l'eau. Le descellement contribue par exemple à une meilleure gestion des eaux de pluie d'établissements scolaires. Les appels à projets financés par les agences de l'eau permettent d'ajouter une dimension culturelle et pédagogique sur le cycle de l'eau, sensibilisant ainsi les jeunes générations.

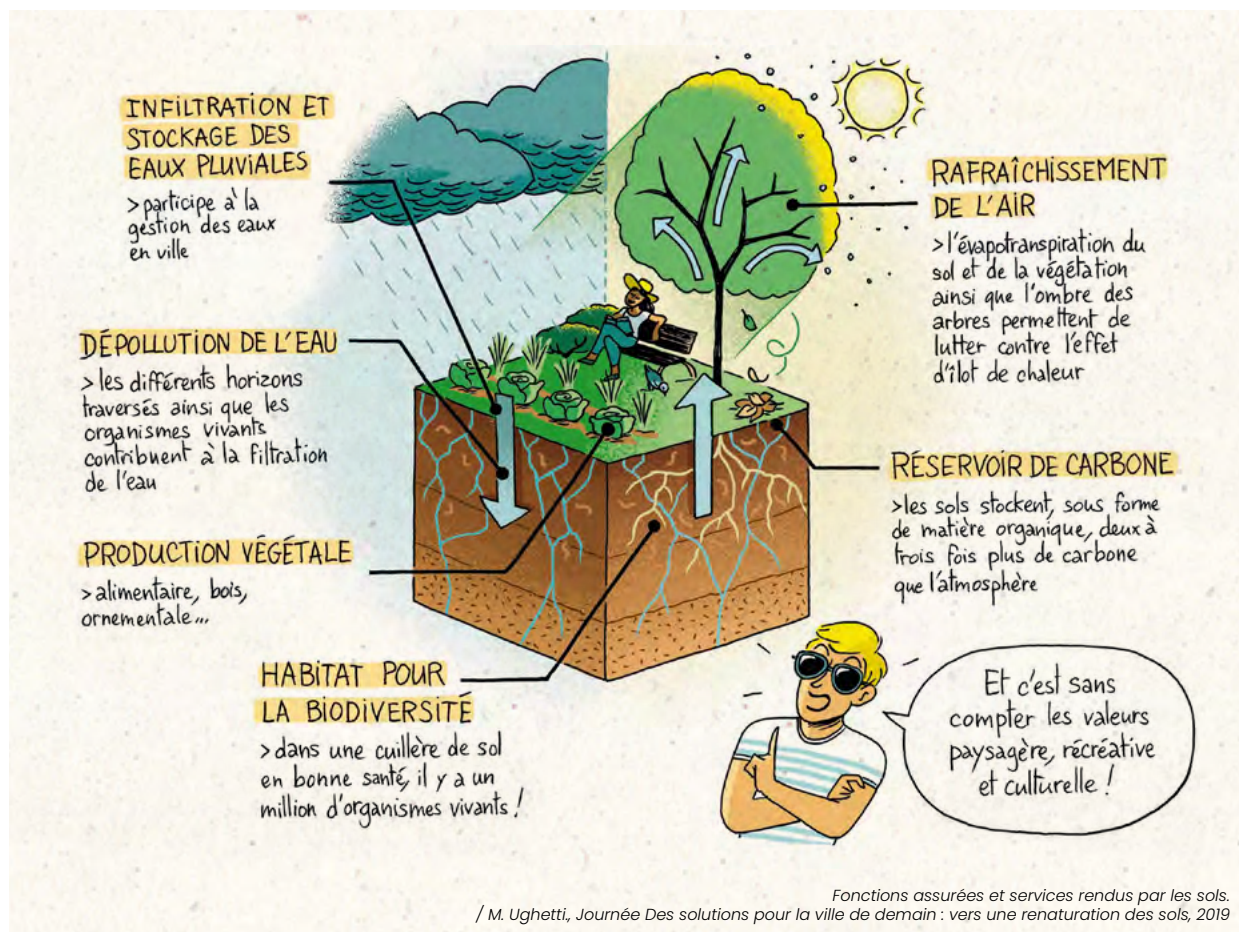
De manière transversale, le descellement restaure l'attrait de l'environnement physique et la biodiversité, en créant des habitats pour une faune et une flore diversifiées et fonctionnelles. Il offre ainsi un accès renouvelé à une diversité de paysages urbains.

Les espaces verts participent à l'amélioration du cadre de vie, à la promotion des activités récréatives, au bien-être et au renforcement des relations sociales des populations. Ils améliorent également la résistance des espaces, moins sensibles aux impacts environnementaux, rendant possible la production de biomasses ornementales ou alimentaires.

Le descellement est un procédé qui s'inscrit dans une transformation globale des villes, en contribuant à la création d'espaces et d'ouvrages multifonctionnels. En découvrant les sols, il permet de retrouver les fonctions essentielles liées aux cycles de l'eau, du carbone mais aussi des éléments nutritifs.

Enfin, le dernier objectif relie enjeux locaux et globaux en mettant l'accent sur les services de régulation du climat global et local. Il vise à adapter les espaces urbains aux épisodes caniculaires et aux fortes chaleurs estivales, génératrices de situations d'inconfort pour les citoyens et susceptibles de causer des impacts sanitaires.

Une fois les objectifs de compensation fixés, il faut identifier les zones les plus propices au descellement au sein des secteurs urbains.



Il s'agit alors de croiser différentes informations :

- la topographie et les propriétés bio-physico-chimiques du sol et du sous-sol ;

- l'identification des zones les plus imperméabilisées du territoire ;

- la localisation des zones à forts enjeux environnementaux (e.g., risque inondation, ICU, discontinuité écologique) ;

- les zones à populations vulnérables (cours d'école, quartiers prioritaires).

Le principal enjeu lors de la mise en œuvre opérationnelle du descellement d'un sol est inhérent aux propriétés du sol scellé. En effet, les opérations de scellement n'enferment pas seulement le sol sous une couche artificielle, elles le dégradent fortement.

Cet état de fait peut entraîner le besoin d'améliorer les propriétés du sol par l'apport d'amendement ou de terre végétale, voire par des opérations de génie pédologique.

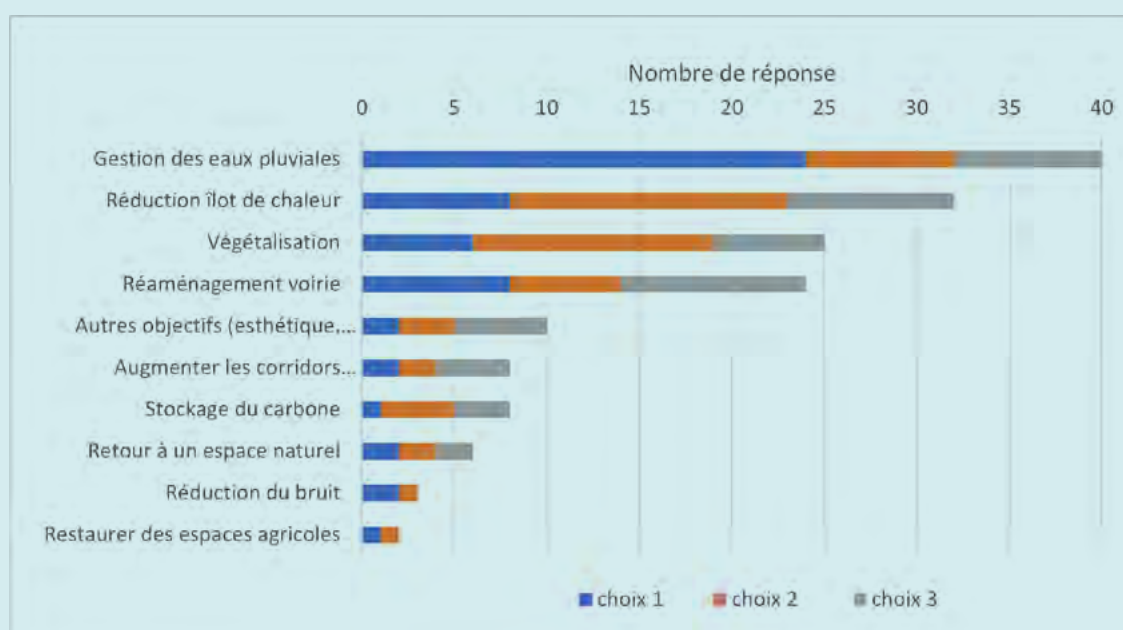


Sondage Plante & Cité : les objectifs des opérations de descellement

Les répondants devaient classer les trois objectifs principaux visés par une opération de descellement (voir graphique). La « gestion des eaux pluviales » arrive en tête des trois premiers choix pour 40 répondants (70 %), et « l'amélioration du climat urbain » arrive en 2^e position, avec 32 répondants l'ayant classée dans les trois premiers. Les autres objectifs majeurs sont le « soutien à la végétation » et le « réaménagement de la voirie pour intégrer des modes de transport durables » (respectivement 25 et 24 répondants). L'intégration des opérations de descellement dans des corridors verts et la réduction

de la fragmentation écologique ont été classées en 6^e position par seulement huit répondants.

37 répondants (64 %) ont affirmé inclure la notion de services écosystémiques dans les premières étapes du projet de descellement (mise en place, conception), 24 (42 %) ont confirmé intégrer les opérations dans une économie circulaire (réutilisation ou recyclage), et 20 ont déclaré faire les deux. Les incitations politiques ERC ou ZAN n'ont été choisies respectivement que par cinq et quatre répondants.



Objectifs des opérations de descellement classés par importance parmi trois choix à sélectionner.

Renaturation : point sur le projet DESSERT

ESSAIS EN CONDITIONS DE LABORATOIRE

→ Une caractérisation des matériaux issus de sites descellés a été réalisée afin d'étudier l'efficacité de la refonctionnalisation des sols après descelllement. Des essais de culture en conditions contrôlées de laboratoire ont également été menés, ainsi que des essais pilotes de terrain pour un suivi en conditions climatiques réelles sur le long terme.

Cette approche expérimentale permet de définir les conditions optimales de renaturation d'espaces initialement minéralisés puis descellés. Cette démarche mêle la valorisation des matériaux en place et la mobilisation de gisements de déchets et de sous-produits locaux, dans un contexte d'économie circulaire.

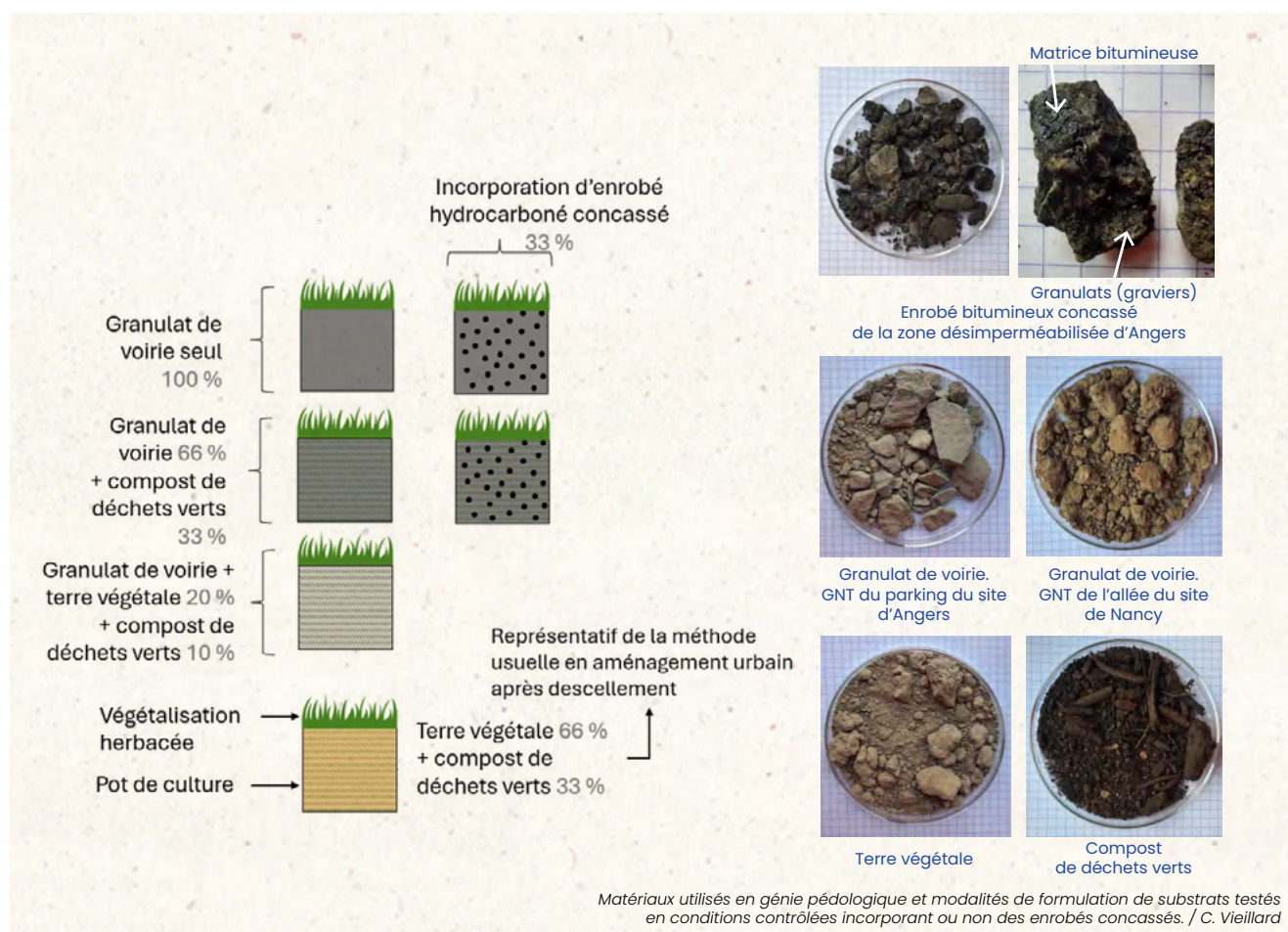
Les matériaux utilisés dans les essais en conditions contrôlées sont issus des sites pilotes de terrain mis en place à Angers et Nancy, afin de compléter les informations issues des expérimentations *in situ*. Il s'agit :

- de deux échantillons de granulats de voirie ;
- d'un compost de déchets verts ;

- de l'enrobé concassé prélevé sur le site d'Angers ;
- de la terre végétale utilisée sur le site pilote d'Angers.

Différentes formulations de ces cinq matériaux (voir schéma ci-dessous) ont été mises en œuvre afin d'évaluer l'intérêt de mélanges contrastés en termes de fertilité et de risque de transfert d'éléments indésirables vers les eaux ou les tissus végétaux.

Une expérimentation de croissance végétale a été menée sous serre pendant 11 semaines. Les substrats ont été placés dans des pots de culture percés à la base pour drainer les éventuelles eaux excédentaires. Au cours de la culture, l'humidité du sol a été maintenue à 90 % de la capacité de rétention pour chaque mélange (conditions non limitantes). Un semis de ray-grass a été réalisé avec une densité équivalente à 200 kg ha⁻¹ et ses paramètres de croissance ont été suivis au cours du temps (taux de germination, hauteur, biomasse produite). Il en va de même pour la qualité de la solution du sol, prélevée par bougies poreuses.





Dispositif de culture en serre sur substrats incorporant ou non des enrobés concassés.
(1) 11 jours après semis de ray-grass (23/05/22), (2) 18 jours après semis (30/05/22). / C. Vieillard

SITES PILOTES DE TERRAIN

→ Trois sites pilotes de terrain ont été répartis sur le territoire français métropolitain dans des contextes pédoclimatiques contrastés, à Angers, Cannes et Nancy, afin d'évaluer les effets des pratiques intenses de descellement sur la renaturation :

- le site pilote d'Angers a été mis en place dans la commune de Saint-Barthélemy-d'Anjou, sur une zone de parking du dépôt de bus de la Métropole. Localisé à l'entrée du site, l'essai occupe une surface d'environ 125 m² peu ombragés ;

- le site pilote de Nancy est localisé dans le Parc Sainte-Marie de la ville, espace vert historique d'une superficie de 7,5 ha. Le pilote est installé sur une ancienne allée en enrobé, d'une surface d'environ 150 m², que le service Environnement et Nature de la ville a souhaité « effacer ». Cette allée se trouve dans un environnement densément végétalisé, bordée sur son côté ouest par des arbres et arbustes et sur son côté est par un espace dégagé recouvert d'une strate herbacée ;

- l'essai de Cannes est localisé sur le parking d'un site d'entretien autoroutier (Vinci Escota, La Bocca, Mandelieu-la-Napoule). Le dispositif qui s'étend sur une surface d'environ 145 m² est peu ombragé et s'insère dans une zone fortement imperméabilisée.

Pour chaque site, les matériaux des différentes modalités ont été échantillonnés et caractérisés. La totalité de la surface des essais a été descellée et le revêtement imperméable a été exporté pour une réincorporation dans les filières de recyclage locales. Quatre modalités de descellement des sols ont été mises en œuvre suivant un gradient d'intensité d'intervention croissant :

- la modalité « minimum » (MIN) est restée en l'état avec un sol débitumé ;
- pour la modalité « intermédiaire » (INT), l'horizon de croissance a été décompacté et homogénéisé à la pelle mécanique sur une profondeur de 30 à 40 cm ;

- la modalité « maximale » (MAX) a incorporé à cet horizon de croissance 30 % en volume de compost de déchets verts ;

- la modalité « référence » (REF) a consisté en l'export des 30 premiers centimètres de matériaux et leur remplacement par un mélange terre végétale ($\frac{2}{3}$) et compost de déchets verts ($\frac{1}{3}$). Il s'agit de la pratique la plus couramment mise en œuvre.

