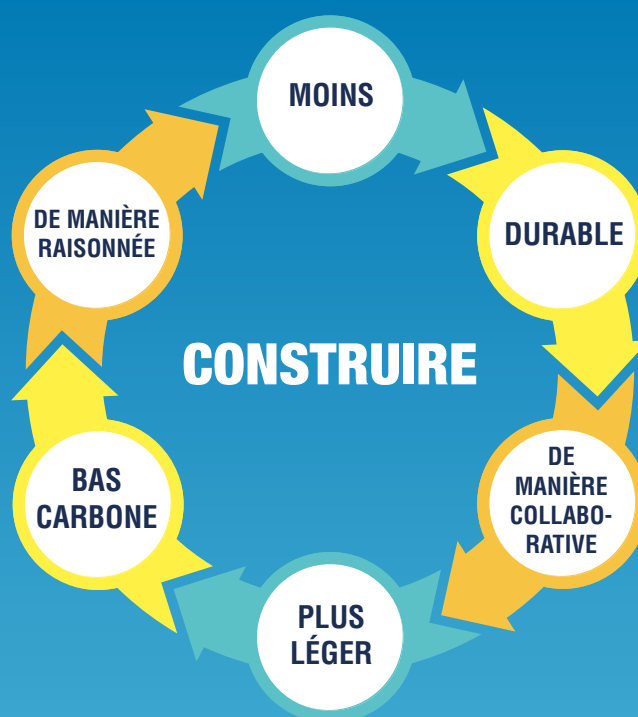


Manuel de sensibilisation  
à des pratiques géotechniques  
respectueuses de l'environnement

# CONTRIBUTION DE LA GÉOTECHNIQUE DANS LA **TRANSITION ÉCOLOGIQUE** ET DANS LA **STRATÉGIE BAS CARBONE**





## PRÉSENTATION DU GUIDE

Le dérèglement climatique est devenu une évidence. Il devient urgent d'agir en modifiant l'impact de l'humanité sur la planète. Le géotechnicien n'est qu'un des nombreux acteurs de l'acte de construire, mais il a la possibilité d'œuvrer de manière éco-responsable, au quotidien dans la réalisation de ses activités, mais aussi et surtout en proposant des solutions vertueuses permettant l'aboutissement de projets respectueux de l'environnement et du climat. Etant souvent en amont des projets, il peut notamment orienter ces projets vers des solutions bénéfiques à l'environnement.

Le géotechnicien se doit ainsi de faire évoluer ses métiers en y intégrant les aspects environnementaux des choix techniques qu'il recommande dans ses études géotechniques. C'est d'ailleurs l'un des objectifs recherchés par la Charte Climat dont il peut être signataire.

Ce guide a été rédigé sous l'égide de Syntec-Ingénierie et de l'Union Syndicale Géotechnique, par des sociétés signataires de la Charte pour le Climat de Syntec-Ingénierie et en réponse à l'axe 1 de cette Charte : « Agir concrètement en faveur du climat au travers des projets qui nous sont confiés ».

## LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE VERS LA NEUTRALITÉ CARBONE EN FRANCE

Instaurée par la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) est la feuille de route de la France pour conduire la politique

d'atténuation du changement climatique. Elle définit des objectifs de réduction des gaz à effet de serre (GES) à l'échelle de la France à court et moyen terme et donne des orientations de politique publique pour mettre en œuvre la transition vers une économie bas-carbone sobre en consommation de matière et d'énergie, circulaire dans tous les secteurs d'activité et peu productrice de déchets.

Pour arriver à la neutralité carbone en 2050, la stratégie nationale formule des orientations de politiques publiques concernant :

- la gouvernance de la mise en œuvre de la stratégie aux échelles nationale et territoriale
- des sujets transversaux tels que l'économie, la recherche, l'éducation ou encore l'emploi
- chaque secteur d'activité : transports, bâtiments, agriculture, forêt-bois, industrie, production d'énergie, déchets.

Parmi ces orientations sectorielles, celles concernant l'acte à construire, et notamment les activités réalisées et prescrites par le géotechnicien, sont :

- des transports, des bâtiments et une industrie bas-carbone
- une production d'énergie décarbonée
- le développement du secteur forêt-bois-biomasse, car il permet la séquestration de carbone et la production de matériaux et d'énergie biosourcés et renouvelables se substituant aux produits d'origine fossile
- le traitement des déchets pour une économie circulaire.



## NOTIONS & DÉFINITIONS

### ÉMISSIONS DE CARBONE & POTENTIEL DE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL

Les émissions de gaz à effet de serre comprennent celles de carbone tels que le CO<sub>2</sub> ainsi que d'autres gaz. Leur **potentiel de réchauffement global** (PRG, et en anglais GWP) est mesuré en unités d'équivalent CO<sub>2</sub>. Donc un kilogramme de CO<sub>2</sub> a un PRG de 1 kgCO<sub>2</sub>e.

Le **carbone gris** est associé aux étapes suivantes :

- **production** : extraction et élaboration des matériaux, consommation d'énergie et d'eau utilisée pour leur fabrication et leur transport
- **construction** de l'ouvrage
- **exploitation** de l'ouvrage, incluant l'utilisation, la maintenance, le remplacement d'équipements et les émissions associées
- **fin de vie** : démolition, démontage, déconstruction, traitement et/ou stockage des déchets, transport associé.

Le **carbone d'exploitation** est celui émis lors de l'exploitation de l'ouvrage, et comprenant notamment les émissions associées au chauffage, la production d'eau chaude, la climatisation, la ventilation, l'éclairage, les différents équipements nécessitant de l'énergie.

Le **carbone global** est la somme du carbone gris et du carbone d'exploitation.

$$\text{CARBONE GLOBAL} = \text{CARBONE D'EXPLOITATION} + \text{CARBONE GRIS}$$

L'objectif **zéro carbone** signifie que toute émission résiduelle doit être compensée par des dispositifs tels que la plantation d'arbres ou la séquestration de carbone (puits de carbone naturels ou technologiques).

### ➔ OBJECTIF ZÉRO CARBONE

Un nouvel ouvrage « zéro émission » ne doit pas brûler de carburant fossile, est complètement alimenté en énergie renouvelable, et son exploitation atteint une performance énergétique compatible avec le changement climatique.

L'ouvrage est construit avec des matériaux prioritairement réemployés, biosourcés, géosourcés, recyclés, bas carbone et peut-être démantelé en fin de vie, en accord avec les principes de l'économie circulaire.

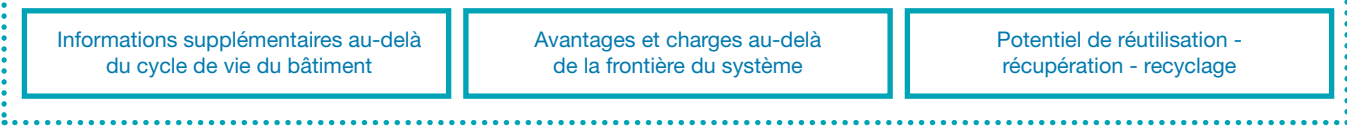
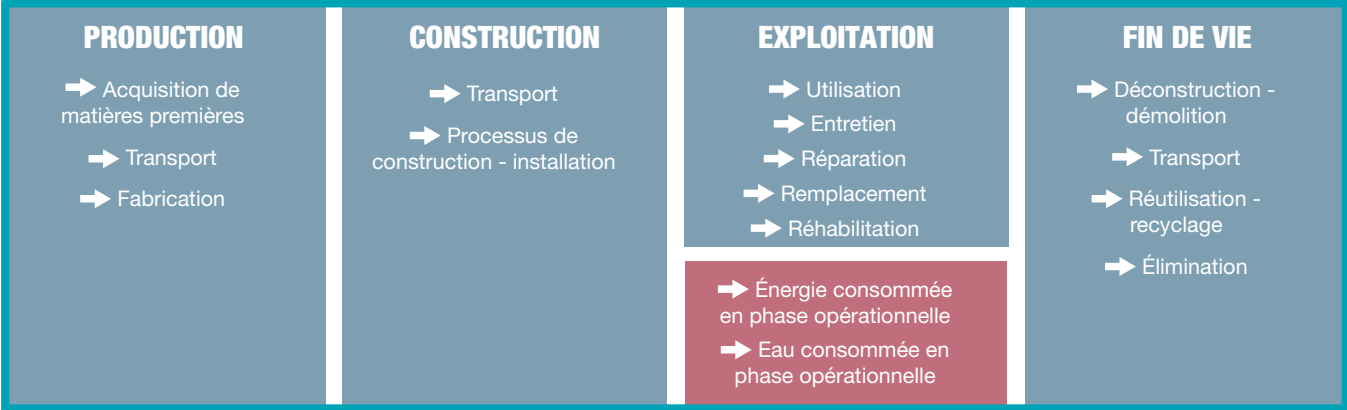
### ANALYSE DU CYCLE DE VIE

