

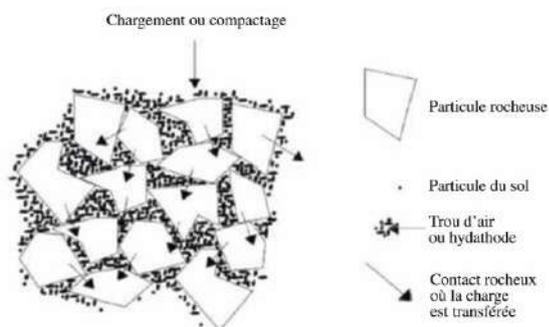
## // Description générale et caractérisation de l'entité de la SfN

### I.1 Définition et différentes variantes existantes

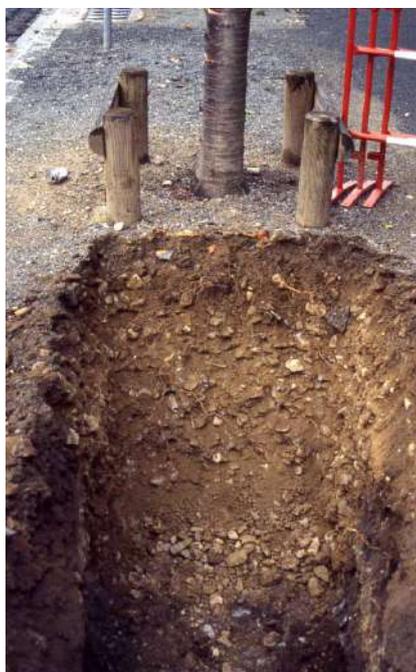
<b>Définition</b>	<p>Cette SfN vise à améliorer la structure des sols (qu'on appelle également « sols squelettiques », « sols pierreux » ou « géotechnique des sols » en fonction de la terminologie). Elle est reconnue comme une alternative à la prévention contre le tassement du sol dans les espaces urbains qui limite la pénétration des racines et la croissance des plantes (Teymur and Atapek, 2010). Ces matériaux se composent de mélanges de sol minéral et d'agrégats (environ 10 à 40 mm) provenant de carrières. Bien que ces matériaux structurels garantissent la circulation efficace de l'eau, ils ont généralement une disponibilité limitée en eau pour la croissance des plantes ; ils favorisent également l'ancrage des racines et la stabilité structurelle des arbres.</p>
-------------------	--

#### Différentes variantes existantes

La formulation idéale de sols structurels se compose d'un ratio de sol pierreux de 65,35 % en volume. C'est le meilleur compromis en termes de résistance au tassement avec un sol squelettique pierreux adéquat et à des fins agronomiques (alimentation en eau, air et nutriments). En outre, le sol structurel fait partie des solutions d'ingénierie les plus économiques pour surmonter de nombreux problèmes liés au sol. (Hashad and El-Mashad, 2014). Il existe plusieurs techniques d'amélioration du sol. Il est possible d'augmenter la structure physique en utilisant le tassement de la surface, la stabilisation chimique, le compactage par vibroflottation et le remplacement du sol, des méthodes de drainage et des méthodes de vibration (Boyle et al. 2007). Des variantes peuvent exister en fonction de l'origine des pierres (voir II.4)



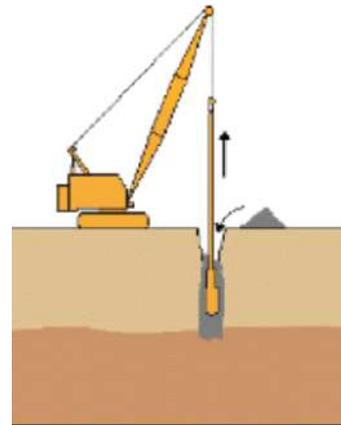
Sol structurel (Bassuk et al., 2015)



Profil des sols structurels (© Rossignol)



Tassement par tracteur  
© Fujiroad



Méthode de compactage par vibroflotation  
© Hayward Baker, Inc., Odenton, Maryland.