Un semis d'un mélange de 10 espèces a été réalisé en mai 2022 avec une densité de semis de 30 g m⁻². Ce mélange était constitué de 75 % de Poacées et 25 % d'espèces d'autres familles en proportion égale dans chacune des classes. Les espèces ont été sélectionnées sur la base de leur robustesse et de leur résistance connue aux stress abiotiques (en particulier hydrique). Elles ne présentent *a priori* aucun caractère invasif pour les trois situations géographiques étudiées.

Le fonctionnement des pilotes a été suivi au cours du temps par :

- l'implantation de sondes permettant une mesure en continu de la teneur en eau volumique, de la température et de la conductivité électrique des sols pour chaque modalité ;

- un suivi phytosociologique du couvert végétal incluant l'estimation des taux de recouvrement totaux et spécifiques et la diversité spécifique ;

- la quantification de la biomasse végétale aérienne produite ;

- un échantillonnage et une caractérisation des sols pour les paramètres suivants : pH, conductivité, phosphore assimilable par les plantes (Polson), carbone organique et inorganique et azote total ;

- une évaluation, sur cinq périodes de 90 jours, de la fonction de décomposition de la matière organique par la méthode du « tea bag index ».

Cette méthode des « sachets de thé » permet une évaluation des vitesses de décomposition et de stabilisation de la litière. Elle consiste à enfouir dans le sol une paire de sachets de deux types de thé, du thé vert et du thé rouge rooibos, et à évaluer la perte en masse, synonyme de décomposition, au bout d'environ 90 jours. L'interprétation des mesures permet alors d'estimer une vitesse de décomposition et un facteur de stabilisation de la litière. Des valeurs élevées peuvent être des indicateurs d'accroissement du recyclage des nutriments au travers de la décomposition de la matière organique, synonyme de sol plus

fonctionnel et donc plus sain. Cette mesure est intégratrice et dépend des conditions environnementales (humidité et température), du type de sol et de son usage ainsi que de la structure des communautés microbiennes.

Pour ces suivis, chaque parcelle, correspondant à une modalité, a été découpée en 15 sous parcelles s'adaptant à la géométrie de l'essai (trois réplicats pour cinq dates d'échantillonnage).



De gauche à droite : profils de sols scellés, vues aériennes des sites et mise en place des pilotes de terrain.
(haut : Angers / R. Dagois ; milieu : Nancy / C. Schwartz ; bas : Cannes / S. Ouvrard)

ADAPTER L'INTENSITÉ D'INTERVENTION AU CONTEXTE PÉDOCLIMATIQUE

→ Puisque l'un des enjeux du descelllement des sols est la revégétalisation du milieu urbain, le projet DESSERT a étudié les fonctions des systèmes sol-eau- plante dans des situations contrastées de sols descellés, en fonction des formulations de substrat faites à partir des matériaux initiaux et des matériaux d'amendements. En effet, pour que le descelllement soit réussi, le sol doit répondre à des critères de qualité agromonomique et environnementale suffisants.

Les essais de culture de végétaux en laboratoire visaient à évaluer la fertilité des substrats mis en œuvre et les potentiels enjeux liés à la présence de contaminants dans les matériaux constitutifs des couches de voirie de sols descellés.

Tout d'abord, les résultats montrent que sur les matériaux testés, il n'y a pas d'enjeu de contamination, éléments en traces ou hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Ils peuvent alors servir de base à la constitution d'un substrat de culture. Essentiellement constitués de graves à forte teneur en éléments



Nancy



Angers



Cannes

Sol descellé + décompacté / Modalité intermédiaire



Nancy



Angers



Cannes

Sol descellé + décompacté + amendé / Modalité maximale



Nancy



Angers



Cannes

Sol descellé + construit / Modalité de référence

Couvert végétal en fonction des sites et des modalités de descelllement (observations Angers & Nancy juillet 2022 ; Cannes mai 2023). / C. Schwartz

grossiers, et pauvres en éléments nutritifs (P et N, en particulier), ces matériaux présentent une fertilité limitée qu'il convient d'améliorer. Un apport de compost de déchets verts permet alors d'obtenir des performances de croissance tout à fait satisfaisante. Cet apport peut d'ailleurs être raisonné en fonction du potentiel fertile initial du matériau considéré. Une association compost et terre végétale peut être envisagée, mais ne présente pas nécessairement d'intérêt.

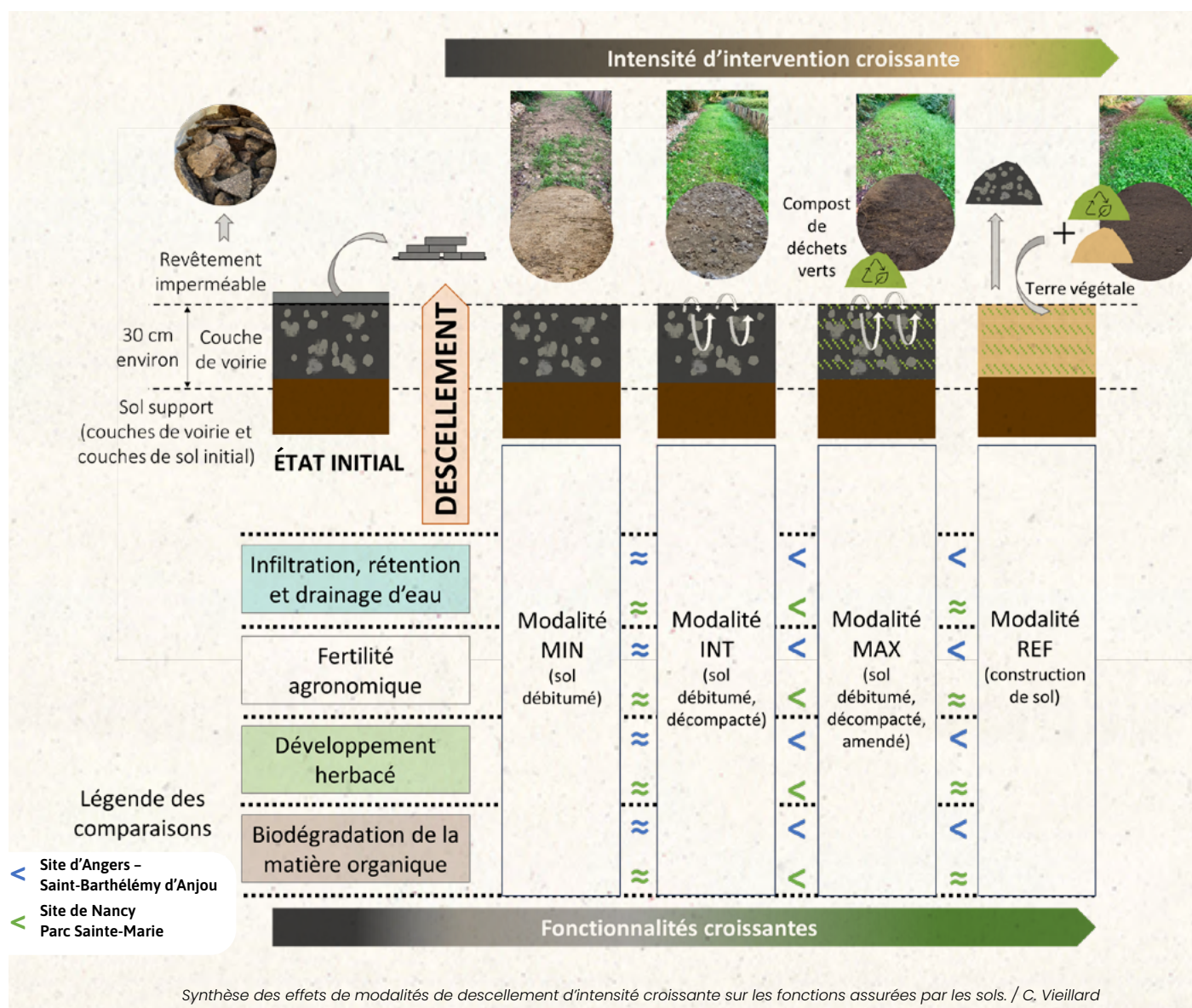
La réutilisation de l'enrobé sous forme concassé dans le substrat entraîne une augmentation de la fraction grossière, souvent déjà élevée dans les matériaux de grave, ce qui tend à réduire la fertilité du substrat. Cette option pourrait être retenue si les matériaux initialement présents étaient inhabituellement dépourvus de fraction grossière, afin d'augmenter le pouvoir drainant du substrat et/ou sa portance.

La valorisation de l'enrobé sous forme de paillis ne semble pas avoir d'effet négatif en dehors du pouvoir couvrant qui peut freiner l'émergence de

semis. La limitation de l'évaporation d'eau pourrait constituer un atout dans une mise en œuvre *in situ* en conditions hydriques défavorables.

Au terrain, le suivi des sols et des végétaux au cours du temps montre qu'en « découvrant » des sols, il est effectivement possible d'en « redécouvrir » des fonctions et des services perdus. Les pratiques de descellement mises en œuvre ont toutes permis, quels que soient les contextes et les modalités, de refunctionaliser les sols en place, avec néanmoins une différence de performance en fonction de l'intensité d'intervention. Ainsi, pour une même modalité, les caractéristiques du substrat en place, en particulier ses propriétés de rétention en eau, ainsi que les conditions climatiques, en particulier de précipitation, apparaissent comme particulièrement sensibles.

Si ces deux facteurs sont *a priori* défavorables, il convient alors d'ajuster les pratiques en augmentant l'intensité d'intervention et en formulant un substrat plus adapté, suivant une logique de construction de sols*, ou en mettant



en place une irrigation pour accompagner les plantations lors des premières années d'installation, à la manière d'une période de garantie après livraison de projets paysagers.

De même, le choix du couvert végétal est à raisonner en fonction du contexte climatique et de la fertilité du substrat. Il y a là encore la possibilité d'avoir recours au génie pédologique afin d'optimiser cette dernière en s'adaptant aux besoins du couvert ciblé.

Enfin, la connectivité avec le milieu environnant est à considérer comme facteur bénéfique additionnel lorsqu'elle est effective, ou plus limitant si les zones considérées sont « isolées », que ce soit en termes hydrique ou biologique.

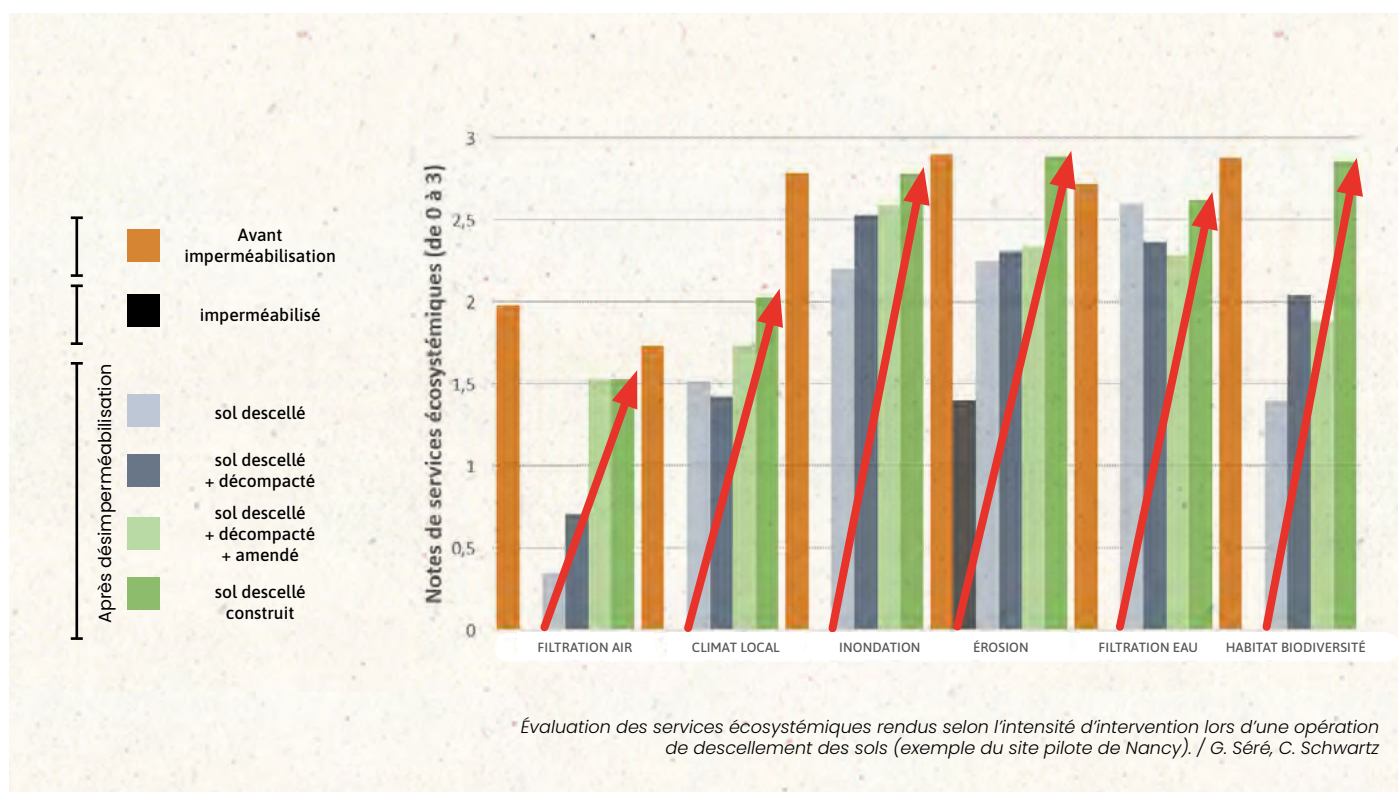
En conclusion, sur l'ensemble des essais conduits, toutes situations pédoclimatiques confondues, le meilleur compromis reste la formulation d'un mélange des granulats en place avec $\frac{1}{3}$ de compost de déchets verts, qui s'affranchit alors de tout apport de terre végétale exogène, y compris dans une logique d'économie circulaire.

GAIN DE FONCTIONS ET DE SERVICES RENDUS PAR LES SOLS APRÈS DESCCELLEMENT

→ Les sols issus des différentes modalités de refonctionnalisation après descellement ont été évalués à l'aide de l'outil d'aide à la décision Destisol, permettant d'affecter des scores de services écosystémiques rendus par les sols et leurs couvertures (notes de 0 à 3). De manière attendue, les scores après descellement sont significativement supérieurs à ceux des sols scellés.

Quel que soit le pilote de terrain et sa situation géographique, les résultats pour les modalités contrastées de descellement montrent des tendances similaires d'évolution. Le potentiel des sols à rendre des services écosystémiques suit l'intensité croissante d'intervention du génie pédologique. Ces scores tendent à retrouver, voire à dépasser ponctuellement, les valeurs du sol en place avant scellement, quels que soient les services écosystémiques concernés.





ÉVOLUTION DES SOLS DANS LE TEMPS

→ L'évaluation de la faisabilité et de la réussite d'une opération de descelllement des sols urbains se fait souvent à la lueur de diagnostics ponctuels, ciblés dans le temps. Or, une fois reconstitués ou construits, les sols suivent une évolution dépendante de l'influence de facteurs naturels (climat, situation topographique, activité biologique) et anthropiques (usages, modes de gestion) qui orientent les processus pédogénétiques (e.g., agrégation, évolution de la matière organique). Si les observations réalisées sur les essais de terrain mettent en évidence une présence croissante de la faune du sol et des évolutions positives en termes de croissance des végétaux, les résultats ne reflètent cependant ces évolutions que sur une période de deux années

consécutives. La poursuite à moyen et long-terme du suivi des sites pilotes s'impose alors afin d'acquérir des données supplémentaires et d'asseoir ces conclusions.