L'analyse du cycle de vie est une procédure à plusieurs étapes permettant de quantifier les émissions de carbone et les autres impacts environnementaux (comme l'acidification et l'eutrophisation) à toutes les étapes de la vie de l'ouvrage. La norme EN 15978 définit les différents cycles de vie d'un bâtiment. Les différentes étapes, indiquées ci-après, contribuent à des émissions de carbone :





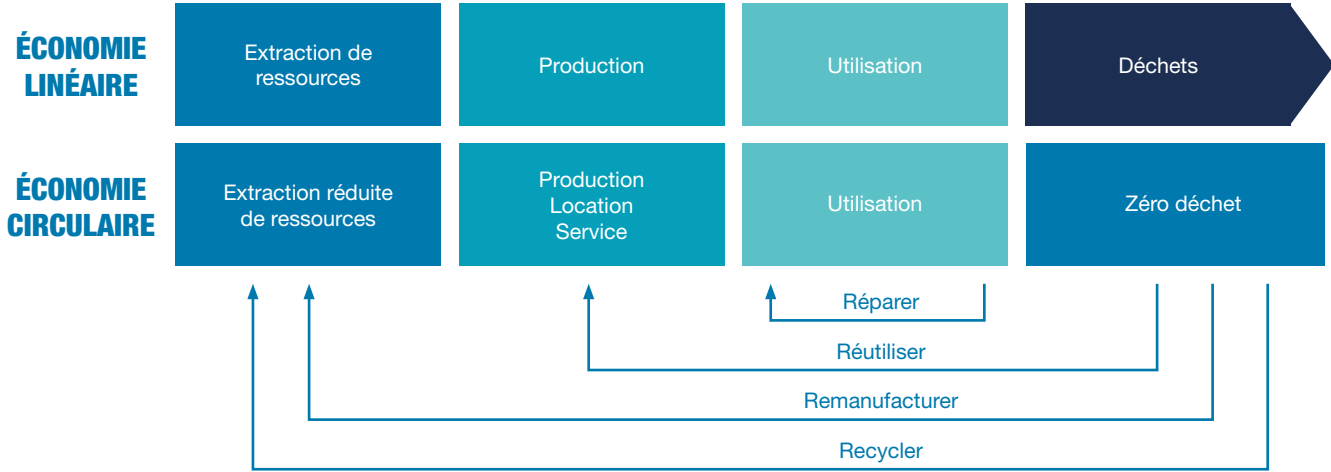
## PHASES



d'après EN 15978

## ÉCONOMIE CIRCULAIRE

L'économie circulaire consiste à produire des biens et des services de manière durable en limitant la consommation et le gaspillage des ressources et la production des déchets. Il s'agit de passer d'une société du tout jetable à un modèle économique circulaire.





Elle nécessite de progresser dans plusieurs domaines :

- **l'approvisionnement durable** : prendre en compte les impacts environnementaux et sociaux des ressources utilisées, en particulier ceux associés à leur extraction et à leur exploitation
- **l'écoconception** : prendre en compte les impacts environnementaux de l'ensemble du cycle de vie d'un produit et les intégrer dès sa conception
- **l'écologie industrielle et territoriale** : mettre en synergie et mutualiser entre plusieurs acteurs économiques les flux de matières, d'énergie, d'eau, les infrastructures, les biens ou encore les services afin d'optimiser l'utilisation des ressources sur un territoire
- **l'économie de la fonctionnalité** : privilégier l'usage à la possession, vendre un service plutôt qu'un bien
- **la consommation responsable** : prendre en compte les impacts environnementaux et sociaux à toutes les étapes du cycle de vie du produit dans les choix d'achat, que l'acheteur soit public ou privé
- **l'allongement de la durée d'usage** des produits par le recours à la réparation, à la vente ou à l'achat d'occasion, par le don, dans le cadre du réemploi et de la réutilisation
- **l'amélioration de la prévention, de la gestion et du recyclage des déchets**, y compris en réinjectant et réutilisant les matières issues des déchets dans le cycle économique.

## RÉEMPLOI, RÉUTILISATION ?

Le réemploi et la réutilisation contribuent au prolongement de la durée de vie des produits et participent à l'économie circulaire et à la réduction de la production des déchets.

L'article L541-1-1 du Code de l'environnement indique les définitions suivantes :

- « **Réemploi** » : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus
- « **Préparation en vue de la réutilisation** » : toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement
- « **Réutilisation** » : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau.

Le réemploi et la réutilisation se distinguent donc par le passage ou non du bien en fin de vie par le statut de déchet.

A la différence de la notion de réemploi, les activités de réutilisation se distinguent par l'utilisation d'un produit usagé en tant que « déchet ».



# RÈGLES DE BASE POUR RÉDUIRE L'EMPREINTE CARBONE DES PROJETS DE CONSTRUCTION

Les prescriptions du géotechnicien portent essentiellement sur les ouvrages d'infrastructure tels que les fondations et les soutènements. Les règles de réduction de l'empreinte carbone sont avant tout exprimées pour ces ouvrages se trouvant dans le sol. Celles relatives aux superstructures sont également présentées à titre informatif, car si le géotechnicien n'est pas généralement le concepteur de tels ouvrages, il peut exprimer des recommandations à leur sujet.

Le géotechnicien va également formuler des recommandations et prescriptions sur les terrassements et ouvrages en terre, ouvrages pour lesquels il est maintenant coutumier d'envisager, pour des raisons économiques, des solutions de réemploi, de réutilisation et/ou de traitement qui a priori peuvent s'avérer également plus écociviles.

Des interactions entre le géotechnicien et les autres parties prenantes du projet seront cependant nécessaires pour une optimisation globale. En effet, ce qui peut paraître vertueux sur la partie géotechnique seule peut avoir des effets néfastes sur la partie structure et donc sur la globalité du projet.

Le choix du site et son aménagement contribuent aussi à cette démarche vertueuse, pour autant qu'il soit possible au géotechnicien de le proposer.

Un paragraphe est également consacré au discours à tenir auprès du client pour porter une solution vertueuse, sachant bien entendu que l'impact carbone doit être examiné dans la globalité du projet, et ne peut uniquement se limiter aux seuls aspects géotechniques.

**Remarque :** ces règles de base évoquent l'usage de matériaux recyclés, dans la mesure où ils sont bas-carbone ou plus bas carbone. En effet, leur usage peut avoir un effet bénéfique sur la réduction de l'épuisement des ressources locales mais pas nécessairement sur l'impact carbone.

## OUVRAGES GÉOTECHNIQUES

Les ouvrages géotechniques d'infrastructure sont en général composés de béton et/ou d'acier, voire de bois. Les performances structurelles de ces ouvrages conditionnent principalement leur conception.