## I.2 Enjeux urbains principaux et secondaires associés + impacts

<p><b>Principaux enjeux et sous-enjeux</b></p>	<p>02  Gestion et qualité de l'eau urbaine &gt; 02-2 Gestion des crues 05  Gestion des sols &gt; 05-1 Gestion et qualité des sols</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'infiltration de l'eau diminue l'écoulement et limite les risques de crues</li> <li>- Réduction de la rétractation et du gonflement des sols</li> </ul>
<p><b>Co-bénéfices</b></p>	<p>01  Climat &gt; 01-1 Atténuation du changement climatique &gt; 01-2 Adaptation au climat 04  Biodiversité et espace urbain &gt; 04-2 Développement et régénération de l'espace urbain &gt; 04-3 Gestion de l'espace urbain 06  Efficacité des ressources &gt; 06-3 Déchets &gt; 06-4 Recyclage 11  Économie verte &gt; 11-1 Économie circulaire</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un tassement moindre favorise la pénétration des racines et la croissance des arbres, puis l'évapotranspiration pour un effet optimal de la réduction de l'îlot thermique urbain (Rahman et al. 2011) et de la séquestration du carbone</li> <li>- Possibilité accrue d'utiliser/de recycler des déchets inertes locaux sous forme de matériaux en pierre ou de déchets inertes de construction</li> <li>- Favorise l'économie verte en réduisant le transport et les coûts de décharge grâce à l'utilisation de pierres locales et à la réutilisation de déchets de construction inertes</li> </ul>
<p><b>Effets négatifs possibles</b></p>	<p>02  Qualité des eaux urbaines &gt; 02-1 Gestion des eaux urbaines 04  Biodiversité et espace urbain &gt; 04-1 Biodiversité</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'introduction de 65 % de pierres aboutit à la réduction de la capacité de stockage des eaux du sol et l'augmentation des besoins d'irrigation.</li> <li>- Les espèces végétales doivent être choisies en fonction de la nature des pierres (acides ou basiques).</li> <li>- Pour améliorer le sol, une injection de matériaux synthétiques fabriqués par l'homme, comme le ciment microfin, la résine époxyde, l'acrylamide, les phénoplastes, les silicates et le polyuréthane peut rendre le sol toxique. (DeJong et al. 2010)</li> </ul>