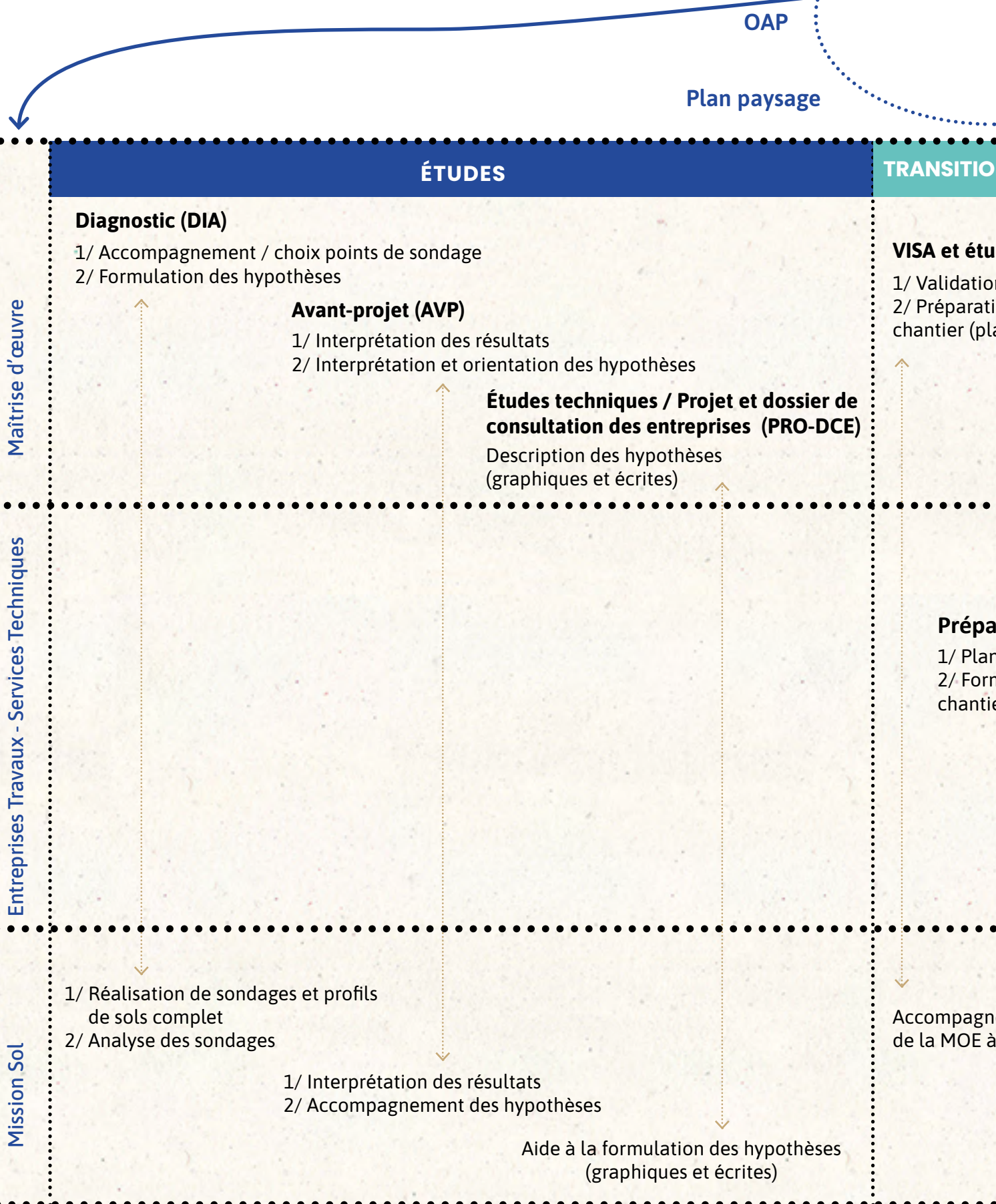
L'évolution des systèmes sol-eau-plante, dans le cadre d'un descelllement suivi d'une intervention minimaliste en termes de génie pédologique, suggère également qu'il faudrait, dans certains cas où un résultat immédiat n'est pas attendu, laisser le temps faire son œuvre. Ces écosystèmes pourraient en effet évoluer en mobilisant essentiellement l'énergie solaire, évitant ainsi la mise en œuvre de procédés coûteux en énergie et en ressources. Le descelllement des sols consiste également à renforcer la trame brune de villes écologiquement fragmentées. L'installation d'un cercle vertueux de refonctionnalisation écologique, de proche en proche, est donc imaginable.

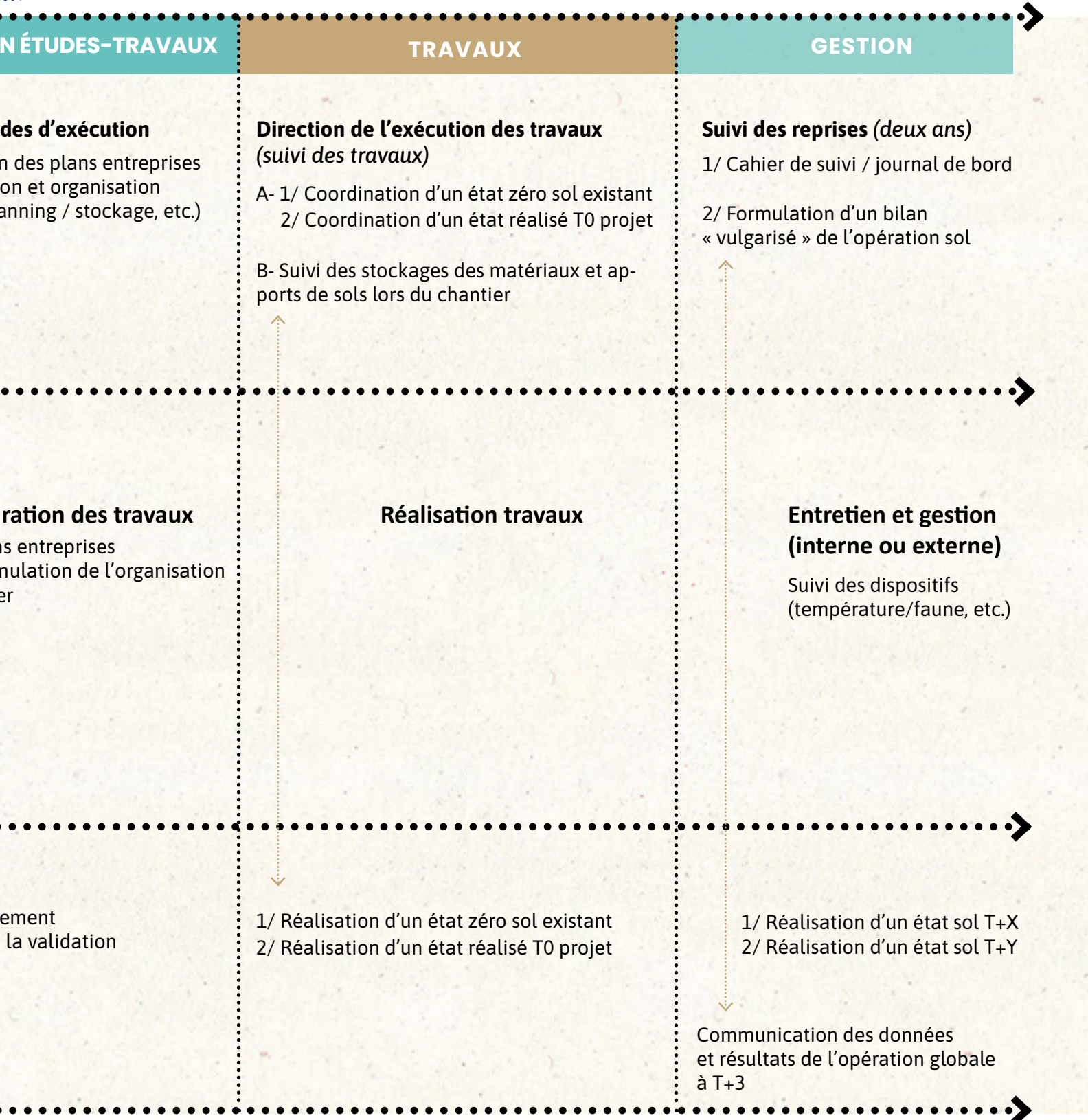
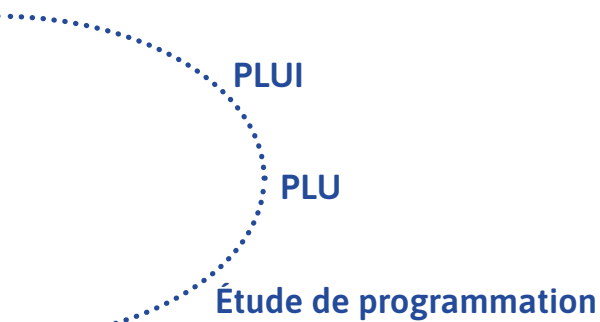


Comment
desceller ?

Comprendre les étapes d'un projet

////////////////////////////////////





→ Le présent guide centre son propos sur une méthode de conception plutôt destinée aux MOE, située à l'interface entre recherche et action. Celle-ci envisage l'intégration concrète du sol à chaque étape du projet de désimperméabilisation. Ainsi, les différents outils permettant d'aborder la question sol sont définis dans cette troisième partie, de l'échelle territoriale à l'échelle pré-opérationnelle. La question de descellement doit être abordée pour donner les jalons incontournables qui doivent être développés à l'échelle de l'aménagement local.

Dans un projet d'aménagement, la partie études correspond aux étapes de conception du projet réalisé par la MOE. Les phases DIA, AVP, PRO, communes à toute démarche, seront ici détaillées spécifiquement pour une opération de descellement.

Celui-ci doit être abordé avec un bureau d'études (BE) spécialisé « sol ». Ce bureau prend en charge les analyses afin de définir et d'orienter les possibilités de descellement, d'amélioration ou de recyclage des sols.

Dans cette partie sont décrits :

- les actions du BE de MOE ;
- les interactions d'un BE sol avec l'opération d'aménagement.

La MOE permet de piloter un projet d'aménagement à toutes les étapes, des études aux travaux. La phase études consiste principalement à :

- étudier la faisabilité d'un projet ;
- en déterminer les spécificités et l'adapter aux contraintes techniques et économiques ;
- en estimer le coût et établir un calendrier prévisionnel ;
- rédiger le DCE.

Ces étapes phares des études de MOE permettent de créer une méthode de descellement qui est ensuite confiée à une société pour réaliser les travaux. Le choix des entreprises fait partie de la phase études et conception du projet, mais ressortira comme une étape à part entière dans ce

guide, puisqu'elle est essentielle à mettre en avant. La partie « réaliser les travaux » définit quant à elle les différents outils qui permettent d'intégrer la question du sol dans les temps de travaux, toujours du point de vue de la MOE. La question du descellement doit se prolonger sur le terrain entre le bureau de MOE et le BE sol dans l'accompagnement des travaux, avec une présence régulière du BE aux phases clés des interventions sur les sols et dans les rédactions de comptes-rendus, qui permettent de suivre précisément les états d'avancement de l'entreprise sur les questions liées aux sols.

Un dialogue doit également s'établir avec l'entreprise tout au long du chantier. Les contraintes techniques sont suivies avec :

- l'élaboration d'un nouvel état zéro avant travaux en prenant en compte un certain nombre d'éléments en vue d'un suivi dans le temps de l'opération ;
- la gestion du planning chantier et des stocks / des mouvements de matériaux sur le site pendant les travaux ;
- l'élaboration d'un suivi et d'un état réalisé après travaux.

Enfin, la partie « gérer les sols » descellés définit les différents outils qui permettent d'intégrer la question du sol dans les temps de gestion de la MOE puis des services gestionnaires. En effet, après avoir levé l'ensemble des réserves potentielles et constaté les reprises de l'ensemble des végétaux de l'aménagement réalisé, la mission du maître d'œuvre s'achève et la gestion est confiée à la MOA. Elle peut la réaliser en interne ou faire appel à un prestataire. C'est pourquoi il est primordial de prévoir un passage de relais des informations aux futures équipes gestionnaires. Ainsi, il est important de prévoir :

- un carnet d'entretien précis des espaces plantés ;
- un suivi régulier des services rendus par l'aménagement.

La description de ces différentes étapes va maintenant être approfondie.



Sondage Plante & Cité : les coûts des opérations

En général, 10 % du coût total d'une opération correspond à la phase études et hypothèses (esquisse) et 90 % à la phase de travaux en elle-même. Le coût global a été renseigné par 42 répondants : 12 indiquent un coût inférieur à 100 €/m², 16 un coût entre 100 et 300 €/m² et 14 un coût supérieur à 300 €/m². Il faut noter qu'il n'y a pas de relation statistique entre le coût de l'opération et le type de paysage urbain réaménagé. En effet, pour les opérations sur des infrastructures routières, le prix est compris entre 30 et 300 €/m².

Le financement des opérations provient d'au moins deux sources différentes pour 31 opérations. Les financeurs sont principalement des collectivités territoriales (métropoles, villes, régions, départements) et exceptionnellement l'UE. 26 opérations ont été financées par les agences de l'eau, l'ADEME ou d'autres structures publiques.

Concevoir et étudier le projet

////////////////////////////////////

DIAGNOSTIC (DIA)

→ Le DIA permet d'étudier l'état existant du terrain et de formuler les premières hypothèses de travail.

DRESSER UN ÉTAT DES LIEUX

Lors de cette phase, un état des lieux approfondi de l'ensemble des matériaux en place permet de créer un état zéro. C'est à partir de celui-ci, du contexte et des éléments potentiellement disponibles que des pistes et des objectifs de descellement sont imaginés. Cet état zéro permet un suivi durant l'opération. Les pistes peuvent être présentées sous forme de scénarios en fin de phase. Avant cet état des lieux, il est difficile de savoir ce qui est possible ou non, et donc de fixer un objectif précis. C'est par exemple à ce stade que sont dressés les diagnostics nécessaires pour caractériser finement chaque matériau et identifier les éventuels polluants, au moment de l'inventaire.

Lors de l'état des lieux, le maître d'œuvre indique au BE sol un choix de points de sondage à réaliser en fonction de l'état existant. C'est à cette étape que les grandes tendances des sols doivent être élaborées (revêtements de surface et de première profondeur) afin d'obtenir une vision aussi complète que possible du terrain étudié. Il est donc recommandé de faire des sondages épars sur les éléments les plus caractéristiques, par typologie. Par exemple, sonder deux points opposés d'une zone de stationnement permet de s'assurer de la tendance moyenne sur l'ensemble de l'espace. Les sondages sont réalisés par carottage, sur une

profondeur moyenne de 50 cm sous le revêtement, afin d'avoir une vision des sols de surface. Ils sont ensuite envoyés dans un laboratoire d'analyses. Un délai minimum de cinq semaines est alors nécessaire pour établir l'état des lieux.

TRANSMISSION DES DEMANDES D'ANALYSES DU BE SOL AU LABORATOIRE

Les demandes d'analyses du BE sol doivent être précises afin que le laboratoire les réalise.

Trois grandes familles de DIA sont essentielles :

- le DIA géotechnique permet d'évaluer le potentiel de recyclage hors site des matériaux retrouvés vers d'autres chantiers de construction ;
- le DIA agro-pédologique permet d'évaluer le potentiel de recyclage des matériaux *in situ* ;
- le DIA pollution permet d'évaluer les risques sanitaires et environnementaux.

La nécessité de réaliser des sondages à des profondeurs différentes en fonction de l'épaisseur des matériaux à excaver doit être intégrée à la demande. Les sondages peuvent atteindre jusqu'à 7 ou 10 m de profondeur. Il faut également orienter les grandes pistes de descellement des sols.

Une fois les analyses effectuées, les scénarios et objectifs de réemploi sont esquissés à partir de l'état des lieux et des retours de diagnostics. La présence ou non de polluants et la nature des



Le projet européen Regreen (2022)

////////////////////////////////////

Le programme Regreen propose d'identifier, à l'échelle de la Région Île de France, les zones à renaturer ou déminéraliser en priorité, en identifiant et cartographiant trois enjeux : reconquête de la biodiversité ; adaptation au changement climatique ; amélioration de la santé et du cadre de vie. Pour favoriser la biodiversité, il est proposé d'augmenter le pourcentage de zones végétalisées, en mettant l'accent sur les milieux rares.

Dans d'autres projets comme CoolSchools (<https://coolschools.eu/>), l'augmentation de la connectivité écologique est également analysée, afin de quantifier le potentiel de nouveaux espaces végétalisés dans les cours d'écoles comme éléments de la trame verte.

Pour l'amélioration du cadre de vie et l'atténuation de l'effet ICU, le projet Regreen propose d'identifier

les zones où la vulnérabilité des populations est la plus importante, en fonction de son exposition face à l'aléa climatique (température élevée essentiellement), de sa sensibilité (par exemple par l'âge), ainsi que de sa capacité à y faire face (comme la présence d'îlots de fraîcheur à proximité du lieu de résidence).

Des données démographiques peuvent ainsi être mobilisées, afin d'identifier les quartiers susceptibles de regrouper des populations plus vulnérables, ainsi que des modèles climatiques adaptés aux simulations en milieu urbain, afin de cartographier les zones urbaines les plus soumises à l'ICU.

Pour en savoir plus : <https://www.arb-idf.fr/ou-renaturer-en-ile-de-france/>

sols sous le revêtement de surface influencent le choix du maître d'œuvre. En fonction des usages et du programme, c'est à ce stade que se fait le choix du pourcentage de surfaces de sols perméables et de sols imperméables.

Pour rappel, si le revêtement de surface n'est pas pollué, il est possible de :

- réemployer une partie ou la totalité du revêtement de sol en l'utilisant en sous-couche, en matériau de surface ;
- exporter le matériau de surface et conserver le sol en place, sous le revêtement ;

- exporter la totalité du revêtement des sols et des structures pour amener un nouveau sol.

En fonction de l'hypothèse retenue et du degré d'ambition de réemploi, le maître d'œuvre, accompagné du BE sol, interroge le laboratoire d'analyses pour avoir des prescriptions d'amélioration des revêtements et des sols, en tenant compte de la fonction du nouvel espace. Si celui-ci devient planté, il convient de réaliser - *a minima* - un amendement de matière organique du sol existant avant plantation. Si l'espace doit rester praticable pour les piétons ou les véhicules, les revêtements et sols doivent être pensés pour être fixés tout en minimisant l'impact sur la perméabilité du sol descellé.