<b>Comment utiliser moins de matériaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Optimiser le dimensionnement et donc les quantités par des investigations géotechniques plus complètes, permettant d'affiner le modèle géotechnique, ainsi que par une ingénierie qualifiée</li> <li>■ Ré-utiliser les substructures existantes quand cela est possible</li> <li>■ Réduire les descentes de charge si possible</li> <li>■ Réduire lorsque possible les soutènements par des aménagements périphériques limitant la poussée des terres</li> <li>■ Équilibrer les déblais/remblais en favorisant le réemploi des matériaux du site</li> </ul>
<b>Utilisation de matériaux bas-carbone</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Utiliser de l'acier 100 % recyclable</li> <li>■ Utiliser des coffrages réutilisables</li> <li>■ Ouvrages de soutènement : privilégier des éléments préfabriqués, ou des ouvrages en terre renforcés par géotextiles par exemple</li> <li>■ Envisager des matériaux alternatifs au béton : soil-mixing, traitement en place</li> <li>■ Étudier des solutions bas-carbone telles que des pieux en bois, ou pieux vissés récupérables pour des ouvrages de faible durée de vie</li> <li>■ Emploi de bétons bas-carbone</li> </ul>



<b>Comment réduire les déchets</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Utiliser des granulats recyclés quand cela est possible</li> <li>■ Utiliser des techniques de fondation spéciales sans déblais, ou générant peu de déblais</li> <li>■ Réutiliser les déblais du site : en remblai, en couche de forme, en matériaux de construction (terre crue) par exemple</li> <li>■ Mutualisation possible entre plusieurs projets proches (réemploi des déblais par exemple possible non seulement sur le projet, mais aussi sur d'autres projets à proximité)</li> </ul>
<b>Adaptabilité</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ prévoir une construction pouvant être adaptée :             <ul style="list-style-type: none"> <li>■ à des futurs changements d'utilisation</li> <li>■ aux changements climatiques, avec des variations importantes entre chaud et froid et entre humide et sec</li> </ul> </li> </ul>
<b>Démantèlement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Pour une construction de faible durée de vie, prévoir des fondations « facilement » récupérables pouvant être réutilisées et recyclées en fin de vie, par exemple : pieux vissés, pieux battus.</li> </ul>

## SUPERSTRUCTURES

<b>Comment utiliser moins de matériaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Conserver et réemployer les structures existantes quand cela est possible ; prévoir la possibilité d'extensions</li> <li>■ Concevoir des façades plus légères</li> <li>■ Prévoir des formes minimisant l'utilisation de matériaux</li> <li>■ Emploi de coffrages réutilisables</li> <li>■ Utiliser le béton comme surface de finition pour minimiser les couches de revêtement</li> </ul>
<b>Utilisation de matériaux bas-carbone</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Emploi de matériaux bio-sourcés et géo-sourcés tels que les bois d'ingénierie (comme le lamellé-croisé), le béton de terre, paille ; privilégier ensuite des matériaux recyclés comme pour l'acier ; envisager des structures hybrides optimisant l'emploi de chaque matériau</li> <li>■ Béton : bas-carbone, granulats recyclés si disponibles à proximité</li> </ul>
<b>Comment réduire les déchets</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mettre en œuvre une conception pour la manufacture et l'assemblage favorables à la déconstruction et à la réutilisation</li> </ul>
<b>Adaptabilité</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Concevoir l'ouvrage pour qu'il soit adaptable à de futurs changements d'utilisation             <ul style="list-style-type: none"> <li>■ conception modulaire</li> <li>■ structure démontable</li> <li>■ considérer les trames, charges et structures pour permettre des modifications d'utilisation, notamment pour les aménagements qui pourraient devenir obsolètes dans le futur proche</li> </ul> </li> </ul>
<b>Démantèlement et recyclage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Réduire l'utilisation des matériaux composites (béton armé) qui pourraient être difficiles à déconstruire</li> <li>■ Mettre en œuvre une conception pour la manufacture et l'assemblage favorables à la réversibilité, à la déconstruction et au réemploi</li> <li>■ Prévoir des assemblages mécaniques visibles et réversibles</li> </ul>



## CHOIX DU SITE

Le géotechnicien, intervenant généralement en amont des projets, pourra orienter les concepteurs vers un aménagement de l'ouvrage sur une zone plus favorable qu'une autre sur le terrain étudié, notamment vis-à-vis de la topographie et des risques naturels. Cela ne sera pas toujours possible, notamment pour des projets contraints par le bâti avoisinant, ou par des autorisations administratives (règlementation PLU par exemple).

<b>Sélection du site</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Prendre en compte l'écosystème pour l'absorption et le stockage de carbone</li> <li>■ Exploiter le potentiel énergétique du sous-sol (géothermie, puits climatique)</li> <li>■ Limiter l'artificialisation</li> <li>■ Minimiser les perturbations de l'environnement existant</li> </ul>
<b>Réduire l'impact sur le site</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Explorer les opportunités de densification du bâti existant : surélévation par exemple</li> <li>■ Si les superstructures ne sont pas réutilisables, examiner les possibilités de conserver et de réutiliser les fondations en place</li> <li>■ Dans le cas d'un site exposé au risque de gonflement-retrait des argiles, trouver l'équilibre entre l'adaptation des fondations et la préservation de l'environnement (est-ce préférable d'approfondir les fondations ou bien de supprimer les arbres trop proches de la construction projetée ?)</li> <li>■ Réduire l'impact sur la qualité des eaux et des écoulements</li> </ul>
<b>Utilisation de matériaux bas-carbone</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Matériaux produits localement, de manière à réduire le transport</li> <li>■ Matériaux bio-sourcés et géo-sourcés (bois, fibres naturelles, terre crue etc...)</li> <li>■ Matériaux recyclés</li> </ul>
<b>Comment réduire les déchets</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Adapter le projet à la configuration du terrain pour minimiser les mouvements de terre</li> </ul>

## AMÉNAGEMENTS PÉRIPHÉRIQUES

<b>Comment utiliser moins de matériaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Emploi de pierres naturelles (sous réserve d'un meilleur bilan carbone) plutôt que des produits en béton</li> <li>■ Adapter le dimensionnement en fonction des chargements des différentes zones (voiries, cheminement piéton...)</li> </ul>
<b>Utilisation de matériaux bas-carbone</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Matériaux recyclés</li> <li>■ Pour les revêtements en bois, s'assurer que le bois est certifié et issu d'une forêt gérée</li> <li>■ Utiliser éclairage solaire lorsque cela est possible (cependant à nuancer avec un impact négatif lié à l'emploi d'une batterie)</li> <li>■ Maximiser les espaces verts pour augmenter les puits naturels de captation et de stockage de carbone</li> </ul>





## PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE AU CLIENT

Il est important de pouvoir connaître les priorités du client, et notamment de connaître son implication dans la démarche bas-carbone :

- quels sont ses niveaux d'écoute sur ces sujets : non sensibilisé, sensibilisé, engagé ?
- a-t-il une responsabilité sur l'ouvrage ou sur son exploitation ?
- a-t-il besoin de construire rapidement ?
- est-il inspiré et ambitieux ?
- a-t-il ses propres objectifs de développement durable ?
- est-il soucieux du bien-être de ses employés, de réduire le turn-over, et de l'amélioration de l'expertise de ses collaborateurs, bienfaits qu'il pourrait obtenir par un environnement de travail respectueux de l'environnement et l'emploi de matériaux naturels ?
- a-t-il, ainsi que ses actionnaires, un intérêt en matière de climat et de justice sociale ?

Une stratégie bas-carbone pourra avoir des effets bénéfiques secondaires qui peuvent la rendre attractive auprès du client.

Le client aura à s'impliquer, et impliquer tous les acteurs du projet, dans cette démarche vertueuse. L'équipe de conception devra comporter un bureau d'étude ou un spécialiste « carbone » qui notamment devra réaliser un calcul des indicateurs d'impact environnemental sur les contributeurs prévus. S'il s'agit d'un projet de bâtiment, ce calcul sera mené conformément à la nouvelle réglementation RE2020 qui, depuis le 1er janvier 2022, remplace la RT2012.



## CARACTÉRISTIQUES « CARBONE » DE QUELQUES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

INIES est la base de données nationale de référence sur les données environnementales et sanitaires des produits et équipements de la construction. Cette base met à disposition des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) de produits de construction et des Profils Environnementaux Produits (PEP) pour les équipements du bâtiment, fournis par les fabricants ou syndicats professionnels au format de la norme européenne NF EN 15804 et son complément national pour les produits de construction et la norme NF XP C08-100-1 et le PCR ed.3 pour les équipements.