## II/ Informations plus détaillées sur l'entité de la SfN

II.1 Description et implication à différentes échelles spatiales	
<b>Échelle à laquelle la SfN est mise en œuvre</b>	Objet : fosse de plantation d'arbres, bords de route, ronds-points
<b>Échelles affectées</b>	Les échelles affectées sont dans la plupart des cas limitées. Cela concerne la parcelle du bâtiment lui-même ou les environs proches.
II.2 Perspective temporelle (avec problèmes de gestion)	
<b>Temps estimé avant que la SfN ne prenne entièrement effet après sa mise en œuvre</b>	2 à 4 ans => en fonction de la croissance des plantes Les propriétés physiques des sols structurels ne changent pas avec le temps. Cependant, les plantes ont besoin de temps pour favoriser le développement et l'adaptation de leurs racines dans le volume matériel structurel.
<b>Durée de vie</b>	Les espèces végétales concernées par cette SfN sont des plantes ligneuses vivaces : arbres, arbustes. Contrairement aux propriétés physiques, les propriétés chimiques des matériaux de structure devraient s'altérer avec le temps (par exemple, la teneur en nutriments). Pour compenser cette altération, l'approvisionnement en matières organiques dans la fraction du sol doit être élevé (presque 40 % du volume) pour favoriser des propriétés adaptées à long terme. Ainsi, la durée de vie estimée est de 20 à 30 ans.
<b>Aspects relatifs à la gestion (type d'interventions + intensité)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'irrigation est nécessaire au cours des trois ans qui suivent l'installation du plant.</li> <li>- Des plantes adventices devraient se développer et peuvent être éliminées. Il est recommandé d'utiliser une couverture, à base de graviers ou d'asphalte poreux par exemple, pour empêcher ce type de développement.</li> <li>- Contrôle de l'écoulement avant développement d'une force érosive en utilisant les arbres et les couches de surface</li> <li>- Éviter de travailler avec des sols mouillés (toujours travailler sur sol sec ou humide)</li> <li>- Limiter les routes et les espaces de stationnement, utiliser des véhicules légers (essayer d'utiliser uniquement des véhicules légers avec des pneus larges, lisses, à basse pression)</li> <li>- Mélange des sols (le sol compact peut être mélangé avec du compost ou un terreautage entièrement composé pour améliorer la qualité, mais un volume maximal de 50 % de sol est nécessaire pour que cette technique soit utile).</li> </ul>
II.3 Intervenants impliqués	
<b>Intervenants impliqués dans le processus de décision</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Municipalité</li> <li>- Sociétés de construction</li> </ul>
<b>Intervenants et réseaux techniques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Experts géotechniques</li> <li>- Génie civil</li> <li>- Sociétés spécialisées dans l'aménagement des espaces verts, horticulteurs et jardiniers</li> </ul>
<b>Aspects sociaux</b>	- Aucune nécessité
II.4 Conception/techniques/stratégie	
<b>Connaissances et savoir-faire impliqués Ou points clés pour réussir</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Connaissances géotechniques</li> <li>- Caractéristiques des pierres : granulométrie 40 à 90 mm, pierre acide vs calcaire et espèces végétales adaptées (plantes calcifuges vs calcicoles)</li> <li>- Qualité du sol : doit avoir des propriétés agronomiques adéquates (texture, pH, aucun polluant...)</li> <li>- Mélange de pierres dans le sol, transport et installation dans des conditions climatiques sèches (risque de tassement du sol irréversible si la teneur en eau est élevée)</li> <li>- Conservation des matériaux de structure : doivent être recouverts pour empêcher le lessivage et la fermentation</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Éviter les surfaces imperméables sur le matériau de surface pour que les échanges d'air et d'eau puissent se produire entre le sol et l'atmosphère</li> <li>- Caractéristiques des pierres : granularité de 50 à 100 mm, une forme compacte lorsque la densité en vrac est égale à 95 % de la masse volumique sèche Proctor standard (Roger, 1954)</li> </ul>
<b>Matériel impliqué</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pierres : calcédoine, pouzzolane, calcaire dur...</li> <li>- Matériau de fondation de route : bien gradué, le coefficient d'uniformité (D60/D10) ne doit pas être inférieur à 3, le tamis #200 ne doit pas être supérieur aux 2/3 du tamis #40. Dans les gros grains et les agrégats retenus par des tamis #10, le pourcentage d'usure ne doit pas dépasser les 5 %.</li> <li>- Sol (0 à 2 mm) : terre arable issue de parcelles agricoles (dont le sable a été retiré avant conversion pour une utilisation urbaine), ou sous-sol.</li> <li>- Matière organique : le compost de déchets verts fait partie des méthodes les plus utilisées (ressources importantes produites par toutes les villes)</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Terre arable © Agrocampus Ouest</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Compost de déchets verts © Agrocampus Ouest</p> </div> </div>
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Fondement (sol existant) tassé par un tracteur sur la route © Jahangir Khan</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Matériau de structure avec pouzzolane © Agrocampus Ouest</p> </div> </div>
<b>II.5 Aspects légaux associés</b>	
Tous les matériaux (pierres, sol et matière organique) doivent respecter les normes environnementales et agronomiques en vigueur dans chaque pays.	
<b>II.6 Aspects économiques et financiers</b>	
<b>Gamme de coûts</b>	Les coûts de matériaux de structure varient de 20 à 80 €/tonne en fonction de la distance entre le stockage des matériaux de structure et le lieu d'installation dans la ville. Pour une fosse de plantation individuelle, il est recommandé d'utiliser un volume de matériaux de structure de quasiment 10 m <sup>3</sup> , correspondant à presque 6,3 tonnes.
<b>Origine du financement (public, privé, public/privé, autre)</b>	- Principalement public

## II.7 Associations possibles avec d'autres types de solutions (autres solutions écologiques ou conventionnelles)

- De nouveaux matériaux de rebut doivent être utilisés à l'avenir et sont à envisager pour le sol structurel. Cependant, il doit être démontré que ces matériaux ne présentent aucun risque pour l'environnement.