→ SONDAGES

- vision globale du terrain étudié
 - profondeur moyenne 50 cm
 - sondages éparés par typologies sols du site
- Mandataire : maître d'œuvre
Réalisateur : BE sol



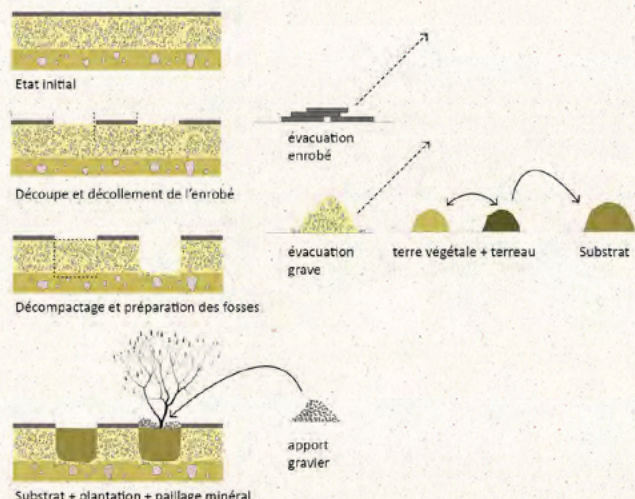
→ ANALYSE LABORATOIRE

- indiquer les demandes du BE sol au laboratoire en termes d'analyses
- Mandataire : BE sol
Réalisateur : laboratoire d'analyses



→ SCÉNARIOS

- En fonction :
- des analyses (polluants, nature des sols)
 - des usages et du programme
 - des objectifs de réemploi des matériaux
- Mandataire : BE sol
Réalisateur : laboratoire d'analyses



ASPHALT JUNGLE, WAGON LANDSCAPING, PARIS, 2022



1



2



3



4



5



6

→ **Asphalte Jungle** est un projet de **désimperméabilisation** et de fertilisation par recyclage *in situ* des sols artificiels de la ville. Développé dans le cadre de l'accélérateur de projets FAIRE, le projet a été installé dans une cour minérale d'un immeuble du 11^e arrondissement de Paris (1). Le processus a consisté à découper de l'enrobé en suivant la forme du jardin, ici un espace de 18 m², ainsi qu'à réaliser des travaux de décompactage des sous-couches (2, 3). Aucun matériau de la cour n'a été exporté. Le substrat fertile a été créé en triant les matériaux présents et en les remélangeant pour recréer un « néo-sol », aussi appelé « Technosol construit » (4), composé de différents horizons recréés, supports des plantations (5, 6).

Superficie : 200 m² / Coût : 10 000 €

AVANT-PROJET (AVP)

→ L'AVP a principalement pour objet de préciser la composition générale, ainsi que les grandes orientations techniques de l'opération. Une fois les objectifs fixés en phase DIA, l'AVP permet d'affiner les scénarios en fonction des résultats des analyses établies. Le maître d'œuvre échange avec le BE sol pour formuler et affiner les hypothèses de travail et de réemploi possibles.

AFFINER L'ÉTAT DES LIEUX

De nouveau, le maître d'œuvre indique au bureau sol un choix de points de sondage à réaliser en fonction du premier état existant et des scénarios qu'il a établis précédemment. Les grandes tendances des sols préalablement analysées sont utiles pour adapter l'aménagement qui se dessine. Les sondages épars laissent place aux sondages plus précis et systématiques sur les espaces identifiés comme potentiellement modifiables. On peut par exemple revenir sur le sondage de la zone de stationnement afin de s'assurer que la tendance se confirme sur la totalité de l'espace concerné. Ils sont de nouveau envoyés au laboratoire d'analyses pour conforter l'état des lieux. Le délai minimum reste de cinq semaines.

AFFINER LES PISTES DE DESCCELLEMENT

Une fois les analyses effectuées, il est possible de travailler sur des pistes solides de descellement et de réemploi. Le projet est alors décrit dans le mémoire synthétique de la phase AVP. Le BE sol accompagne le maître d'œuvre dans la description du processus à suivre, dans ses grandes lignes.

C'est également lui qui interprète les analyses du laboratoire. Suivant la vocation et la fonction du sol souhaité, différentes mesures peuvent être préconisées, comme vu précédemment avec la plantation de végétaux qui nécessite l'ajout de matières organiques par exemple, tout en gardant le caractère drainant du sol. Il faut ensuite utiliser des essences de végétaux appropriées à la nature du sol créé.

Dès l'AVP, les scénarios de réemploi sont décrits, validés avec la MOA et avec les éventuels partenaires du projet (plateforme de réemploi par exemple).

INVITER LES SERVICES GESTIONNAIRES

Le sujet des sols et de l'entretien des espaces plantés sur des sols descellés est récent. Les services gestionnaires ne sont pas forcément familiers de la démarche et des modes d'entretien à prévoir, des mesures régulières à prendre. Aussi, il est important de les convier aux réunions techniques et aux comités techniques dès le démarrage de l'opération et déjà dans la conception. C'est aussi l'occasion pour le concepteur et le maître d'œuvre de vérifier si certains de leurs choix peuvent engendrer des difficultés de gestion.



À Montbazin, les cours d'école sont désimperméabilisées et végétalisées, une mare a été aménagée. / G. Lecuir



Sondage Plante & Cité : Les caractéristiques des sols avant et après descellement

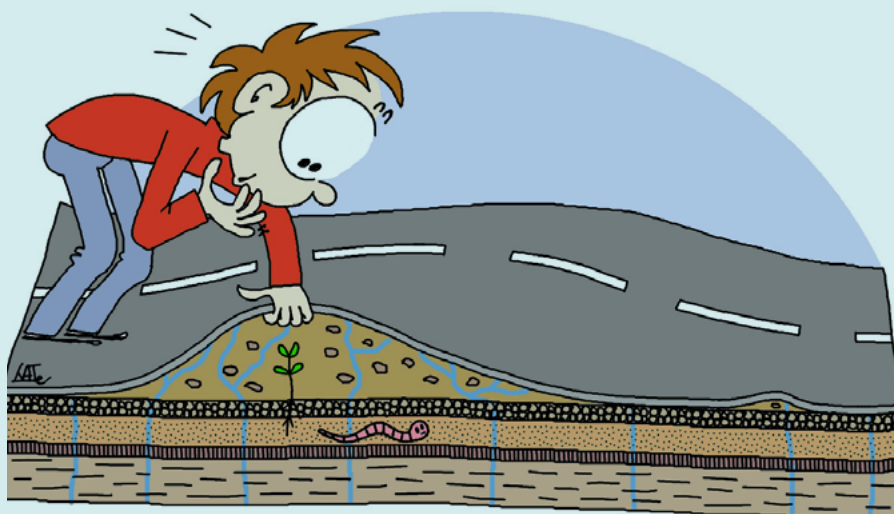
Les informations techniques sur les sols et les matériaux de revêtement ont souvent été moins bien renseignées que le reste par les répondants, puisqu'ils n'étaient pas ceux qui avaient supervisé les projets. Cependant, les résultats donnent une tendance sur les types de revêtements de surface éliminés : du béton bitumineux (43 opérations), du sol stabilisé (10 opérations), du béton (11 opérations), des pavés (six opérations) et de la résine (quatre opérations). Le mode de gestion après descellement montre que les matériaux sont réutilisés sur le site pour construire un nouveau profil de sol (13 opérations), transportés dans une décharge ultime (12 réponses) ou recyclés dans une usine de traitement (12 réponses).

Les couches géotechniques sous les couvertures imperméables correspondent aux structures des assises routières (du haut vers le bas : base, fondation), et à la couche de forme sous les assises pour renforcer la capacité portante du sol. La composition des assises est très variable et dépend des matériaux disponibles localement. Le liant hydrocarboné est présent dans la couche de base dans 13 opérations et dans les couches de fondation seulement pour deux opérations. La GNT est très courante dans les assises et dans la couche de forme (15 et 10 opérations, respectivement) parce qu'elle est moins chère. Une couche de base en grave-ciment – un matériau plus cher que les deux précédents – est utilisée dans cinq opérations. Les assises de chaussée ont été réutilisées sur le site dans 15 opérations, mises en décharge ultime pour deux opérations et éliminées en vue d'être recyclées pour 10 opérations.

Les procédés du génie pédologique mobilisés après descellement dépendent des usages prévus. Pour les parcs ou les accompagnements de bâtiments (U1, U2, U3, U4, voir tableau p. 60), le sol reconstitué ou construit doit comprendre un horizon de croissance

de 30 à 40 cm pour assurer les fonctions du sol fertile. Pour les arbres d'alignement (U6, U7, voir tableau p. 60), il est nécessaire de réaliser une couche structurante terre-pierre de plus d'1 m de profondeur, résistante aux contraintes mécaniques liées à la circulation. Pour construire des sols fertiles, 47 opérations ont reproduit des couches de croissance et des couches structurantes avec de la terre végétale (0-30 cm de profondeur) collectée sur un autre site ou prélevée sur une parcelle agricole. Cette terre est généralement mélangée à du compost ou à un substrat organique (15 opérations) ou utilisée seule (quatre opérations). Un mélange terre-pierre rapporté d'une plate-forme hors site a été fourni pour 11 opérations. Pour 15 opérations, il a été mélangé sur le site en réutilisant les agrégats présents localement, mélangés à de la terre végétale et à des matières organiques. Seules quatre opérations ont réutilisé les granulats du site seuls ou les ont mélangés à du compost. Un paillage organique a été utilisé dans neuf opérations. Aucun suivi géotechnique ni aucune caractérisation agronomique n'ont été effectués après les opérations de descellement.

Lorsque les sols descellés ont été végétalisés (dans 45 opérations), une couverture herbacée a généralement été semée (40 opérations), souvent associée à une strate arbustive et à une strate arborescente (32 et 27 réponses, respectivement). Dans la plupart des cas, la végétation a été installée pour éviter de laisser le sol à nu. Lors de ces aménagements, les critères retenus pour le choix du type de végétation ont été divers : l'adaptation aux caractéristiques du nouveau sol, l'attrait paysager (par exemple, en termes de floraison, de couleurs, de feuillage), l'adaptation au changement climatique (résistance au stress hydrique) et la minimisation des coûts.



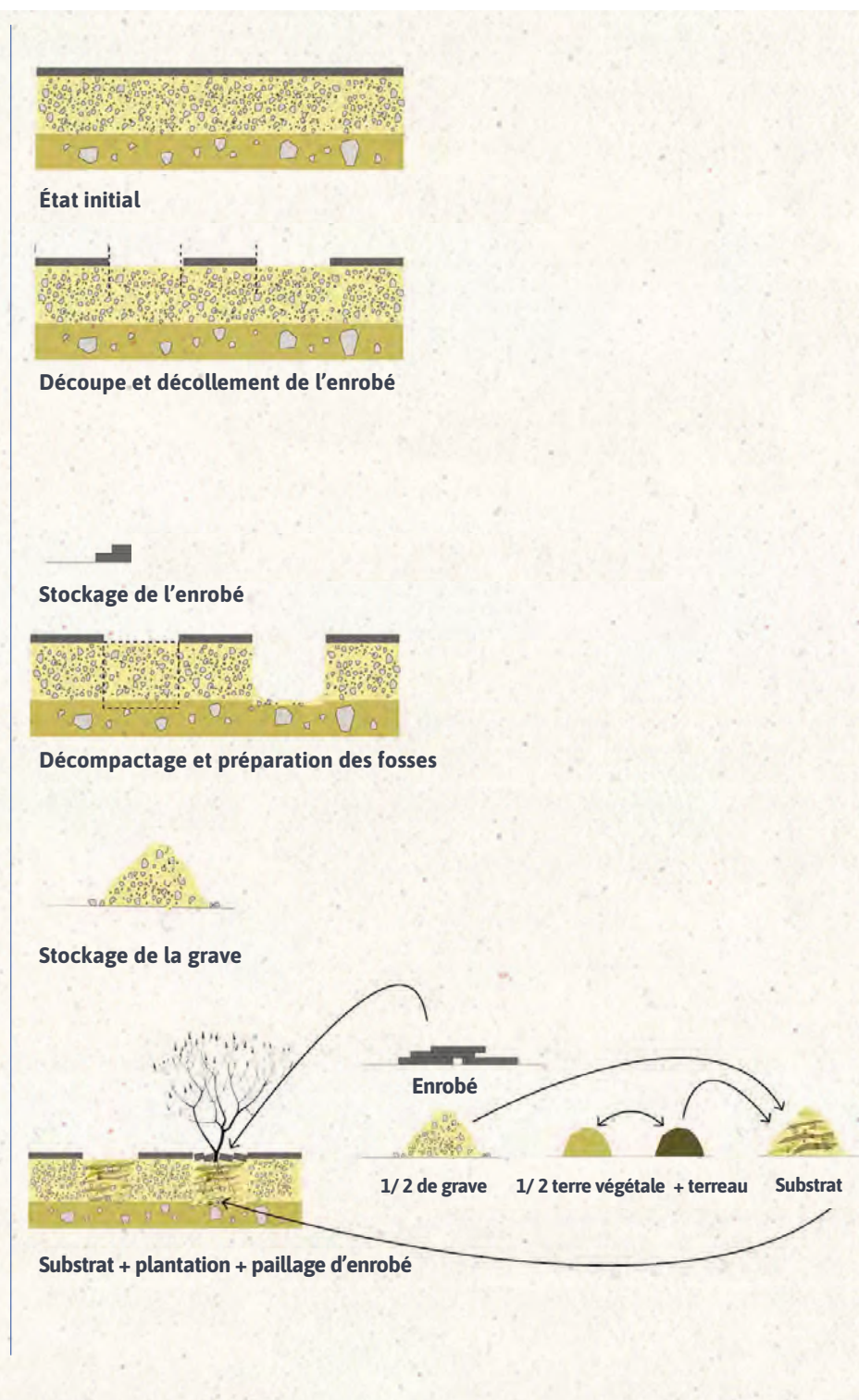
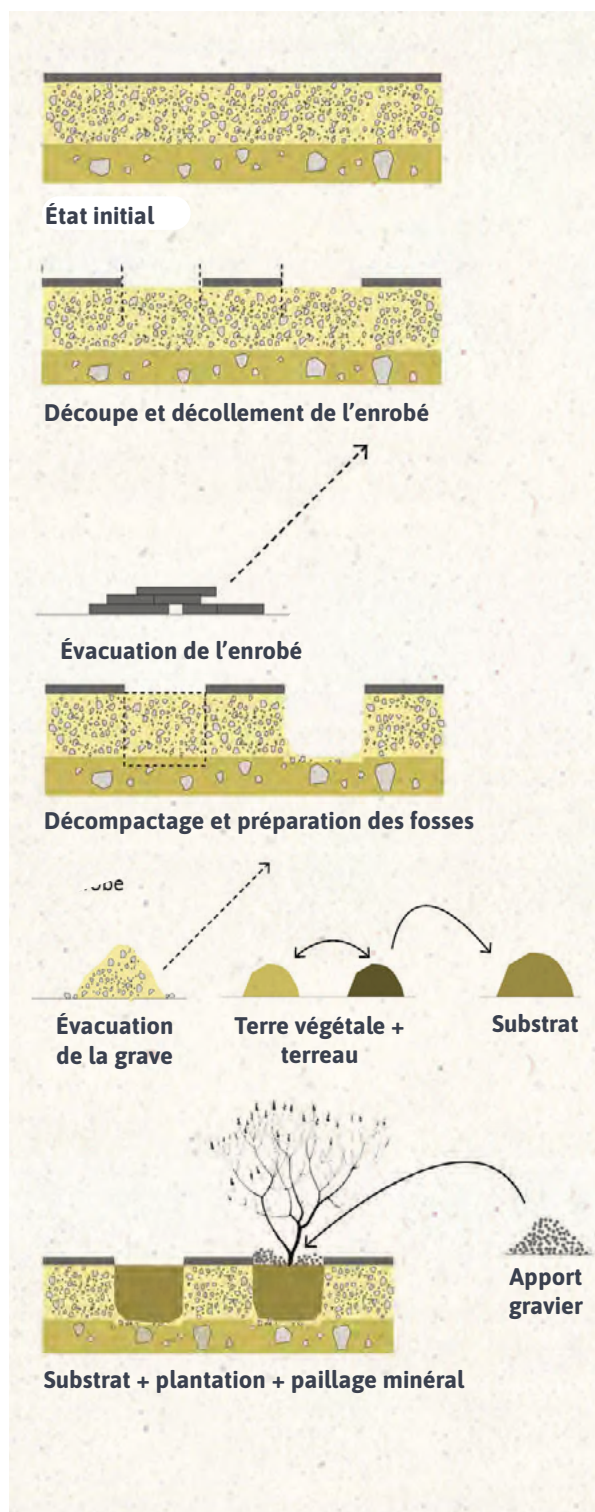
RAPPEL DES TROIS HYPOTHÈSES DE DESCELLEMENT

HYPOTHÈSE 1 : SOL EXPORTÉ ET APPORT D'UN SUBSTRAT

Une partie du sol imperméabilisé est enlevée. Les matériaux sont éliminés en dehors du site de travail. Un mélange de terre végétale et de terreau est apporté pour constituer le nouvel horizon du sol. Enfin, la plantation a lieu et du gravier est apporté pour former une couche de paillage.