Le tableau suivant donne l'impact environnemental, exprimé en kg de CO<sub>2</sub> équivalent pour l'unité fonctionnelle considérée, de quelques ouvrages de fondation répertoriés dans la base INIES :

MATÉRIAU	NOM DU PRODUIT	UNITÉ FONCTIONNELLE	IMPACT ENVIRONNEMENTAL (KG CO2 EQ.)	
Béton armé	<b>Béton armé pour pieux</b> (C25/30 XC1/XC2, CEM II/A)	Il s'agit d'un mètre cube de béton armé pour pieux, de durée de vie 100 ans, assurant les descentes de charge pour le bâtiment considéré.	<b>229.0</b>	
	<b>Béton armé pour semelle filante ou longrine</b> (C25/30 XC1/XC2, CEM II/A)	Il s'agit d'une fondation de 1 mètre de hauteur sur 1 mètre de largeur, de longueur 1 m, dont la durée de vie est de 100 ans.	<b>278.0</b>	
Béton non armé	<b>Béton pour fondations superficielles</b> (C25/30 XC2 CEM II/A)	Il s'agit d'un mètre cube de béton destiné à servir de fondation superficielle, de durée de vie 100 ans, assurant les descentes de charge pour le bâtiment considéré.	<b>197.0</b>	
Bois	<b>Fondations en bois massif - 1 pieu en bois</b> [long. 5m et diamètre 35cm]	Gestion durable	Assurer la fonction de support de charge et autres éléments pour 1 pieu en bois de longueur de 5m et de diamètre 0,35m pour une durée de vie de référence de 50 ans.	<b>-83.7</b>
		Gestion non durable	Assurer la fonction de support de charge et autres éléments pour 1 pieu en bois de longueur de 5m et de diamètre 0,35m pour une durée de vie de référence de 50 ans.	<b>319.0</b>
Acier	<b>Palplanches en acier</b> [ep. 5mm]	Assurer la fonction de 1m <sup>2</sup> de mur de soutènement de terres meubles ou de 1m <sup>2</sup> de protection contre les eaux, avec des palplanches en acier de 5mm d'épaisseur en profil en U, d'une durée de vie de 50 ans.	<b>206.0</b>	



La base INIES fournit des masses de CO<sub>2</sub> équivalent pour l'unité fonctionnelle correspondante au matériau considéré, pas toujours identique d'un matériau à un autre. A titre de comparaison, le tableau ci-après donne cette masse de CO<sub>2</sub> équivalent ramenée à 1 m<sup>3</sup> de matériau, ainsi qu'à 1 t de matériau (avec l'hypothèse de masse volumique de 2.2 t/m<sup>3</sup> pour le béton non armé, 2.4 t/m<sup>3</sup> pour le béton armé, 0.7 t/m<sup>3</sup> pour le bois et 7.8 t/m<sup>3</sup> pour l'acier).

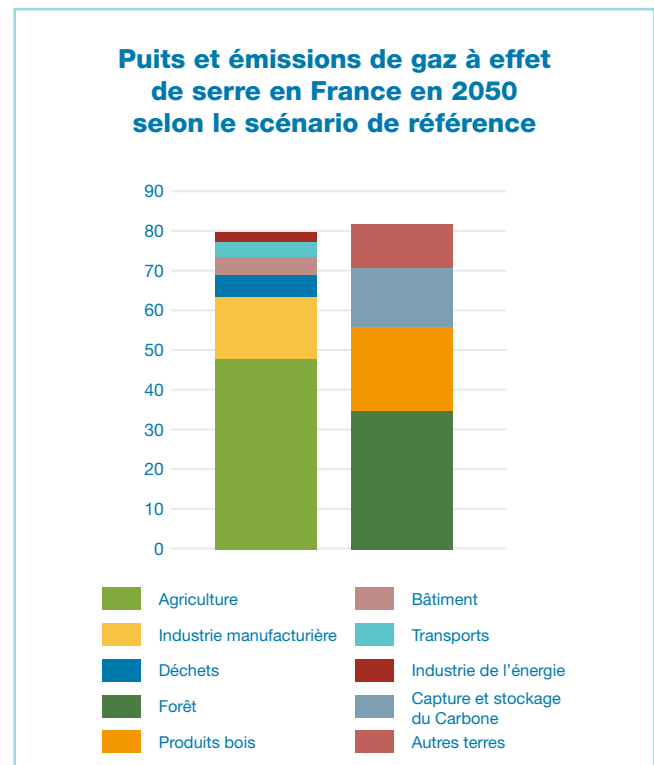
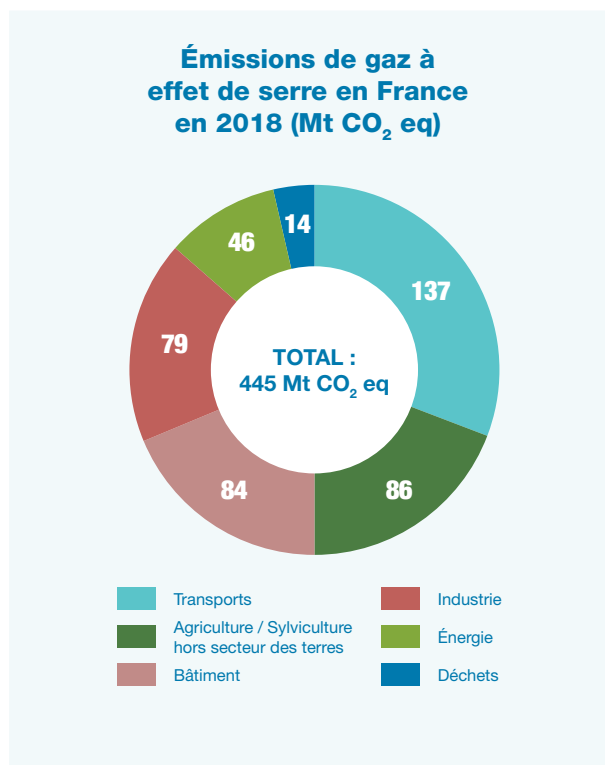
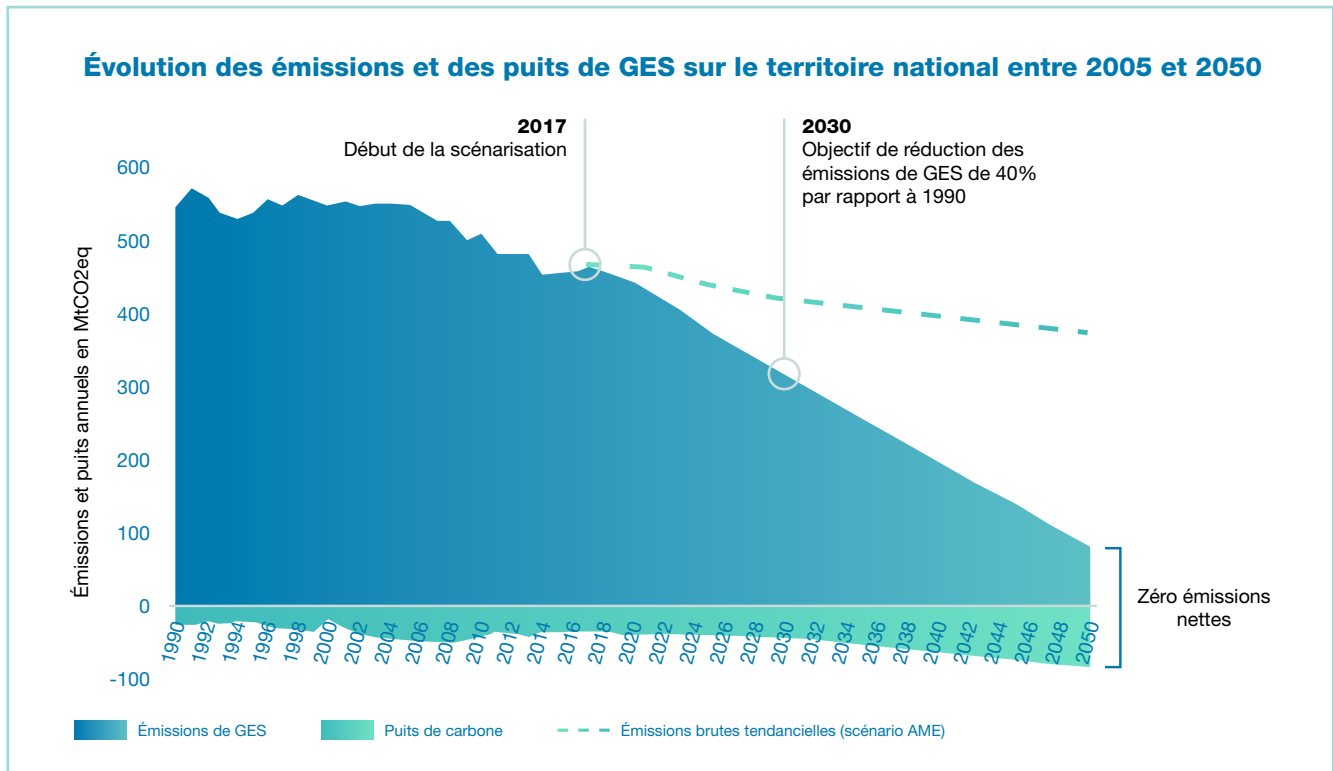
MATÉRIAU	NOM DU PRODUIT	VOLUME (m <sup>3</sup> )	POIDS (t)	IMPACT ENVIRONNEMENTAL (KG CO2 EQ.)		
				CORRESPONDANT À L'UNITÉ FONCTIONNELLE		
				/m <sup>3</sup>	/t	
Béton armé	<b>Béton armé pour pieux</b> (C25/30 XC1/XC2, CEM II/A)	1	2.4	<b>229</b>	<b>95</b>	
	<b>Béton armé pour semelle filante ou longrine</b> (C25/30 XC1/XC2, CEM II/A)	1	2.4	<b>278</b>	<b>116</b>	
Béton non armé	<b>Béton pour fondations superficielles</b> (C25/30 XC2 CEM II/A)	1	2.2	<b>197</b>	<b>90</b>	
Bois	<b>Fondations en bois massif</b> - 1 pieu en bois [long. 5m et diamètre 35cm]	Gestion durable	0.481	0.3367	<b>-174</b>	<b>-249</b>
		Gestion non durable	0.481	0.3367	<b>663</b>	<b>947</b>
Acier	<b>Palplanches en acier</b> [ep. 5mm]	0.005	0.039	<b>41 200</b>	<b>5 282</b>	