Matériaux de structure : (sur la gauche : sous-sol d'excavation + béton, sur la droite : compost de déchets verts + briques)  
© projet SITERRE, ADEME, France

## III/ Éléments clés et comparaison avec des alternatives

### III.1 Facteurs de réussite et de limite

<b>Facteurs de réussite</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualité et volume du sol pierreux</li> <li>- La bonne plante au bon endroit (par exemple, adapter la vigueur par rapport à la taille du mur/bâtiment)</li> </ul>
<b>Facteurs de limite</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La capacité de charge du sol est de quasiment 50 MPa</li> <li>- Capacité de croissance des arbres dans ces sols</li> <li>- Fiabilité des entreprises spécialisées dans la gestion des espaces verts</li> </ul>

### III.2 Comparaison avec des alternatives

<b>Équivalent de solutions anciennes ou conventionnelles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zéro végétation</li> <li>- Plantation d'arbres dans le sol pur</li> </ul> <p>La dernière solution entraînera le tassement du sol, l'asphyxie des racines et l'ancrage de racines superficielles. Le sol doit être mélangé avec une grande quantité de matière organique (jusqu'à 40 % en volume) mais le tassement naturel du sol lors des 2 premières années est important et peut compenser la croissance de l'arbre.</p>
<b>SfN similaire</b>	<b>Amélioration des sols</b>

## IV/ Références

*Nota* : les références présentées ci-dessous sont souvent communes avec la catégorie « Sol structurel » relative aux structures verticales.

### IV.1 Références scientifiques et plus opérationnelles (ci-jointes)

Bartens J, Day SD, Harris JR, Wynn TM, Dove JE (2009) Transpiration and root development of urban trees in structural soil stormwater reservoirs. *Environ Manage* 44:646-657

Bartens J, Wiseman PE, Smiley ET (2010) Stability of landscape trees in engineered and conventional urban soil mixes. *Urban Forestry & Urban Greening* 9:333-338

Grabosky J, Haffner E, Bassuk N (2009) Plant available moisture in stone-soil media for use under pavement while allowing urban tree root growth. *Arboriculture & Urban Forestry* 35:271-278

Novak V, Knava K, Simunek J (2011) Determining the influence of stones on hydraulic conductivity of saturated soils using numerical method. *Geoderma* 161:177-181

Urban J (2013) Two different approaches to improve growing conditions for trees. *Arboricultural Consultant* 46:5-12

### IV.2 Sources utilisées dans cette fiche de renseignements

Bassuk N, Denig BR, Haffner T, Grabosky J, Trowbridge P (2015) *CU-Structural Soil® A Comprehensive Guide*. Urban Horticulture Institute, 57p.

Boyle, P., Ameratunga, J., De Bok, C., Tranberg, B., 2007. PLANNING FOR THE FUTURE-GROUND IMPROVEMENT TRIALS AT THE PORT OF BRISBANE. *TERRA AQUA* 108, 19.

Damas O., Coulon A. (2016). *Créer des sols fertiles : du déchet à la végétalisation urbaine*. Editions du Moniteur, Paris. In French

## V/ Auteur(s)

Nom	Institution/entreprise	Rédacteur/Expert
Patrice Cannavo	Agrocampus Ouest	Rédacteur
Ryad Bouzouidja	Agrocampus Ouest	Rédacteur
Marta de Regoyos	ACC2	Expert
Marjorie Musy	Cerema	Expert