HYPOTHÈSE 2 : SOL AMENDÉ SANS DRAINAGE EN FOND DE FOSSE

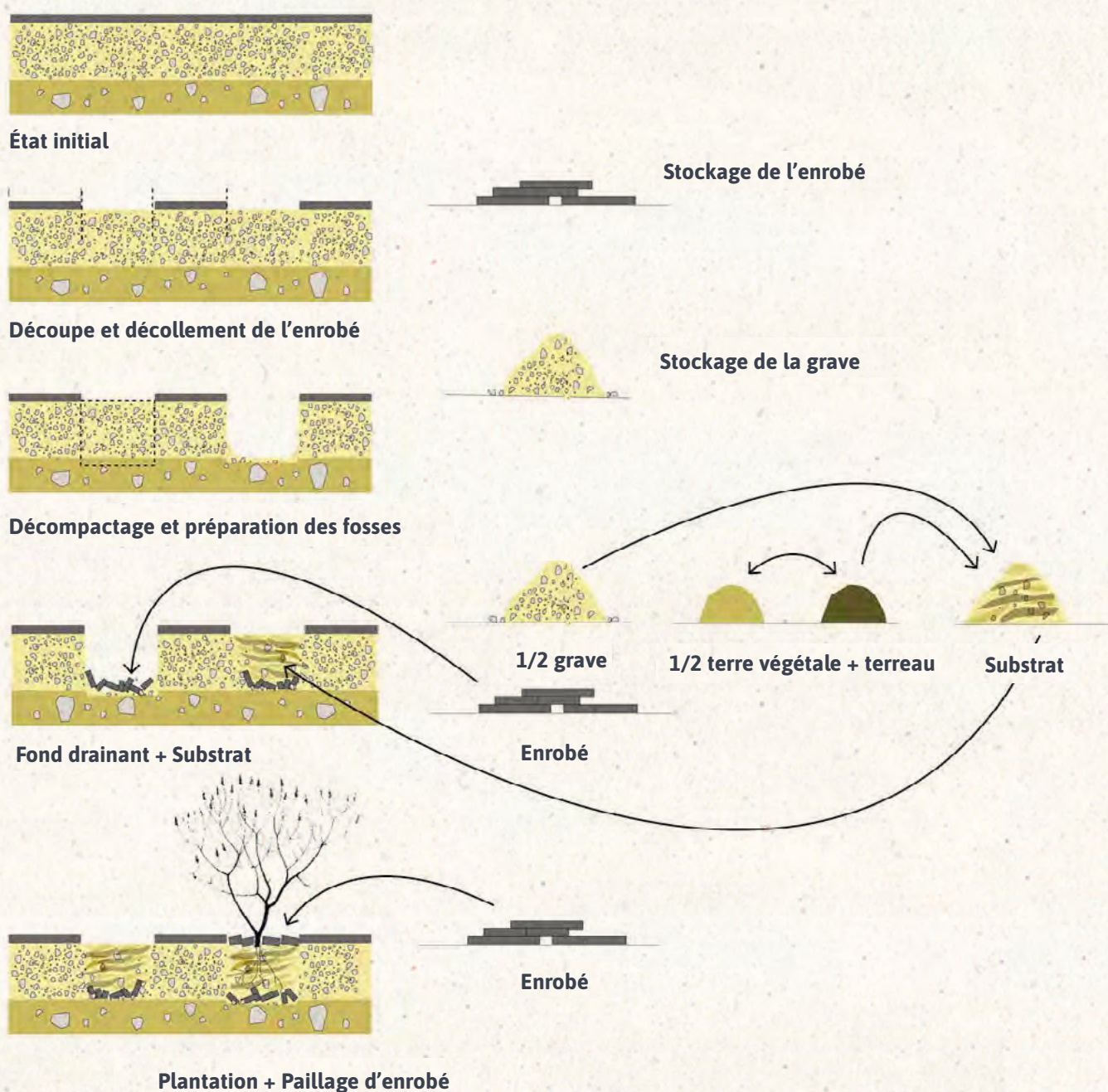
L'action consiste de nouveau à enlever l'enrobé et le substrat d'une partie du sol scellé. Les matériaux sont déposés dans une partie appropriée du chantier. La moitié de la couche de fondation est réutilisée comme nouvel horizon de sol descellé avec un mélange de terre végétale et de terreau. Enfin, la plantation a lieu et l'enrobé est utilisé comme paillis.



HYPOTHÈSE 3 : SOL AMENDÉ ET DRAINAGE EN FOND DE FOSSE

L'enrobé et le substrat d'une partie du sol sont enlevés. Les matériaux sont déposés dans une partie appropriée du chantier. Des fragments d'enrobé brisé sont placés au fond de la fosse comme drainage. Le sous-sol est enlevé pour être décompacté.

La moitié de la couche de fondation est réutilisée comme nouvel horizon de sol descellé avec un mélange de terre végétale et de terreau. Enfin, la plantation a lieu et l'autre partie d'enrobé est utilisée comme paillis.



FLASHCODE GARDEN, WAGON LANDSCAPING, COURTRAI, 2014



1



2



3



4



5



6

→ **Wagon Landscaping et Studio Basta** ont été chargés d'imaginer une transformation économe d'un vaste parking (1) en jardin-parvis du musée.

Les principes du jardin reposent sur la confrontation de matériaux bruts déjà présents comme l'asphalte ou le gravier (2) et une puissante plantation pour une transformation radicale du lieu (3). Fondé sur le principe de recyclage maximum des éléments du site et de sa fertilisation, le projet a été mis en œuvre sur un temps très court (cinq mois études et réalisation) avec l'aide des habitants (4). Le plan du jardin est accessible par le flashcode du musée (5, 6).

Superficie : 2 000 m² / Coût : 80 000 €

Choisir les entreprises

////////////////////////////////////

PROJET ET DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES (PRO-DCE)

→ Les études de PRO définissent la conception générale des ouvrages à réaliser. Le maître d'œuvre décrit sous forme de pièces graphiques et de pièces écrites les hypothèses avancées dans la phase AVP. Ces documents constituent le DCE qui définit les missions travaux qui sont confiées aux entreprises, par lot. La phase PRO-DCE leur sert d'appui pour construire leur offre travaux et pour s'engager dans une méthodologie d'aménagement qu'elles doivent respecter. En cas de séparation de lots, il est indispensable de confier la partie sur les sols au lot « espaces verts » ou « espaces plantés/végétalisés ». En effet, la même entreprise doit gérer l'intégralité des sols, qu'ils soient fertiles ou non, afin qu'elle contrôle leur organisation de la dépose à l'aménagement.

Le BE sol accompagne le maître d'œuvre dans la formulation des pièces écrites. Ils reprennent et développent la notice technique des phases AVP afin de décrire finement les étapes à ne pas manquer dans le descellement. En fonction de l'ambition choisie, la description est plus ou moins complexe.

Si le scénario de l'exportation est choisi, alors, il est primordial de décrire une dépose des matériaux dans les règles de l'art et une exportation en décharge (décharge spécialisée si présence de polluants).

Si au contraire le scénario de réemploi (partiel ou total) est choisi, alors, il faut décrire les étapes de dépose, de stockage et de repose du matériau. La suite du guide s'attarde sur cette deuxième hypothèse.

Dans le cas du réemploi, la principale contrainte à anticiper est le stockage des matériaux. De fait, il convient de formaliser un plan à cet effet dans les pièces graphiques, et ce, pendant toute la phase de chantier. La zone de stockage peut être amenée à changer de place en fonction de l'opération. Il faut y être vigilant et prévoir une bonne gestion des interfaces avec les autres lots travaux. Le dessin des espaces concernés par le réemploi est également attendu. Par exemple, si des plaques d'enrobé sont utilisées en paillage de massifs plantés, cela doit être dessiné dans le carnet de détails.

Les pièces écrites, avec le cahier des clauses techniques particulières (CCTP), permettent de décrire les actions qui doivent être réalisées. Elles accompagnent les pièces graphiques dans le DCE. C'est dans le CCTP qu'il est nécessaire de bien décrire la dépose, le stockage et la repose des matériaux à réemployer. Il faut également demander à l'entreprise de faire analyser les échantillons déposés pour bien s'assurer, malgré les analyses en phase études, de la bonne qualité du matériau de revêtement et de l'absence de polluants. Cette analyse lui permet de s'engager dans de bonnes conditions et de prendre la responsabilité du matériau qu'elle a à manipuler. Ces analyses doivent ensuite être vérifiées par le maître d'œuvre.



Paillage minéral en enrobé recyclé : exemple d'un extrait de CCTP

////////////////////////////////////

Sur toutes les parties indiquées aux plans de plantation et de paillage annexés au présent CCTP, il sera utilisé un paillage minéral, de type « plaques d'enrobé recyclé du site ».

Ce poste comprend :

- le décroulage de l'enrobé, sous la forme de plaques de tailles variables entre 20 et 50 cm², avec une mini-pelle. Cette étape nécessite de prévoir l'interface avec les autres lots ; ce poste nécessite une coordination avec le lot en charge de la dépose des revêtements existants. L'entreprise Espaces Verts se coordonne et prévoit un espace de stockage des plaques sur le site, pendant toute la durée du chantier, jusqu'au moment des plantations ;

- le stockage sur site des plaques supérieures à 20 cm², l'évacuation des plaques inférieures à 20 cm² et matériaux de granulométries fines issus du décroulage ;

- avant la réalisation des plantations, la disposition et l'agencement des plaques d'enrobé, à champ en bordure de massif, puis le régallage de la terre de surface ;

- une fois les plantations réalisées, la disposition et l'agencement des plaques d'enrobé, à plat dans les massifs, pour pailler les espaces de terre à nu, entre les pieds d'arbustes et de vivaces (comme présenté sur les fiches techniques annexées au CCTP et dans les principes techniques du carnet de détails).

TRANSITION ÉTUDES-TRAVAUX

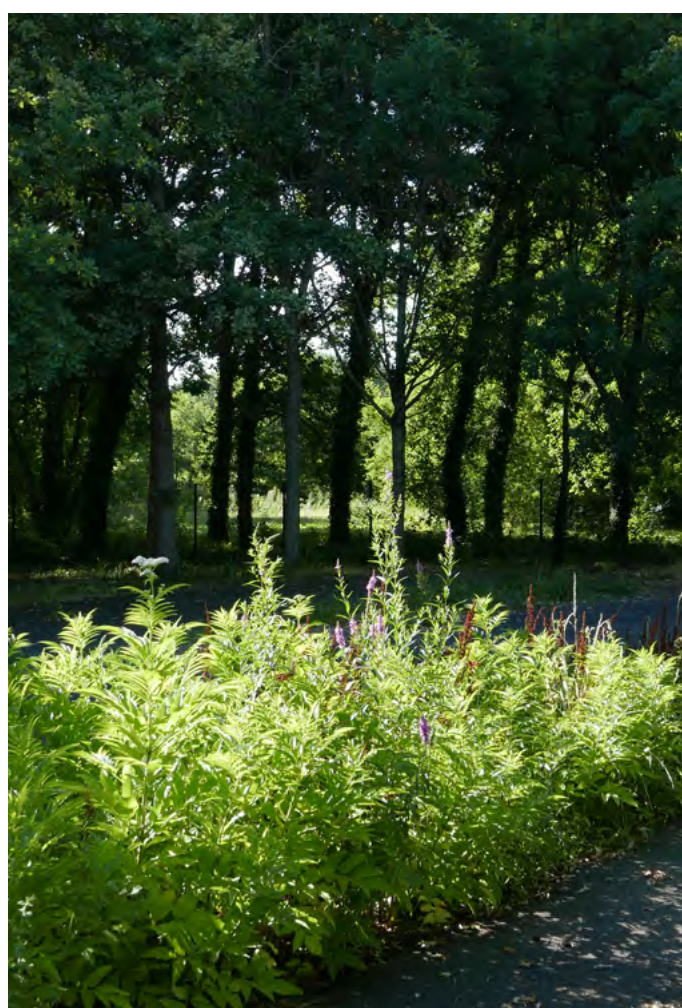
→ Cette partie définit les différents outils qui permettent d'intégrer la question du sol et de sa transformation dans l'Assistance pour la passation des contrats de travaux (ACT). L'ACT est un temps d'interface entre les phases d'études et les phases de travaux de la MOE. C'est également à ce moment que de nouveaux intervenants (entreprises ou services techniques) réalisent la partie chantier du projet d'aménagement.

À ce stade, la question du descellement doit être renforcée entre le bureau de MOE et le BE sol. Le choix de l'entreprise et les contraintes techniques à suivre sont anticipés dès cette phase de transition dans le choix de la méthodologie travaux et dans la définition des vigilances à anticiper lors de la phase travaux.

La partie transition études-travaux d'une opération de MOE consiste globalement à analyser les candidatures et à vérifier la compatibilité de faisabilité avec les éléments d'études.

La méthodologie de travail sur le sol choisie doit être intégrée à ce stade. Si la MOA a ses propres tableaux d'analyses, il convient de les récupérer dès le lancement des consultations, et de faire une demande explicite sur l'intégration d'une note technique sur le réemploi des sols. Si la MOA n'a pas ses propres tableaux d'analyses, le maître d'œuvre peut proposer sa propre grille.

Toujours en collaboration avec le BE sol, il est primordial d'accorder une importance, dans le barème de notation, à la méthodologie de descellement attendue par l'entreprise. On peut prendre en compte son expérience dans ce type de travaux (bien que cela comporte un risque étant donné que ce genre d'opération est relativement récent) et/ou évaluer la méthodologie proposée par l'entreprise pour le descellement des sols.



Le Parc Floral de Bordeaux possède des bandes descellées. Elles constituent le prolongement de la réserve naturelle en arrière-plan à gauche. L'entretien est minime et les bandes descellées accueillent la végétation spontanée. / F. Braggini

Réaliser les travaux

////////////////////



Travaux de désimpermeabilisation, Métropole du Grand Nancy. / C. Schwartz

RÉALISER UN ÉTAT ZÉRO PRÉ-TRAVAUX

→ En fonction des ambitions fixées et des attentes de la MOA, il est recommandé de demander à l'entreprise travaux de réaliser à son tour un état des lieux du site avant descellement. Cette fois, les températures au sol peuvent être mesurées, sur différents points du site imperméables et avec des outils simples, en tenant compte de la saison (idéalement à l'été). Il est également souhaitable de demander une mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol dans son état existant.

Une mesure de la biodiversité en place, plus contraignante, peut également être faite en disposant des pièges à insectes avant le démarrage du chantier. Elle peut être réalisée par un BE environnement. Ces mesures sont conservées et deviennent des données cruciales pour connaître les améliorations que le projet apporte.

NB : Cet état zéro doit être anticipé et figurer dans le CCTP afin que l'entreprise puisse prévoir de le chiffrer dans son estimation travaux.

DÉFINIR LE PLANNING ET LE STOCKAGE

→ Il est primordial de demander à l'entreprise un planning précis des travaux. Il doit être accompagné d'une spatialisation en plan du déroulement du chantier. S'il y a plusieurs entreprises sur le même site, une attention particulière doit être portée aux interfaces temporelles et spatiales entre les différentes zones d'intervention. Ainsi, un des points d'attention concerne le stockage des éléments issus de la démolition qui peuvent être



SITERRE et SITERRE II – Créer des sols fertiles : du déchet à la végétalisation urbaine

////////////////////////////////////

Les travaux post-descellement des sols intègrent en grande partie la mise en œuvre du génie pédologique via des opérations de construction de sols. Il est possible de se référer aux travaux menés dans le cadre des programmes de recherche SITERRE et SITERRE II, et notamment à l'ouvrage *Créer des sols fertiles : du déchet à la végétalisation urbaine*, publié aux Éditions du Moniteur en novembre 2016. Il est le fruit d'une réflexion pluridisciplinaire conduite par le collectif SITERRE, programme de recherche sur la construction de sols fertiles pour les aménagements d'espaces verts urbains soutenu

par l'ADEME. Il propose des techniques novatrices de construction de sols basées sur le recyclage de matériaux issus du bâtiment et des activités de la ville (ballasts, bétons concassés, terres de déblai, composts et autres matières organiques). Dans la continuité du programme SITERRE, le programme SITERRE II propose d'accélérer la mise en place et la structuration de cette filière de revalorisation. Ce projet va alors plus loin dans cette réflexion et fournit aux acteurs de cette filière un ensemble d'outils et de connaissances pour faciliter ces procédés de construction de sols.

réemployés directement dans la mise en œuvre, selon ce qui a été décidé en phase études. Les volumes retirés sont foisonnants et les emprises de stockage se doivent d'être anticipées, puis suivies tout au long du chantier.

Des plans techniques de stockage sont réalisés en phase études, confortés et contredits par les entreprises avant le chantier, puis utilisés ensuite. Un bilan est fait avec ces dernières pendant l'avancée du chantier et à la livraison. Ce dernier bilan permet d'avoir une vue d'ensemble de l'opération, des études et des objectifs réellement atteints et d'en rendre compte dans un rapport complet.

SUIVI ET ÉTAT RÉALISÉ

→ À ce stade, il est essentiel de procéder aux différents constats concernant la réalisation des aménagements et d'identifier les réserves potentielles, en suivant les documents officiels des marchés. En parallèle, la mesure des températures au sol doit être reprise régulièrement, ainsi que celle de l'infiltration de l'eau dans le sol sur différents points du site.

Le suivi de la biodiversité après aménagement peut également être réalisé, par exemple en disposant de nouveau des pièges à insectes. Il est important d'appliquer ces mesures sur les deux ans de garantie de reprises des végétaux et des levées de réserves du chantier.

NB : Ce suivi doit être anticipé et figurer dans le CCTP afin que l'entreprise puisse prévoir de le chiffrer dans son estimation travaux.



INVITER À NOUVEAU LES SERVICES GESTIONNAIRES

→ Intégrer les services gestionnaires lors des réunions de la phase études n'est pas suffisant. Il est fondamental de les convier lors des travaux, afin d'éviter qu'ils n'héritent d'un projet qu'ils ne savent pas ou ne peuvent pas gérer. Cela permet des échanges entre l'entreprise et les services gestionnaires.