Toujours à titre de comparaison, voici l'impact environnemental pour des carburants routiers fourni par la base bilan GES de l'ADEME :

CARBURANT	IMPACT ENVIRONNEMENTAL (KG CO2 EQ.)	
	/m <sup>3</sup>	/t
<b>Supercarburant sans plomb (95, 95-E10, 98)</b>	<b>2 700</b>	<b>3 559</b>
<b>Gazole routier B7</b>	<b>3 100</b>	<b>4 153</b>

# QUELQUES DONNÉES

Source : site officiel « Stratégie Nationale Bas Carbone »







## RÉFÉRENCES

- Norme EN 15978 : évaluation de la performance environnementale des bâtiments – méthode de calcul
- Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) | Ministère de la Transition écologique ([ecologie.gouv.fr](http://ecologie.gouv.fr))
- ADEME - Site Bilans GES
- rapports du Groupement d'experts Inter gouvernementaux sur l'Evolution Climatique (GIEC) : IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
- Documents SYNTEC INGENIERIE : Guides / chartes - Syntec Ingénierie ([syntec-ingenierie.fr](http://syntec-ingenierie.fr))
- Citepa - Données et expertise Air & Climat
- Base INIES : [www.base-inies.fr](http://www.base-inies.fr)



## **PRÉSENTATION ET UTILISATION DES FICHES TECHNIQUES**

L'étude géotechnique aboutit à une ou plusieurs propositions d'ouvrages géotechniques adaptés au projet. Lorsque cela est possible, des solutions alternatives éco-vertueuses peuvent être examinées, et le présent guide a pour objectif de donner des éléments de compréhension pour le choix de ces solutions.

Bien évidemment, l'opportunité de la solution alternative sera examinée dans le cadre d'une approche globale et complète : au même titre que la pertinence et la performance de la solution géotechnique sont à intégrer dans la conception globale du projet, son efficacité environnementale est à évaluer dans sa globalité. Le bilan carbone du projet sera établi dans le cadre de la conception, en y intégrant les travaux géotechniques, l'exploitation et la maintenance des ouvrages (cas des rabattements de nappe par exemple).

Enfin, quelle que soit la solution constructive retenue, l'optimisation des ouvrages demeure un axe essentiel pour réduire l'impact environnemental d'une construction. Dans une discipline où l'ingénieur doit composer en permanence avec l'incertitude, l'optimisation implique évidemment que l'ingénierie géotechnique soit intégrée à toutes les étapes d'un projet, dans le respect de l'enchaînement des missions géotechniques définie dans la norme NF P 94-500 et que des moyens et des délais adaptés soient prévus pour les reconnaissances in-situ, les essais de laboratoire et l'ingénierie.

Afin de « consommer » la juste quantité de ressources, les solutions proposées doivent être optimisées du mieux possible, et cela passe notamment par des études géotechniques complètes et adaptées.

Une étude géotechnique complète et ciblée permettra la meilleure optimisation de la solution géotechnique proposée, permettant ainsi l'optimisation des dimensionnements et des quantités (compromis coût/performance de l'étude, sachant néanmoins que plus l'étude est complète et riche en données géotechniques et donc en sondages et essais, meilleure sera la connaissance du sous-sol).

Les fiches techniques figurant dans le présent guide n'ont pas vocation à être exhaustives.

Ces fiches sont les suivantes :

- **GÉOSTRUCTURES THERMIQUES**
- **GÉOTHERMIE**
- **PUITS CLIMATIQUE**
- **GÉOSYNTHÉTIQUES**
- **AMÉLIORATION DE SOL**
- **BIOCIMENTATION**
- **TECHNIQUE DE MÉLANGE PROFOND (DEEP MIXING METHOD)**
- **DENSIFICATION EN PLACE DES SOLS GRANULAIRES**
- **BÉTON BAS CARBONE**
- **UTILISATION DE BÉTON ARMÉ DE FIBRES**
- **UTILISATION DES AGRÉGATS À BASE DE PNEUS RECYCLÉS**
- **VALORISATION DES DÉBLAIS**
- **ACTIONS SUR LA NAPPE**
- **PIEUX EN BOIS**
- **RÉUTILISATION EN PLACE DE FONDATIONS EXISTANTES.**

## GÉOSTRUCTURES THERMIQUES

### PRINCIPE

Les géostructures thermiques sont des ouvrages géotechniques enterrés (e.g. pieux, parois moulées, tunnels, etc.) dans lesquels sont intégrés des tubes échangeurs de chaleur (e.g. en PEHD). Ces derniers sont attachés à l'intrados des cages d'armatures. Ils sont reliés à une Pompe à Chaleur via un collecteur, permettant ainsi de produire du chaud et/ou du froid.

Cette technique rentre dans le cadre de la géothermie de très basse température, au même titre que les sondes géothermiques. Ainsi, le fluide caloporteur (i.e. eau ou eau + glycol) circule dans les tubes à une température comprise entre +1/+35°C en fonction du mode de production (i.e. chaud ou froid).

Le terrain et le volume de béton de la structure correspondent au réservoir d'énergie. La variation de température du fluide caloporteur dans les tubes implique une variation de température dans le réservoir. Les performances énergétiques de ces ouvrages dépendent des caractéristiques thermo-hydrauliques des formations rencontrées (cf. fiche sur la géothermie très basse/basse température).



### BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL

Les géostructures thermiques permettent d'exploiter une source d'énergie renouvelable non-intermittente et très stable dans le temps pour la production de chaud et/ou de froid.

Leur usage ne nécessite pas de matériaux rares et/ou coûteux pour l'environnement (e.g. terres rares, acier autre que ferraille, etc.). Elles ne requièrent pas de forage complémentaire à celui de l'ouvrage et leur dimensionnement ne doit pas remettre en cause le dimensionnement mécanique initial. Les dimensions des ouvrages enterrés sont donc identiques qu'il y ait usage de géothermie ou non.