Cas spécifique des friches dans le cadre d'un descellement urbain

Afin de réguler l'étalement urbain, les zones de friches (urbaines, industrielles) sont l'objet d'un intérêt grandissant dans le cadre du renouvellement de la ville sur la ville. Les travaux de descellement, la refunctionalisation de ces sols et la gestion ultérieure de tels sites doivent s'opérer tout en gardant à l'esprit :

- que des opérations de destruction de bâtiments sont souvent associées à des chantiers de descellement des sols, et que, dans ce cas, des règles sont à suivre même si elles ne sont pas détaillées dans ce guide ;
- qu'il existe des enjeux de (multi)pollutions des sols plus ou moins intenses, locales ou bien diffuses, qu'il faut considérer en suivant la démarche d'évaluation des sites préconisée par l'ADEME ;

• que la gestion des contaminations peut s'appuyer sur des procédés maintenant bien développés du génie écologique (pédologique et végétal) et du génie civil. La pollution des sols peut par exemple être gérée par des phytotechnologies (utilisation de végétaux et des organismes associés pour gérer les sols (multi)pollués en place afin de les stabiliser, d'en extraire des éléments métalliques ou encore d'accélérer la dégradation de molécules organiques dans une logique d'atténuation naturelle).

Voir la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués : <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr>

JARDIN DES JOYEUX, WAGON LANDSCAPING, AUBERVILLIERS (PARIS), 2016



1



2



3



4



5



6

→ **À l'entrée de la cité-jardin Maladrerie** (Aubervilliers), un ancien parking (1) a été démonté en 2015 pour empêcher tout accès aux véhicules motorisés. Dans l'attente d'un nouveau projet urbain, Wagon Landscaping a transformé ce chaos en un jardin de rocaïlle géant de 1 600 m² (2, 3, 4). Cela a permis la création d'une dynamique vivante sur un sol totalement artificialisé et imperméable, le parking étant posé sur une dalle. Aucune exportation de matériaux n'a été effectuée lors du chantier. Ce jardin ne comprend aucun arrosage automatique (5, 6).

Superficie : 2 000 m² / Coût : 30 000 €

Gérer les sols descellés

OUTILS ET PRATIQUES

→ Il est à ce stade primordial de confier un carnet d'entretien des espaces plantés aux gestionnaires, en indiquant clairement les actions de jardinage à effectuer. La compréhension des enjeux est normalement facilitée grâce à leur intégration dans les échanges techniques de l'aménagement dès les phases études. Une visite du chantier est aussi nécessaire, avec le carnet d'entretien et les services concernés, afin de bien s'assurer que chaque action de gestion est connue et adaptée aux ressources humaines et matérielles du service. Le cas échéant, des ajustements du carnet d'entretien peuvent être effectués pour le rendre exploitable.

Le suivi régulier des services rendus est d'autant plus important qu'une disparition d'informations et de suivi au-delà des deux ans, ou dès que le maître d'œuvre n'est plus impliqué, a été observée dans les expériences de descelllement de sols. En ce sens, il est recommandé de prévoir une série d'outils simples qui permettent de continuer à collecter des données et de suivre les bénéfices du projet dans le temps, à la fois avant, pendant et après la réalisation. Ils permettent de mesurer les services rendus. On trouve, entre autres, les éléments suivants :

- thermomètre portatif pour mesurer rapidement les températures en différents points de l'aménagement ;
- instrument de mesure de l'humidité et de la perméabilité du sol ;
- suivi de l'évolution de la végétation (apparition/disparition des espèces plantées ou spontanées, couverture végétale et indicateurs de stress des végétaux).

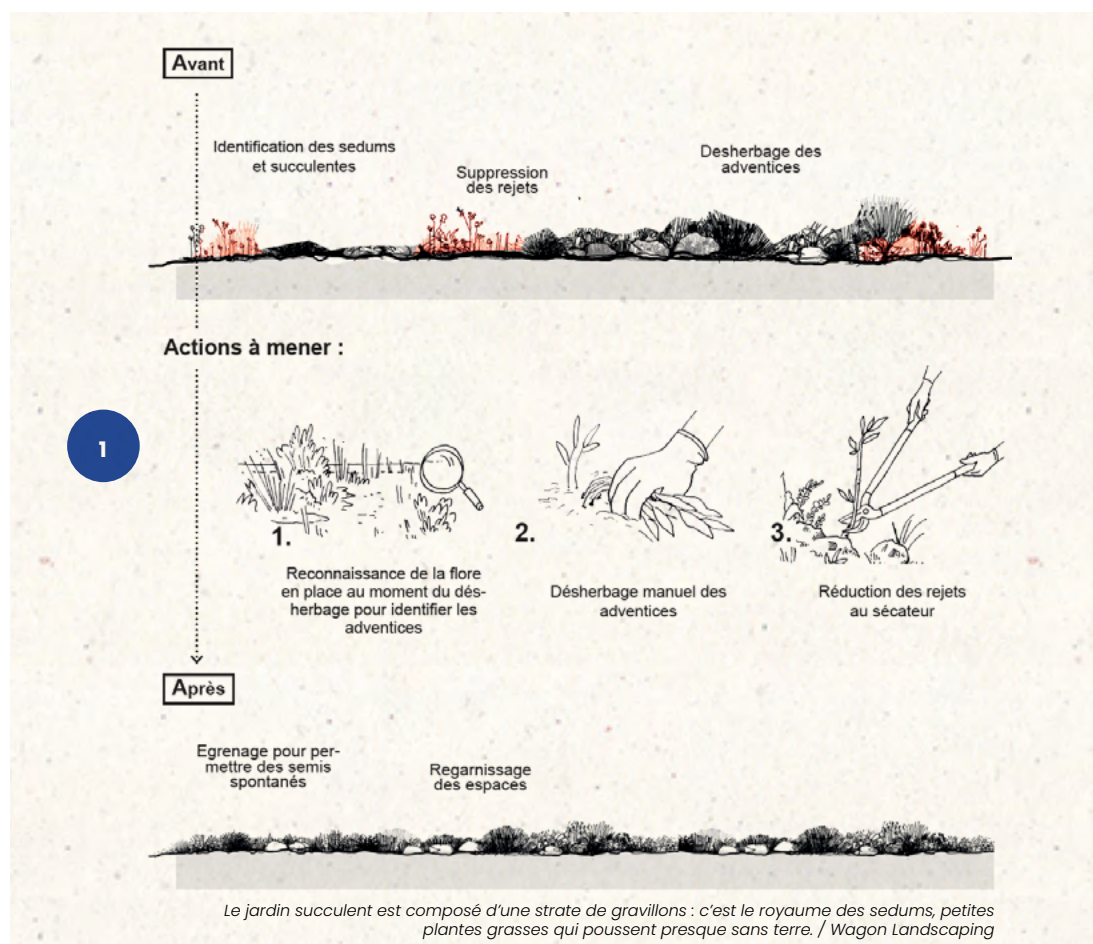
L'ensemble des données collectées doit être archivé et mis en lien avec celles établies en amont et pendant la réalisation des aménagements.

DIFFÉRENTS TYPES DE GESTION

→ Puisque chaque site est unique, leur gestion l'est également. Par exemple, le jardin succulent (1), le jardin rocaille (2) et le jardin lisière (3) sont trois types de jardins écologiques qui ne s'entretiennent pas de la même manière.



Moments d'entretien au Jardin des Joyeux.
/ Wagon Landscaping



Avant

Désherbage des adventices

Suppression des rejets

Couper les branches desséchées et inflorescences



Actions à mener :

1.



Désherbage manuel des adventices

2.



Sélection et taille à la cisaille

3.



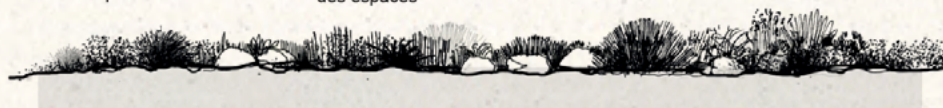
Réduction des rejets au sécateur

Après

Egrenage pour permettre des semis spontanés

Regarnissage des espaces

Taille des vivaces



2

Avant

«Pincer» les parties hautes de la plante pour freiner leurs croissances et contrôler l'apport de sève.

Suppression des rejets

Rabattage des touffes

Les brins les plus vivaces sont affaiblis



Actions à mener :

1.



Reconnaissance de la flore en place au moment du désherbage pour identifier les adventices

2.



Sélection et taille à la cisaille

3.



Réduction des rejets au sécateur

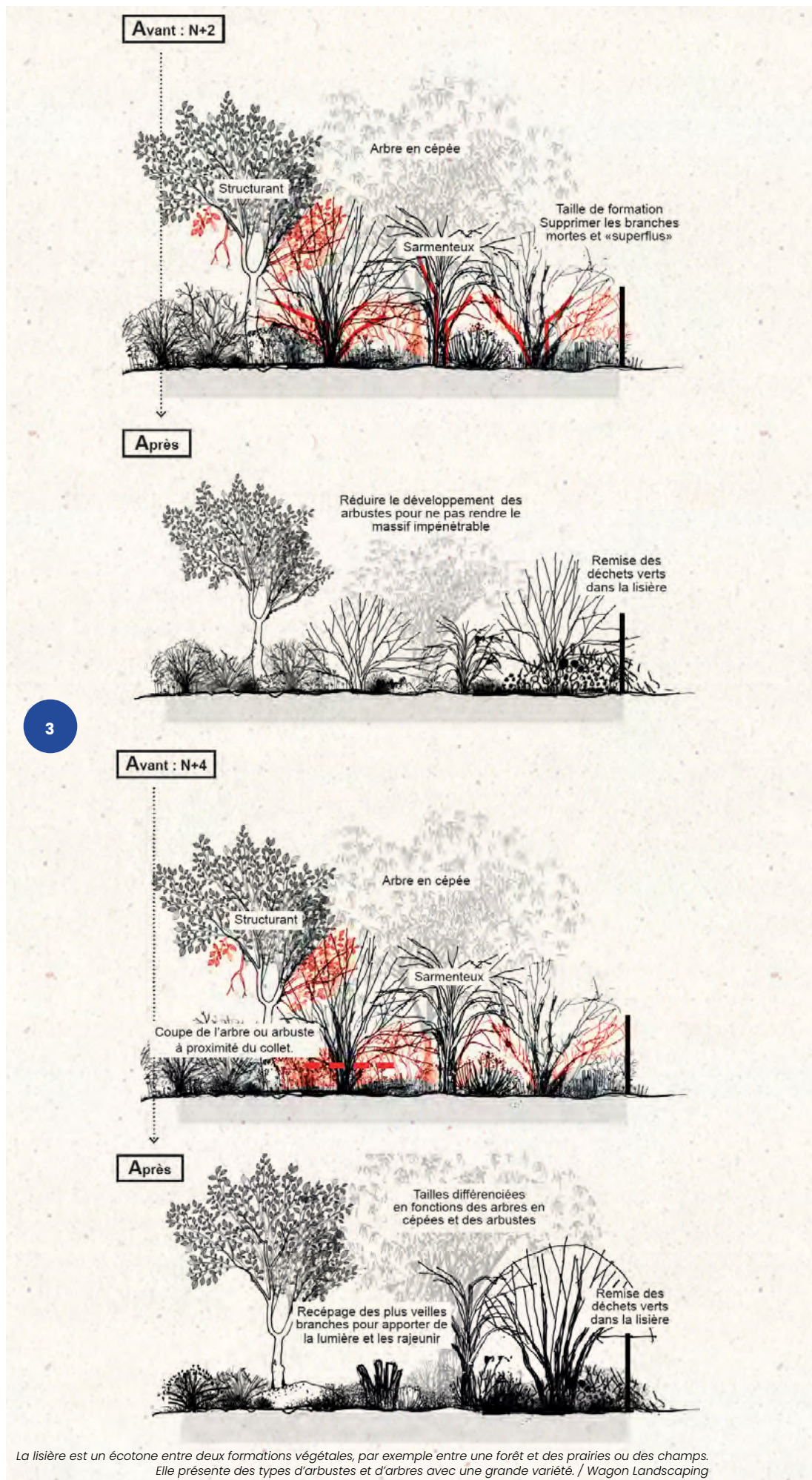
Après

Regarnissage des espaces

Taille des vivaces pour apporter de la lumière et les rajeunir



Le jardin rocaille se compose d'une couche de pierres de différentes tailles. Il offre à la fois la plus grande richesse floristique et un mélange de plantes vivaces, de semis et d'arbustes. / Wagon Landscaping





Sondage Plante & Cité : Évolution des usages après descellement

Toutes les opérations de descellement recensées peuvent être définies par un type de paysage urbain qui traduit l'organisation de la fabrique urbaine. Il est possible d'associer à chaque type un ou plusieurs usages (voir le tableau ci-dessous).

Le changement de l'organisation de la fabrique urbaine peut être décrit en observant les modifications des types de paysage urbain après descellement. Celui-ci diminue le nombre de paysages urbains liés aux bâtiments publics, aux activités éducatives et aux infrastructures de transport. Tous les paysages de friches urbaines ont été convertis en un autre type. Ainsi, le nombre d'espaces paysagers autonomes ou collectifs a augmenté et un nouveau type de paysage apparaît avec les ouvrages alternatifs de gestion des eaux pluviales.

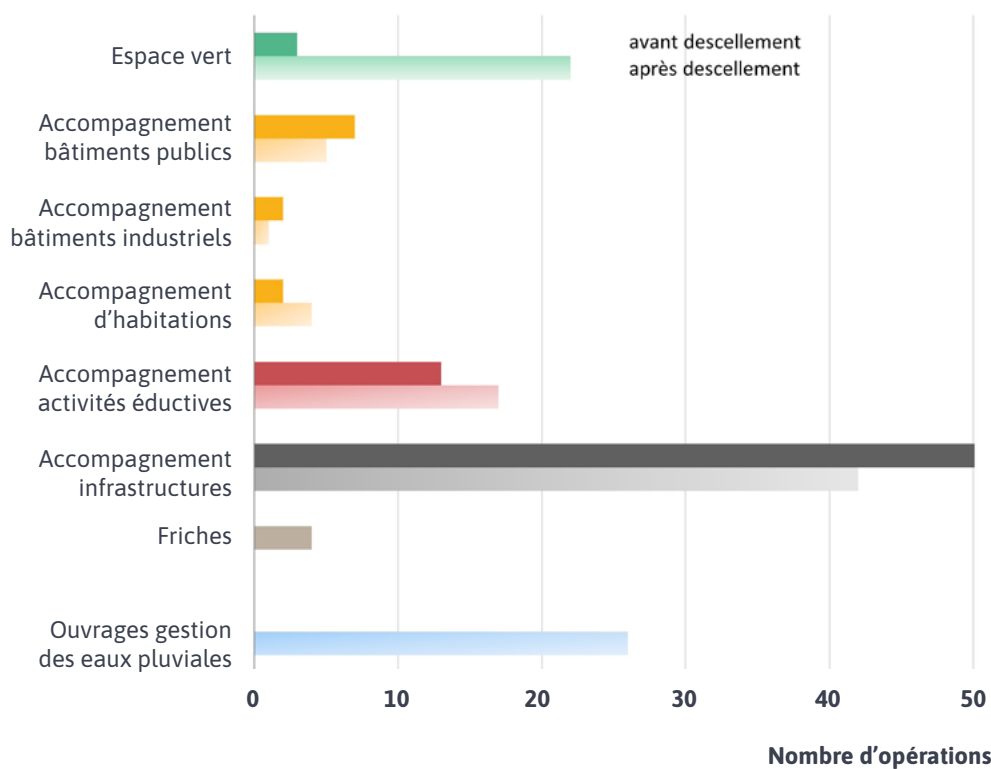
Les usages d'un site évoluent donc après le descellement. Les lieux concernés peuvent ainsi être classés en fonction du nombre d'usages recensés sur place avant l'opération : 40 sites présentent

un seul usage, 10 sites sont le support de deux usages, cinq sites ont trois usages et deux sites en regroupent quatre. Le graphisme ci-après décrit les modifications d'usage après intervention pour les sites à usage unique avant descellement (U2 à U9).

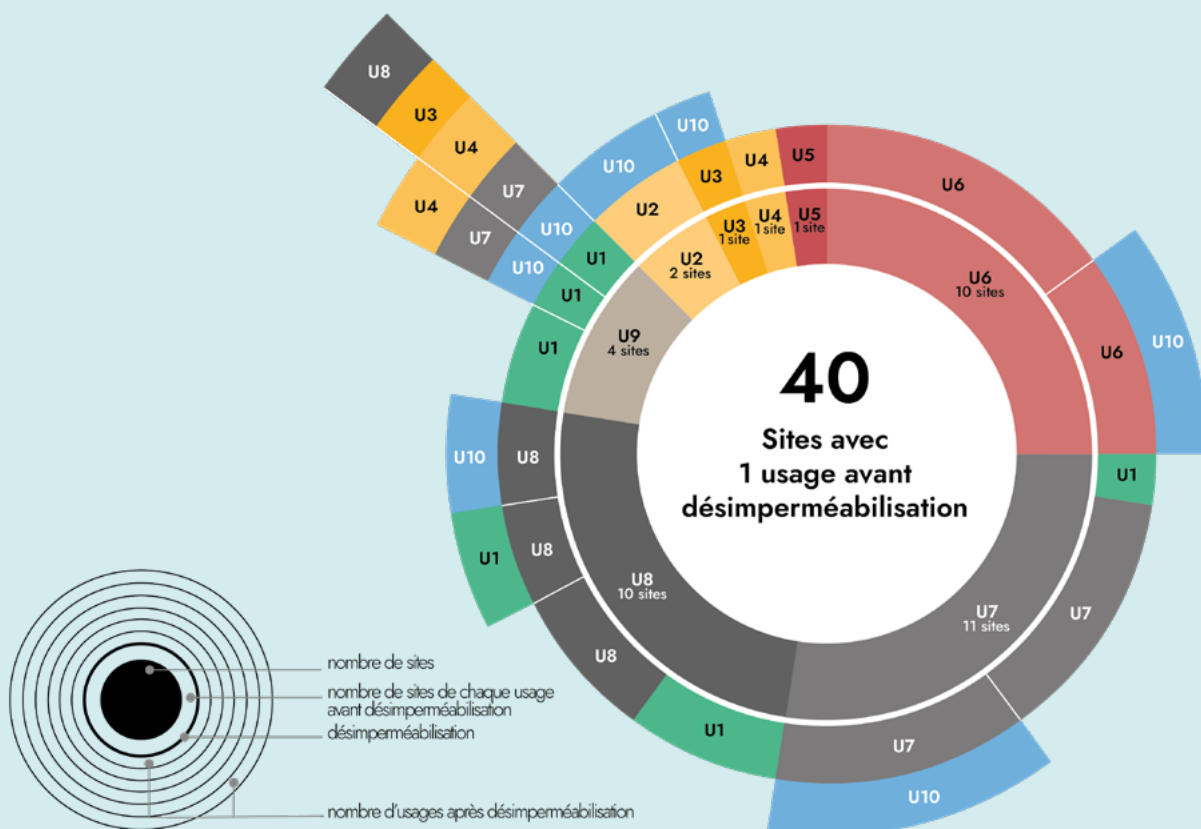
Après descellement, 17 sites sur 40 ont conservé leur usage initial. Dans ce cas, l'opération de descellement n'a consisté qu'à réduire la surface imperméable. 15 sites en ont acquis un second qui correspond généralement à l'installation de structures de gestion des eaux pluviales (U10 pour 14 sites) ou, dans une moindre mesure, à la création d'un espace de type parc (U1 pour deux sites). Pour six sites (un U7, trois U8 et deux U9), l'usage initial a été complètement remplacé par un usage de parc ou de jardin après élimination de la surface scellée. Deux sites en friche ont été complètement transformés avec la mise en place de plusieurs usages : un habitat collectif (U7) accompagné d'espaces verts, des ouvrages de gestion des eaux pluviales, des voiries (pour deux sites), des bâtiments commerciaux et des parkings.