Cette technique permet le rejet des calories en été dans le terrain plutôt que dans l'air et permet ainsi la diminution des phénomènes d'îlots de chaleur.

La durée de vie des tubes est supérieure à 50 ans et est estimée supérieure à 100 ans. Aucune maintenance des tubes n'est nécessaire. La maintenance se concentre sur la Pompe à Chaleur dont l'entretien se fait de la même façon qu'un système de production de chaud ou de froid classique.

## POINTS D'ATTENTION & LIMITES

L'équilibre des besoins (i.e. chaud/froid) doit être analysé au regard des variations de température dans le terrain sur plusieurs années. En effet, si les besoins auxquels répondent les géostructures thermiques sont déséquilibrés, la température dans le terrain dérive dans le temps. L'anomalie thermique ainsi générée doit être compensée (e.g. recharge naturelle liée à un écoulement ou recharge anthropique via d'autres technologies de production d'énergie).

Il s'agit d'opérations d'opportunité. Les dimensions de l'ouvrage ne doivent donc pas être adaptées pour produire plus d'énergie. Le risque associé correspond à une diminution de la rentabilité économique de la solution.

La présence d'un écoulement peut générer un panache thermique vers l'aval dont la géométrie dépend, notamment, de la vitesse de l'écoulement. Celui-ci peut provoquer des interactions thermiques avec d'autres ouvrages. Ce phénomène peut améliorer ou diminuer les performances énergétiques en fonction du scénario rencontré (cf. fiche sur la géothermie très basse/basse température).

Un sol sec ou avec une teneur en eau très faible présente des propriétés thermiques faibles. Il faut donc s'assurer que les terrains rencontrés sont sous nappe, même hydrostatique, ou présentent a minima une saturation de 60%.

Tous les acteurs de la construction (ingénieurs structure, ingénieurs Chauffage Ventilation Climatisation, géotechniciens, contrôleurs techniques, etc.) doivent être intégrés au plus tôt dans le projet afin d'améliorer les performances des systèmes d'un point de vue technique et économique.

## ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE

Les variations de température génèrent des déformations et des variations d'efforts dans la structure dont la prise en compte est possible dans le cadre de l'Eurocode 7.

Une nappe en écoulement améliore les transferts d'énergie et dissipe les anomalies thermiques locales.

Il est possible d'associer entre elles les différentes techniques de géothermie très basse température voire d'autres solutions telles que des panneaux solaires.

Des essais in situ (Test de Réponse Thermique) et en laboratoire (e.g. aiguille thermique et plaque chauffante) permettent de déterminer les caractéristiques thermiques des formations géologiques et du béton.

## RÉFÉRENCES

- CFMS et SYNTEC. (2017). Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des géostructures thermiques. Revue Française de Géotechnique, 149, 120 pages
- SIA (Schweizerischer Ingenieur-und Architektenverein) 2005. Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton. Guide pour la conception, la réalisation et la maintenance. SIA D 0190, Zurich, Suisse. 104 pages



## **GÉOTHERMIE BASSE ET TRÈS BASSE TEMPÉRATURE**

### **PRINCIPE**

La géothermie dite de basse ou très basse température consiste à considérer les nappes et/ou le terrain comme des réservoirs d'énergie que l'on exploite via des systèmes ouverts (i.e. avec pompage et réinjection d'eau) ou fermés (i.e. avec circulation d'eau dans des tubes en circuit fermé). L'exploitation de ces réservoirs permet de produire du chaud et/ou du froid mais également de l'Eau Chaude Sanitaire ECS pour les solutions les plus énergétiques.

Les systèmes ouverts correspondent aux pompages sur nappe ou doublet géothermique. Le pompage est effectué à l'aide d'un ou plusieurs puits à l'amont de l'écoulement et la réinjection se fait à l'aval également avec un ou plusieurs puits. Le potentiel énergétique est, notamment, lié à la transmissivité de la nappe. Cette technique est traitée par les hydrogéologues. Dans le cadre de cette fiche, cette solution n'est pas traitée plus en avant.

Les systèmes fermés correspondent aux sondes géothermiques et aux géostructures thermiques (cf. fiche sur les géostructures thermiques). Un fluide caloporteur (e.g. eau ou eau + glycol) est injecté en circuit fermé dans des tubes échangeurs de chaleur intégrés dans un forage généralement compris entre 100 et 200 m de profondeur (sondes géothermiques) ou directement dans les ouvrages géotechniques (géostructures thermiques). Le potentiel énergétique est lié aux propriétés thermo-hydrauliques du terrain (i.e. conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité thermique et transmissivité de la nappe si elle est présente). Ces paramètres sont à déterminer dès les premières phases du projet afin de juger de la pertinence de l'utilisation des solutions de géothermie.

De manière générale, les roches et les sables denses présentent des conductivités thermiques élevées. En présence d'un écoulement, les caractéristiques de ce dernier deviennent vite prépondérantes quant à la qualité des échanges énergétiques par rapport aux propriétés thermiques des formations.

### **BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL**

La géothermie très basse température permet d'exploiter une source d'énergie renouvelable non-intermittente et très stable dans le temps pour la production de chaud et/ou de froid.

Leur usage ne nécessite pas de matériaux rares/coûteux pour l'environnement (e.g. terres rares, acier, etc.).

Cette technique permet le rejet des calories en été dans le terrain plutôt que dans l'air et permet ainsi la diminution des phénomènes d'îlots de chaleur.

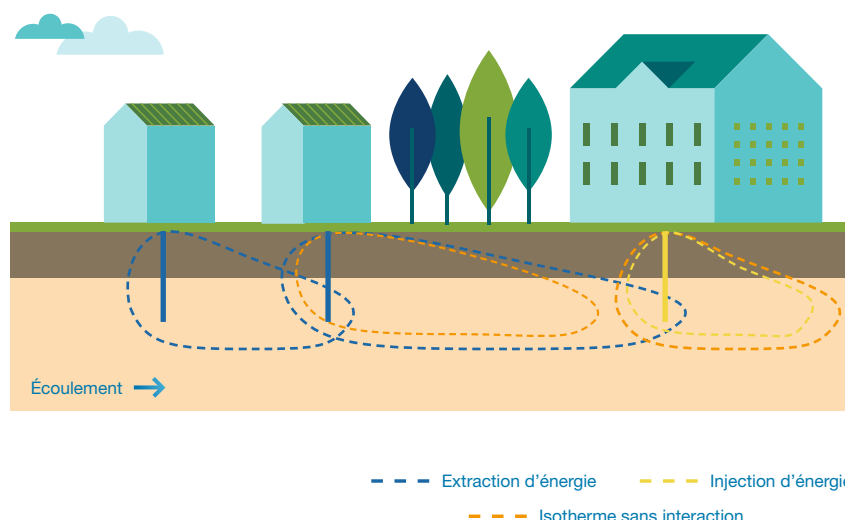
La durée de vie des tubes est supérieure à 50 ans et est estimée supérieure à 100 ans. Aucune maintenance des tubes n'est nécessaire. La maintenance se concentre sur la Pompe à Chaleur dont l'entretien se fait de la même façon qu'un système de production de chaud ou de froid classique.

### **POINTS D'ATTENTION & LIMITES**

Bien souvent, les paramètres thermo-hydrauliques du site ne sont pas connus a priori et le choix de la solution initiale est basé sur la connaissance de la géologie (e.g. carte géologique, sondages BSS, etc.). A partir de la stratigraphie supposée, il est possible en première approche et en se basant sur des tables, d'estimer les paramètres thermiques des formations rencontrées.

## FICHE PRATIQUE DE SOLUTION GÉOTECHNIQUE RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT

La présence d'un écoulement peut générer un panache thermique vers l'aval dont la géométrie dépend, notamment, de la vitesse de l'écoulement. Celui-ci peut provoquer des interactions thermiques avec d'autres ouvrages. Ce phénomène peut améliorer ou diminuer les performances énergétiques en fonction du scénario rencontré. La figure suivante présente des exemples d'interaction avec différents scénarios (e.g. deux bâtiments en mode chauffage et un immeuble en mode refroidissement).



L'équilibre des besoins (i.e. chaud/froid) doit être analysé au regard des variations de température dans le terrain sur plusieurs années. En effet, si les besoins auxquels répondent les systèmes fermés sont déséquilibrés, la température dans le terrain dérive dans le temps. L'anomalie thermique ainsi générée doit être compensée (e.g. recharge naturelle liée à un écoulement ou recharge anthropique via d'autres technologies de production d'énergie).

### ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE

Une nappe en écoulement améliore les transferts d'énergie et dissipe les anomalies thermiques locales.

Il est possible d'associer entre elles les différentes techniques de géothermie très basse température voire d'autres solutions telles que des panneaux solaires.

Des essais in situ (Test de Réponse Thermique) et en laboratoire (e.g. aiguille thermique et plaque chauffante) permettent de déterminer les caractéristiques thermiques des formations géologiques et du béton. Les essais en laboratoire doivent être prévus dès les premières campagnes de reconnaissance. Leur variabilité étant très importante, plusieurs échantillons doivent être testés. L'essai in situ, qui consiste à réaliser une sonde géothermique prototype, est généralement réalisé en phase projet afin d'affiner la conception du projet.

## LE PUITS CLIMATIQUE

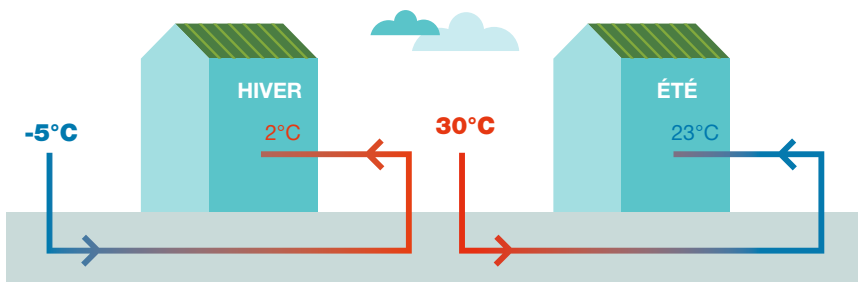
### PRINCIPE

Le puits climatique, aussi désigné puits canadien ou puits provençal, est constitué de canalisations enterrées à environ 2 à 3 m sous terre, dans lesquelles circule de l'air qui se réchauffe ou se rafraîchit avant d'arriver à la maison. La longueur optimale des canalisations oscille entre 30 et 40 m et le diamètre entre 15 et 25 cm, permettant l'optimisation des gains thermiques avec le sol. Ces canalisations peuvent être en différents matériaux, le polyéthylène (PEHD) étant le plus étanche et le meilleur d'un point de vue environnemental. L'hiver, l'air préchauffé par le sol continue de se réchauffer dans l'échangeur de chaleur de la ventilation double flux ; l'été, l'air extérieur est rafraîchi par l'échange thermique avec le sol avant d'arriver dans la maison.

On distingue aussi le puits canadien hydraulique. Dans ce cas, un circuit d'eau glycolée circule dans le sol et est réchauffé puis dirigé vers un échangeur de chaleur avec l'air extérieur neuf qui bénéficie de ce premier préchauffage. Ce système présente plusieurs avantages : il évite l'apparition de bactéries, les canalisations sont plus courtes et la régulation de la température de l'air entrant est plus facile.



Prise d'air



Le puits climatique sera essentiellement destiné à des maisons individuelles.

### BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL

Chauffage en hiver, climatisation en été ; nécessite surface de terrain et plan de masse compatible.

### POINTS D'ATTENTION & LIMITES

L'intérêt est probablement limité en terrain rocheux (coût terrassement, pouvoir thermique du rocher)

L'efficacité dépendra du contexte hydrogéologique. En effet, l'inertie thermique que l'on peut, à peu près corréler à la capacité thermique d'un sol ou d'une roche est assez peu variable en fonction de leur nature. C'est plutôt la teneur en eau qui joue un rôle : un terrain sec/hors nappe aura une inertie plus faible qu'un terrain saturé/sous nappe. En effet, la capacité thermique de l'eau est très supérieure à celle des grains. C'est d'ailleurs pour ça qu'on utilise de l'eau pour refroidir des ouvrages (e.g. centrales) ou tout simplement sa main lorsqu'on se brûle : l'eau absorbe beaucoup d'énergie avant de voir sa température augmenter.

# FICHE PRATIQUE DE SOLUTION GÉOTECHNIQUE RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT

On recherchera des sols ayant une bonne conductivité thermique.

Il faudra prévoir de lester ou d'ancrer les tuyaux en cas de risque de remontée de nappe.

L'installation doit être posée de manière rigoureuse. Notamment, les conduits devront être étanches. L'étanchéité est primordiale dans les régions exposées au risque « radon ».

Il faudra également prévoir des dispositifs de protection contre les pollutions, les pollens et autres allergènes, ainsi que contre les petits animaux (rongeurs, reptiles, insectes).

## ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE

- conditions de terrassement : excavation, tenue en fouille, présence de nappe, réutilisation des déblais en remblai de fouille, vérification de la qualité de remblayage
- tenue des canalisations : absence de risque retrait-gonflement pouvant compromettre l'étanchéité des canalisations en pleine section et au niveau des entrées dans le bâtiment ; fragilité des canalisations en grès (matériau à privilégier pour limiter la condensation)

## RÉFÉRENCES

- Le puits canadien – Bruno Herzog (EYROLLES)
- Le puits canadien & le puits provençal – Lucette Hoisnard (les Energies Renouvelables)



## LES GÉOSYNTHÉTIQUES

### PRINCIPE

Un géosynthétique (GSY) = terme générique désignant un produit, dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle, utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil.

Les géosynthétiques se distinguent en deux grandes familles :

- Les produits perméables : géotextiles et produits apparentés
- Les produits étanches ou peu perméables : géomembranes et produits apparentés (ex. géosynthétiques bentonitiques GSB)

Les polymères/matières qui les composent sont :

- pour les géotextiles :
  - Polyester (PET)
  - Polypropylène (PP)
  - Polyéthylène (PE)
  - Polyamide (PA)
  - Polyacétate de vinyle (PVA)
  - matières premières naturelles, telles que jute, lin, chanvre, coco, coton, paille
- pour les géomembranes :
  - Pitume
  - PEHD (polyéthylène haute densité)
  - PP-F (polypropylène flexible)
  - EPDM (Ethylène propylène diène monomère)
  - GSB (géosynthétiques bentonitiques)

Les géosynthétiques peuvent être généralement classés en catégories selon le mode de fabrication : Géotextile, Géogrille, Géofilet, Géocomposite, Géosynthétique bentonitique, Géotube, Géospaceurs, géosynthétique alvéolaire...

Quelques exemples illustrés de géosynthétiques sont donnés ci-après (figure 1).

Les fonctions des géosynthétiques et des exemples d'utilisation dans des ouvrages sont récapitulés ci-après :

- Séparation : pour la prévention du mélange de deux sols ou de matériaux de remblai adjacents, de nature différente (Applications : routes et autoroutes, voies ferrées, pistes forestières...)
- Filtration : Maintien du sol ou d'autres particules soumis(es) à des forces hydrodynamiques tout en permettant le passage de fluides à travers le géotextile (Applications : routes, voies ferrées, barrages, tranchées drainantes, protection de rivages et de berges...)
- Drainage : collecte et transport des eaux souterraines et/ou d'autres fluides dans le plan d'un géotextile ou d'un produit apparenté (Applications : drainage sous dallage, drainage sous remblai, drainage dans installation de stockage de déchets (ISD)...)