TYPE DE PAYSAGE URBAIN	TYPE D'USAGE	CODE ASSOCIÉ
espaces verts	parcs urbains, périurbains, jardins, squares, espaces naturels entretenus...	U1
lié à des bâtiments administratifs ou des équipements publics	mairies, musées, hôpitaux...	U2
lié à des bâtiments privés et des usines	bâtiments de commerce, de service, ou d'activités industrielles	U3
lié à des zones résidentielles	habitat collectif et individuel, lotissement, cimetière...	U4
lié à des activités d'éducation et de loisirs	activités sportives, de récréation, de loisir	U5
	écoles, collèges, lycées, universités	U6
lié à des infrastructures de transport	réseau routier, rue, trottoir, rond-point, tramways	U7
	parking, place publique	U8
friches industrielles	délaissés urbains et industriels, abords des voies de navigation	U9
ouvrages de gestion des eaux pluviales	bassins de rétention, noues, jardins de pluie	U10

Classification des types de paysages urbains concernés et des usages associés dans le contexte d'opérations de descellement. / D'après Vieillard et al., 2024



Évolution du nombre de chaque type de paysage urbain avant et après descellement.



Type d'usage après descellement pour les 42 sites avec un seul usage initial (voir signification des codes dans le tableau précédent).

ADAPTER SA STRATÉGIE DE DESCELLEMENT

→ Si les retours d'expérience permettent de dégager des conclusions génériques, il faut toutefois garder à l'esprit que chaque projet de descellement de sol est unique. Les modalités peuvent être variées (huit modalités de A à H décrites dans le tableau ci-après) et sont à

adapter au contexte spécifique de chaque site, aux fonctions et services attendus et au temps disponible pour les atteindre. Le raisonnement des modes et des intensités de gestion doit, certes, se faire pour aller vers des sols multifonctionnels et capables de contribuer à l'accès à des villes à haut niveau de services écosystémiques, mais doit aussi prendre en compte les coûts en ressources et en énergie associés.

	MODALITÉ DE DESCELLEMENT							
	A	B	C	D	E	F	G	H
MODES DE GESTION								
Retrait et exportation de la couche de surface								
Retrait et incorporation <i>in situ</i> de la couche de surface								
Décompaction des couches de forme et d'assise								
Excavation et exportation de la couche de forme								
Incorporation de matière organique								
Reconstitution de sol *								
Construction de sol *								
BILAN								
Intensité d'intervention	très faible	faible	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	très forte	très forte
Coût énergétique	très faible	faible	moyen	moyen	moyen	moyen	élevé	élevé
Durée de refunctionalisation	très longue	longue	modérée	modérée	modérée	modérée	courte	courte
Coût environnemental global	très faible	faible	moyen	moyen	moyen	moyen	élevé	élevé

Intensité des modes de gestion lors d'opérations de descellement des sols urbains : une analyse coûts-bénéfices. / C. Schwartz



**Pour aller
plus loin**

Conclusion

////////////////////

→ Le passage du « sol surface » de l'aménageur au « sol volume vivant » du pédologue et de l'écologue s'opérera à mesure que le sol urbain, au-delà de ses m² à haute valeur économique, nous dévoilera ses dessous, au fil des opérations de descellement. Les dialogues entre les porteurs d'enjeux et d'actions pour la préservation de sols urbains sains sont aujourd'hui permis par des dynamiques de laboratoires vivants, comme celles développées dans le projet DESSERT. Cette nouvelle approche collaborative implique étroitement la société civile et l'ensemble de ses parties prenantes, aux côtés des chercheurs, sur des sites de démonstration. Elle apporte ainsi des enseignements partagés par tous, pour mener le plus rapidement possible la transition vers des sols sains.



Les sols doivent trouver leur place dans un métabolisme urbain circulaire, notamment grâce au génie pédologique et à la valorisation raisonnée des ressources urbaines, en particulier des matières organiques. Donner une place de choix aux sols dans les milieux urbains, y compris dans des logiques de descellement, est alors gage de transformation et de transition vers des villes plus résilientes et durables. L'enjeu est d'aller au-delà de la présumée complexité des sols urbains, de les rendre palpables, visibles et compréhensibles par tous, et surtout de convaincre le plus grand nombre que santé des sols (urbains) et santé des êtres humains sont intimement liées.

Le descellement et la renaturation des sols sont largement mis en avant aux différentes échelles de l'aménagement : au niveau national avec le ZAN ou les politiques de gestion de l'eau,

dans les agglomérations avec les différents documents d'urbanismes et les SAGE par exemple, et au niveau local comme cela a pu être montré dans l'ensemble du guide. Les raisons sont diverses, et de nombreuses structures se sont ainsi mobilisées pour en présenter les avantages et effets attendus. L'ADEME, le Cerema, Plante & Cité, les différentes agences de l'eau (comme l'agence de l'eau Méditerranée Corse), les agences d'urbanisme (comme les agences régionales pour la biodiversité à Bordeaux), ainsi que les collectivités territoriales ont élaboré des fiches d'information et financé les études préalables et les travaux.

Les opérations de descellement sont souvent le résultat des opportunités de chantiers, et leur localisation reste pour l'instant relativement aléatoire. Si l'identification des sites à desceller en ville se base essentiellement sur des critères pédologiques, microclimatiques ou hydrologiques, elle mobilise rarement des critères liés à la biodiversité ou au bien-être des populations. Ce constat est posé alors même que les raisons du descellement invoquées sont le plus souvent celles d'une recherche de préservation de la biodiversité, avec la création de connectivité écologique, ou la limitation de l'effet d'ICU qui affecte les populations urbaines les plus vulnérables.

L'identification des zones potentielles à desceller, aux échelles communale et intercommunale, s'appuie sur des cartes d'occupation et d'usage du sol, réalisées par les collectivités territoriales ou au niveau national comme avec la base Occupation du sol grande échelle (OCSGE) de l'Institut national de l'information géographique et forestière. La typologie des surfaces perméables/imperméables identifiées dans l'article R. 101-1 du Code de l'urbanisme se base d'ailleurs en grande partie sur la typologie de cette base OCSGE. Le recours à des cartes d'usage des sols plus détaillées est souvent mis en avant, afin d'identifier des lieux particuliers plus facilement mobilisables (e.g., cours d'école, parkings, friches industrielles).

En tout état de cause, ces manières renouvelées de penser et d'agir avec la ressource sol dans la fabrique territoriale et urbaine interrogent très directement l'articulation entre les MOA et les MOE. Elles sous-tendent notamment de nouvelles approches de projet au sein desquelles les concepteurs doivent être en mesure de proposer des solutions concrètes d'élaboration, de réalisation, de suivi et d'entretien des sols aménagés et à ménager.

JARDIN CASSE DALLE, WAGON LANDSCAPING, ROMAINVILLE, 2023



1



2



3



4



5



6

→ **Le jardin Casse Dalle est un jardin de production de la Cité Maraîchère.** Le projet a été dessiné en fonction des besoins liés à la production agricole et en concertation avec les habitants du quartier. Le cœur d'îlot a été désimperméabilisé (1, 2) et les matériaux ont été intégralement recyclés dans le projet (3), permettant une optimisation du budget tout en évitant la génération de tonnes de déchets.

Une palette végétale diversifiée et adaptée au contexte (sol, entretien, arrosage) (4) a permis de créer des milieux très variés (haies, bosquet fruitier, massif de sol pauvre), propices à la biodiversité (5, 6).

Superficie : 1 500 m² / Coût : 35 000 €

Quelques définitions



ANTHROPOSOL (RÉFÉRENTIEL PÉDOLOGIQUE, 2008) :

Sols fortement modifiés ou fabriqués par l'Homme. Ils peuvent être entièrement fabriqués (apports de matériaux artificiels ou terre transportée) ou tellement transformés par des processus « anthropo-pédogénétiques » que le solum originel n'est plus reconnaissable, ou bien est désormais enfoui (voir aussi définition Technosol).

ARTIFICIALISATION :

Processus qui englobe tous les changements d'usage des sols, voire toutes les actions humaines, qui vont dans le sens d'une perte de naturalité en dégradant ou détruisant les milieux (par exemple l'intensification de l'agriculture) (Clergeau 2020 ; Colsaet, 2017). Béchet et al. (2017) définissent l'artificialisation en tant que changement d'usage des sols consistant en un retrait des sols de leur état naturel (forêts, landes, garrigues, sols nus naturels, zones humides, zones aquatiques) ou de leur usage agricole.

CHAUSSÉE :

Structure composite, multicouche, souvent complexe, conçue pour résister sur une durée de vie relativement longue aux multiples sollicitations mécaniques liées au trafic des véhicules.

CONSTRUCTION DE SOLS :

Démarche de génie pédologique visant à créer un sol fonctionnel par la valorisation et le recyclage de déchets et sous-produits. Cette opération est conduite pour réhabiliter un sol dégradé, voire pour créer un sol directement sur un substratum inerte. Bien que reposant sur des actions humaines, elle constitue alors un mode de désartificialisation ou de renaturation d'un sol.

DÉSARTIFICIALISATION OU RENATURATION D'UN SOL :

Actions ou opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé. (LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant sur la lutte contre le dérèglement climatique et sur le renforcement de la résilience face à ses effets).

DESCELLEMENT (BASÉ SUR CECI ET AL., 2023 ; EUROPEAN COMMISSION, 2012 ; TOBIAS ET AL., 2018) :

Suppression de la fonctionnalité initiale d'un revêtement imperméable (par exemple, enrobé hydrocarboné, béton ou pavés) soit par simple facturation, soit en le retirant et en le remplaçant

par une couverture plus perméable. On parle aussi de débitumisation, de déminéralisation, de décroustage, mais uniquement de « desealing » en anglais. L'étape de descellement peut être suivie ou non d'une restructuration du profil du sol avec le remplacement des matériaux sous-jacents, en utilisant les procédés de construction de sols ou de reconstitution du sol (généralement avec de la terre végétale). À la différence de la désimperméabilisation, qui ne vise qu'à rétablir la perméabilité hydrique, le descellement de la surface d'un site peut viser l'amélioration d'autres fonctionnalités du sol, et permettre de développer de nouveaux usages (des espaces verts et/ou des zones de gestion des eaux de pluie). Toutefois, à la différence d'une désartificialisation ou d'une restauration écologique, un descellement ne cherche pas à retrouver un sol non artificialisé.

DÉSIMPERMÉABILISATION :

Suppression du matériau de recouvrement imperméable d'un sol ou remplacement de ce dernier par un autre matériau, perméable (Légifrance, 2023), afin d'améliorer, voire restaurer, la perméabilité hydrique d'un sol. La désimperméabilisation des sols contribue, d'une part, à réduire le ruissellement des eaux, et donc le risque d'inondation, et d'autre part à favoriser leur infiltration et ainsi le rechargement des nappes phréatiques (Légifrance, 2023). Une question fondatrice de ce guide est de savoir dans quelle mesure la désimperméabilisation permet à elle seule la désartificialisation ou la renaturation d'un sol.

FONCTIONS ÉCOLOGIQUES :

Processus découlant des interactions des composantes biotiques et abiotiques (propriétés physiques, chimiques et biologiques) du sol (Blanchart et al., 2018 ; Morel et al., 2015). Les fonctions des sols incluent principalement : le support de la croissance des plantes (réservoir d'éléments nutritifs, stockage d'eau, support physique des racines), l'habitat pour la biodiversité (écosystèmes, espèces, gènes), les fonctions de filtre et d'échanges en lien avec les cycles biogéochimiques (eau, carbone, nutriments, polluants), la source de matières premières (e.g., construction, support de culture), le support physique et culturel des activités humaines (e.g., habitat, transport, activités, paysage) et le patrimoine culturel.

GÉNIE PÉDOLOGIQUE :

Savoir-faire relatif à la gestion des sols dégradés, basé sur les connaissances acquises en pédologie, incluant l'évaluation des fonctionnalités attendues du sol, la définition des conditions de maintien de celles-ci au cours du temps ainsi que la mise

en œuvre de solutions efficaces et pérennes de reconstitution ou de construction de sols, généralement dans le cadre d'opérations de végétalisation. Le génie pédologique s'inscrit plus globalement dans l'ingénierie écologique (Séré, 2007 ; Baize et Girard, 2008 ; Béchet et al, 2017).

ÎLOT DE CHALEUR URBAIN :

Élévation localisée des températures moyennes urbaines (surtout nocturne) plus importantes que celles des zones périurbaines et des espaces naturels environnants (Revers, Sahraoui, et Yengué, 2020 ; Scalenghe et Marsan, 2009). Ce microclimat artificiel résulte de la combinaison de plusieurs facteurs : (1) une forte interception/piégeage de l'énergie radiative par les bâtiments, (2) les coloris des revêtements des surfaces extérieures, avec globalement un faible albédo des surfaces sombres, (3) un important stockage de chaleur par les différents matériaux urbains du fait de leur inertie thermique, (4) l'existence de sources de chaleur interne liées aux activités humaines (chauffage, transport, activités industrielles, climatisation), (5) des vents en moyenne plus faibles dus aux formes urbaines (relief, orientation du bâti, forte « rugosité ») qui ralentissent l'écoulement atmosphérique, et (6) la nature végétale et/ou minérale du sol, en particulier une grande proportion de surfaces imperméables limitant les possibilités de dissiper l'énergie incidente sous forme de vaporisation de l'eau disponible (soit par évaporation directe, soit par la transpiration de la végétation).

IMPERMÉABILISATION [SCELLEMENT ARTIFICIEL] :

Déconnexion du sol sous-jacent des autres compartiments de l'écosystème (biosphère, atmosphère, hydrosphère, anthroposphère) par la couverture avec un matériau imperméable (e.g., asphalte, béton, enrobé) ou la modification drastique des propriétés du sol pour le rendre imperméable (Burghardt, 2006).

INGÉNIERIE PÉDOLOGIQUE :

Ensemble des connaissances scientifiques, des techniques et des pratiques dédiées à la gestion des sols (dégradés).

RECONSTITUTION DE SOLS :

Démarche de génie pédologique visant à créer un sol fonctionnel par la valorisation de matériaux terreux et de matières organiques naturelles. Cette opération est conduite pour réhabiliter un sol dégradé, voire pour créer un sol directement sur un substratum inerte. Bien que reposant sur des actions humaines, comme la construction de sols, elle constitue alors un mode de désartificialisation ou de renaturation d'un sol.

RÉFÉRENTIEL PÉDOLOGIQUE :

Référentiel proposé en France qui présente un ensemble peu hiérarchisé de 110 références, définies par la présence d'horizons de références spécifiques, précisément caractérisés. Il constitue un thésaurus de vocabulaire proposant, en outre, la définition de nombreux « qualificatifs » qui permettent de compléter la désignation des solums ou d'unités typologiques de sols par des informations complémentaires. C'est donc un outil d'harmonisation du langage entre tous ses utilisateurs.

REMBLAI :

Volume de matériaux issus de chantiers des ouvrages de génie civil (e.g., voirie, bâtiments), apportés pour surélever le niveau initial du sol ou combler une excavation (UNEP et al, 2012). Le remblai provient de l'excavation d'horizons profonds de sol et est composé en quasi-totalité de l'horizon C et éventuellement d'autres matériaux récupérés sur les chantiers lors des terrassements (e.g., tissus, brique, verre), selon le fond géochimique de la zone de provenance (Pruvost, 2018).

STRUCTURE PERMÉABLE :

Ouvrages constitués de matériaux perméables plus ou moins meubles permettant d'infiltrer les eaux pluviales en surface ou de les stocker dans leur structure avant de redistribuer l'eau progressivement vers la nappe ou vers des exutoires dédiés. Ces structures combinent les rôles (et bénéfices) d'ouvrages de gestion des eaux pluviales et de support de voirie. Cette définition inclut la quasi-totalité des types de revêtements perméables à disposition sur le marché (Plante & Cité, 2021).

TECHNOSOL (WRB, 2014) :

Sols dont les propriétés et la pédogenèse sont dominées par leur origine technique, c'est-à-dire soit contenant une quantité importante d'artefacts, soit colmatés par un matériau technique dur, soit contenant une géomembrane.

TERRE VÉGÉTALE :

Terre issue d'horizons de surface organo-minéraux ou d'horizons profonds pouvant être mélangée avec des matières organiques d'origine végétale, des amendements organiques (norme Afnor NF U44-551 [AFNOR, 2002]). Ce terme n'a pas de réel sens pédologique. La terre végétale est souvent riche en éléments nutritifs et en matières organiques (teneur de 3 à 15 %, avec une fraction granulométrique fine [< 2 mm] supérieure à 50 % massique et inférieure à 5 % en éléments pierreux [> 20 mm].) (Séré, 2007 ; UNEP et al, 2012, 2013 ; Damas et Coulon, 2016).

Bibliographie

////////////////////

- Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, **Rendre les villes perméables pour désengorger les réseaux d'assainissement**. <https://www.mavillepermeable.fr/>
- Ajmone-Marsan F, Biasioli M (2010) **Trace elements in soils of urban areas**. *Water Air Soil Pollut.* 213, 121-143.
- Aparin B.F, Sukhacheva E Yu (2014) **Principles of soil mapping of a megalopolis with St. Petersburg as an example**, *Eurasian Soil Sci.* 47, 650-661.
- Atelier de Territoires (2022) **Désimperméabiliser pour lutter contre le changement climatique**, 135 p. https://www.les-caue-occitanie.fr/sites/default/files/fichiers/ressource/field_fichiers/Pre%CC%81sentation-Atelier%20Territoires-De%CC%81simperme%CC%81abliser.pdf
- Baize D, Girard MC (2008) **Référentiel Pédologique**, Association Française d'Étude des Sols, 405 p.
- Baumgartl T 1998, **Physical soil properties in specific fields of application especially in anthropogenic soils**, *Soil and Tillage Research*, 47, 1-2, 51-59.
- Béchet B, Carré F, Florentin L, Leyval C, Montanarella L, Morel J.L, Raimbault G, Rodriguez F, Rossignol J.P, Schwartz C (2009) « **Caractéristiques et fonctionnement des sols urbains** ». In *Sous les pavés la terre*, Cheverry et Gascuel éd., Omniscience, Montreuil, 45-74. ISBN 978-2-916097-03-9
- Blanchart A, Consalès J.N, Séré G, Schwartz C (2018b) **Consideration of soil in urban planning documents — a French case study**, *Journal of Soils and Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2028-x>
- Blanchart A, Séré G, Stas M, Consalès J.N, Morel J.L, Schwartz C (2018) **Towards an operational methodology to optimize ecosystem services provided by urban soils**, *Landscape and Urban Planning*, 176, p 1-9.
- Burghardt W (1993) **Formen und Wirkung der Versiegelung**. Symposium Bodenschutz 29.-30.6.1992, Zentrum für Umweltforschung der Westfälischen Wilhelms Universität, 111-125.
- Burghardt W (2006) **Soil Sealing and Soil Properties Related to Sealing**. Geological Society, London, Special Publications 266, pp. 117-124.
- Cambou A, Chevallier T, Barthès B.G, Derrien D, Cannavo P, Bouchard A, Allory V, Schwartz C, Vidal-Beaudet L (2023) **The impact of urbanization on soil organic carbon stocks and particle size and density fractions**. *Journal of Soils and Sediments*, 23, 792-803.
- Cambou A, Saby N.P.A, Hunault G, Nold F, Cannavo P, Schwartz C, Vidal-Beaudet L (2021) **Impact of city historical management on soil organic carbon stocks in Paris (France)**. *Journal of Soils and Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02869-9>
- Cambou A, Shaw R.K, Huot H, Vidal-Beaudet L, Hunault G, Cannavo P, Nold F, Schwartz C (2018) **Estimation of soil organic carbon stocks of two cities, New York City and Paris**. *Science of The Total Environment* 644, 452-464. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.322>
- Cerema (2023) **Désimperméabilisation et renaturation des sols : une série de fiches du Cerema**. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/desimpermeabilisation-renaturation-sols-serie-fiches-du>
- Charzyński P, Plak A, Hanaka A (2017) **Influence of the soil sealing on the geoaccumulation index of heavy metals and various pollution factors**, *Environ Sci Pollut Res*, 24:4801-4811.
- Commission européenne (2012) **Lignes directrices concernant les meilleures pratiques pour limiter, atténuer ou compenser l'imperméabilisation des sols**, 73 p.
- Craul P.J (1992) **Urban soil in landscape design**, John Wiley & Sons.
- Debœuf De Los Rios Serrano G, Barra Mc, Grandin G (2022) **Renaturer les villes**, 148 p. <https://www.institutparisregion.fr/nos-travaux/publications/renaturer-les-villes/>
- Dominati E, Patterson M, Mackay A (2010) **A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils**. *Ecol. Econ.* 69 (9), 1858-1868.
- Eftene C.A, Dumitru S, Manea A, Raducu D (2016) **A review of the impacts of soil sealing on soil properties in Romania**, *Water Resources, Forest, Marine and Ocean Ecosystems*, Conference Proceedings, SGEM 2016, VOL II.
- El Khalil H, Schwartz C, El Hamiani O, Kubiniok J, Morel J.L, Boularbah A (2008) **Contribution of technic materials to the mobile fraction of metals in urban soils in Marrakech (Morocco)**. *J. Soils Sediments* 8(1), 17-22.
- El Khalil H, Schwartz C, El Hamiani O, Kubiniok J, Morel J.L, Boularbah A (2013) **Distribution of major elements and trace metals as indicators of technosolisation of urban and suburban soils**. *J. Soils Sediments* 13(3), 519-530.

El Khalil H, Schwartz C, El Hamiani O, Sirguey C, Kubiniok J, Boularbah A (2016) **How physical alteration of technic materials affects mobility and phytoavailability of metals in urban soils?** *Chemosphere* 152, 407–414.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016) Soil sealing. <http://www.fao.org/3/a-i6470e.pdf>

Fokaides P.A, Kylili A, Nicolaou L, Ioannou B (2016) **The effect of soil sealing on the urban heat island phenomenon. Indoor and Built Environment.** 25(7):1136-1147. doi:10.1177/1420326X16644495

Gautier A.L, Limasset E et Drzewiecki P – BRGM; Grand C et Girot E – ADEME (2023) **Avis d'expert – La santé des sols urbains au service de l'aménagement des villes et du territoire**, 13 p. https://librairie.ademe.fr/ged/8493/Fiche_maquette_desimpermeabilisation_V2.pdf

Gómez-Baggethun E, Barton D.N (2013). **Classifying and valuing ecosystem services for urban planning.** *Ecological Economics*, v. 86, p. 235-245.

Grand C, Lefranc A, Pierart A, Girot E, ADEME (2024) **La santé des sols urbains au service de l'aménagement des villes et des territoires**, 16 p ; 7 p ; 8 p. <https://librairie.ademe.fr/recherche-et-innovation/6821-la-sante-des-sols-urbains-au-service-de-l-amenagement-des-villes-et-des-territoires.html>

Haase D, Nuissl H (2007) **Does urban sprawl drive changes in the water balance and policy? The case of Leipzig (Germany) 1870–2003.** *Landsc. Urban Plan.*, 80, 1-13. doi:10.1016/j.landurbplan.2006.03.011

Hulisz P, Charzyński P, Greinert A (2018) **Urban soil resources of medium-sized cities in Poland: a comparative case study of Toruń and Zielona Góra.** *J Soils Sediments* 18:358–372.

Hu Y, Dou X, Li J, Li F (2018) **Impervious surfaces alter soil bacterial communities in urban areas: a case study in Beijing, China.** *Front Microbiol* 9:226.

IUSS Working Group WRB (2015) **World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.** *World Soil Resources Reports* No. 106. FAO, Rome.

Johnson C.C, Ander E.L (2008) **Urban geochemical mapping studies: how and why we do them.** *Environmental Geo-chemistry and Health*, 30, pp. 511–530.

Joimel S, Cortet J, Jolivet C.C, Saby N.P.A, Chenot E.D, Branchu P, Consalès J.N, Lefort C, Morel J.L, Schwartz C (2016) **Physico-Chemical Characteristics of Topsoil for Contrasted Forest, Agricultural, Urban and Industrial Land Uses in France,** *Science of The Total Environment* 545-46 (mars 2016): 40-47. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.12.035

Joimel S, Schwartz C, Hedde M, Kiyota S, Krogh P.H, Nahmani J, Pérès G, Vergnes A, Cortet J (2017) **Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality.** *Sci. Total Environ.* 584-585, 614-621.

Kodešová R, Fér M, Klement A, Nikodem A, Teplá D, Neuberger P, Bureš P (2014) **Impact of Various Surface Covers on Water and Thermal Regime of Technosol.** *Journal of Hydrology* 519: 2272–2288.

Leguédou S, Séré G, Auclerc A, Cortet J, Huot H, Ouvrard S, Watteau F, Schwartz C, Morel J.L (2016) **Modelling pedogenesis of technosols.** *Geoderma*, 262, 199-212. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.008>

Lu C, Kotze D.J, Setälä H.M (2020) **Soil sealing causes substantial losses in C and N storage in urban soils under cool climate,** *Science of The Total Environment*, Volume 725, 138369. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138369>

Majidzadeh H, Lockaby B.G, Price R, Governo R (2018) **Soil carbon and nitrogen dynamics beneath impervious surfaces.** *Soil Sci Soc Am J* 82(3):663–670.

Morel J.L, Lorenz K, Chenu C, Séré G (2017) **Urban soils are primary providers of ecosystem services,** in “Soils within Cities – Global approaches to their sustainable management – composition, properties, and functions of soils of the urban environment”, Schweizerbart, 253 p.

Morel J.L, Schwartz C, Florentin L, Kimpe de C (2005) **Urban Soils, Encyclopedia of Soils in the Environment,** D. Hillel, Elsevier Ltd, 202-208.

Morgenroth J, Buchan G, Scharenbroch B.C (2013) **Belowground effects of porous pavements — soil moisture and chemical properties.** *Ecol Eng* 51:221–228.

Murata T, Kawai N (2018) **Degradation of the urban ecosystem function due to soil sealing: involvement in the heat island phenomenon and hydrologic cycle in the Tokyo metropolitan area,** *Soil Science and Plant Nutrition*, 64:2, 145-155.

- Nassiet C, Dutilleul C, Le Lay F (coord.) (2022) **Désimperméabilisation des sols : enjeux et leviers d'action**, 88 p. <https://www.aurba.org/productions/desimpermeabilisation-des-sols/?#>
- Pauleit S, Duhme F (2000) **Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning**. *Landscape Urban Planning*, 52, 1-20. doi:10.1016/S0169-2046(00)00109-2.
- Pereira M.C, O'Riordan R, Stevens C (2021) **Urban soil microbial community and microbial-related carbon storage are severely limited by sealing**. *J Soils Sediments* 21, 1455-1465. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02881-7>
- Perry T, Nawaz R (2008) **An investigation into the extent and impacts of hard surfacing of domestic gardens in an area of Leeds, United Kingdom**. *Landscape Urban Planning*, 86, 1-13. doi:10.1016/j.landurbplan.2007.12.004
- Piotrowska-Długosz A, Charzyński P (2015) **The impact of the soil sealing degree on microbial biomass, enzymatic activity, and physicochemical properties in the Ekranic Technosols of Toruń (Poland)**. *J Soils Sediments* 15, 47-59. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0963-8>
- Projet DESIVILLE : où et comment désimperméabiliser les sols urbains ?** (à paraître dans la librairie ADEME). **Guide méthodologique : Cartographie du potentiel de désimperméabilisation des sols à l'échelle territoriale et locale ; Catalogue de solutions et fiches.**
- Scalenghe R, Marsan F.A (2009) **The anthropogenic sealing of soils in urban areas, Landscape and Urban Planning**, 90, 1-10.
- Schleuss U, Wu Q, Blume H.P (1998) **Variability of soils in urban and periurban areas in Northern Germany**, *CATENA*, 33, 3-4, 255-270.
- Schwartz C, Florentin L, Charpentier D, Muzika S, Morel J.L (2001) **Le pédologue en milieux industriels et urbains – 1. Sols d'une friche industrielle, Étude et Gestion des Sols**, 8, 2, 135-148.
- Schwartz C, Sere G, Cherel J, Boithias L, Warot G, Morandas P, Laboratoire sols et environnement, Cerema (2017) **Destisol : Les sols, une opportunité pour un aménagement urbain durable**, 56 p ; 102 p ; 20 p ; 26 p ; 108 p. <https://librairie.ademe.fr/sols-pollues/3923-destisol-les-sols-une-opportunite-pour-un-amenagement-urbain-durable.html>
- SDAGE (2017) **Vers la ville perméable, comment désimperméabiliser les sols ?**, 64 p.
- Séré G (2018) **Mieux connaître la pédogenèse et le fonctionnement des Technosols pour optimiser les services écosystémiques rendus**, Mémoire HDR en Sciences Agronomiques, 119 p.
- Sobocka J (2008) **Position of Technosols in the Slovak Soil Classification System and their Correlation**. *Gruntoznalstvo (Soil Science, Počvovedenie)*, Tom 9, No 3-4 (13), 2008, pp. 177-182.
- Stroganova M, Myagkova A, Prokofieva T, Skvortsova I (1998) **Soils of Moscow and urban environment**. Moscow, 178 p.
- Tobias S, Conen F, Duss A, Wenzel L.M, Busser C, Alewell C (2018) **Soil sealing and unsealing: State of the art and examples**, *Land Degrad Dev*. 2018;29:2015-2024.
- Ungaro F, Calzolari C, Pistocchi A, Malucelli F (2014) **Modelling the impact of increasing soil sealing on runoff coefficients at regional scale: a hydropedological approach**. *J. Hydrol. Hydromechanics* 62 (1), 33-42.
- Villa P, Malucelli F, Scalenghe R (2018) **Multitemporal mapping of peri-urban carbon stocks and soil sealing from satellite data**. *Science of the Total Environment* 612:590-604.
- Wesolek G (2008) **Sealing of soils**. In Marzluff J.M, Shulenberg E, Endlicher W, Alberti M, Bradley G, Ryan C, Simon U, Zumbunnen C (eds) **Urban ecology**. Springer Science, Business Media LLC, pp. 161-179.
- Zhao D, Li F, Wang R, Yang Q, Ni H (2012) **Effect of soil sealing on the microbial biomass, N transformation and related enzyme activities at various depths of soils in urban area of Beijing, China**. *J Soils Sediments* 12(4):519-530.



Désimperméabiliser les villes

GUIDE OPÉRATIONNEL POUR (RE)DÉCOUVRIR LES SOLS URBAINS

L'imperméabilisation des sols est un phénomène très présent et croissant dans nos villes. Si le scellement des sols trouve historiquement sa justification dans des enjeux sanitaires, il répond aussi à des attentes très pratiques de mobilité et d'habitat, en lien avec l'urbanisation massive des territoires. De façon paradoxale, les sols urbains, supports de vie d'une grande majorité de la population, ont longtemps été négligés par la recherche. Ils sont pourtant étroitement liés à de grands enjeux environnementaux. L'imperméabilisation des sols a par exemple de lourdes conséquences sur l'intensification des inondations ou encore le développement d'îlots de chaleur urbains. C'est dans ce contexte que le projet Désimperméabilisation des sols, services écosystémiques et résilience des territoires (DESSERT) a vu le jour en 2021, dans le but de mieux connaître l'état, le fonctionnement et la capacité de sols urbains à rendre des services écosystémiques avant et après désimperméabilisation. À partir d'un état des lieux des pratiques d'imperméabilisation, il s'agit également de décrire les chantiers de descellement et leur accompagnement sous un angle opérationnel. Ce guide, réalisé par les partenaires multidisciplinaires de DESSERT, propose alors une aide à la conception d'opérations de désimperméabilisation fondée sur des acquis scientifiques, en plus d'expliquer les différents bienfaits du descellement. Au-delà d'une description des étapes et des documents nécessaires pour mener à bien ces opérations, il souligne leur rôle fondamental pour atteindre des villes à haut niveau de fonctions écologiques et de services écosystémiques. Illustré de nombreux exemples, il s'adresse principalement aux concepteurs d'espaces paysagers, aux aménageurs du milieu urbain et aux bureaux d'étude dédiés aux sols et à l'environnement, tout en se voulant accessible à toute personne désirant (re)découvrir les sols urbains.

PARTENAIRES DU CONSORTIUM



PARTENAIRES D'EXPÉRIMENTATION



Pour citer cette publication :

Christophe Schwartz (coord.), Véronique Beaujouan, Federico Broggin, Adeline Bulot, Jean Noël Consalès, Armand Corbel, Marie Cozzi, Robin Dagois, Hervé Daniel, Pierre David, Mathieu Gontier, Romain Goudon, Arnaud Herbretau, Pierre Lasseigne, Maïwenn Lothodé, Jean-Christophe Louvet, Alexandre Moret, Stéphanie Ouvrard, Ludovic Perridy, Geoffroy Séré, Marlène Teixeira Da Silva, François Vade pied, Claire Vieillard, Laure Vidal-Beaudet, 2024. **Désimperméabiliser les villes. Guide opérationnel pour (re)découvrir les sols urbains.** Plante & Cité, 70 p.