# FICHE PRATIQUE DE SOLUTION GÉOTECHNIQUE RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT

- **Renforcement** : utilisation du comportement en résistance et déformation d'un géotextile ou d'un produit apparenté, afin d'améliorer les propriétés mécaniques du sol ou d'autres matériaux de construction (Applications : remblai sur sols compressibles, murs de soutènement, raidissement de talus, ...)
- **Etanchéité** : utilisation d'un géosynthétique afin de prévenir ou de limiter la migration de fluides (Applications : ISD, Bassins, ouvrages souterrains, ...)
- **Protection** : prévention ou limitation des endommagements localisés d'un élément ou d'un matériau donné en utilisant un géotextile ou un produit apparenté aux géotextiles (Applications : protection des géomembranes, anti poinçonnement)
- **Contrôle de l'érosion** : utilisation d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles, afin d'éviter ou de limiter les mouvements du sol ou d'autres particules à la surface (Applications : talus de déblai ; pente naturelles...)
- **Anti-fissuration** : utilisation d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles pour retarder les remontées de fissures en surface (Applications : chaussées routières, pistes d'aéroports...).

Des exemples d'application et d'ouvrages utilisant des géosynthétiques sont donnés sur la figure 2.

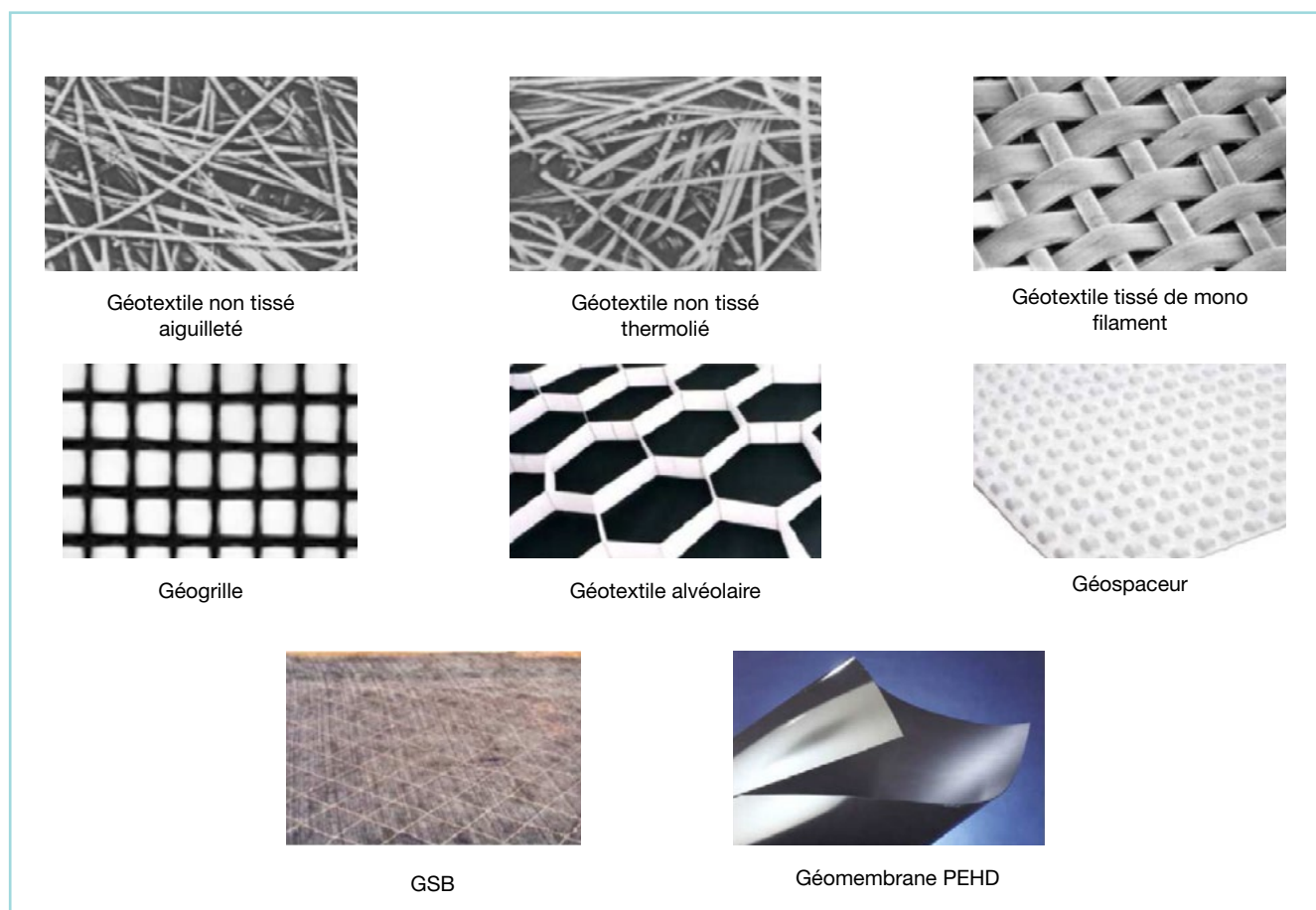


Figure 1 : Quelques types de géosynthétiques - Exemples



Soutènement en remblai renforcé



Géotextile non tissé en séparation



Filtration et séparation  
(enrochements)



Drainage horizontal et drains verticaux sous remblai  
de préchargement

Figure 2 : Quelques exemples d'ouvrages et d'application des géosynthétiques

## BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL

- Se substitue et réduit largement l'utilisation des ressources minérales (ex. granulats...) pour assurer les mêmes fonctions (ex. filtration, drainage, remblais renforcés, protection contre l'érosion...);
- Offrent des solutions alternatives aux ouvrages de soutènement ou de stabilisation de pentes en béton;
- Permet, grâce à la fonction « renforcement », la réutilisation de matériaux de terrassement moins noble et/ou de qualité moindre et favorise ainsi le recyclage de matériaux/sols plutôt que de les mettre en dépôt;
- Limite l'apport de matériaux extérieurs et leur transport.

## POINTS D'ATTENTION & LIMITES

- D'une façon générale, les géosynthétiques sont peu résistants aux Ultra-violets et il faut les protéger de la lumière pour assurer leur pérennité;
  - Le choix des matières va être fixé par les fonctions et les performances demandées et par les conditions de mise en œuvre, d'environnement, de durabilité, de maintenance, etc... imposées par l'ouvrage;
- Par exemple, le PET n'est pas compatible dans des milieux basiques ( $\text{pH} > 8$ ), comme les sols traités, les matériaux recyclés de béton, etc...

- Le PVC ne résiste pas longtemps aux UV. La présence d'hydrocarbures est souvent incompatible, etc...
- Les géosynthétiques sont des produits dont les caractéristiques peuvent évoluer plus ou moins lentement dans le temps (ex. fluage, dégradation chimique, hydrolyse...). Des facteurs de sécurité partiels sont à prendre en compte dans le dimensionnement et la justification des ouvrages intégrant des géosynthétiques pour tenir compte de cette évolution en fonction de la catégorie de durée de vie des ouvrages.

## ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE

Les éléments à prendre en compte sont les suivants :

- Les conditions d'environnement : pH des matériaux au contact des GSY, présence d'hydrocarbures,
- Les conditions de mise en œuvre : Endommagement des GSY à la mise en œuvre (Granulométrie et angularité des matériaux en contact, compactage, poinçonnement, déchirure, etc...);
- La durée de vie et les facteurs : fluage, dégradation chimique, UV, La granulométrie du matériau et son indice de densité ;
- La présence de blocs ou de lentilles de sols fins ;
- La présence d'une nappe ou de sols saturés ;
- La profondeur à traiter ;
- Nécessité d'une planche d'essai pour calibrer les paramètres du traitement ;
- La présence d'avoisinants et leur sensibilité aux vibrations.

Les géotextiles sont définis par des caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques selon des essais normalisés. Les principales caractéristiques sont :

- Caractéristiques physiques (caractéristiques d'identification)
  - L'épaisseur à des pressions prescrites (NF EN ISO 9863)
  - La masse surfacique en g/m<sup>2</sup> (NF EN ISO 9864).
- Caractéristiques mécaniques
  - Essai de traction de bandes larges (NF EN ISO 10319) : La résistance à la traction (kN/m), L'allongement à la rupture
  - Essai de résistance au poinçonnement statique (poinçon CBR) – NF EN ISO 12236
  - Essai de résistance au poinçonnement statique (poinçon pyramidal) – NF G38-019
  - Essai de perforation dynamique (par chute d'un cône) – NF EN ISO 13433
- Caractéristiques d'interface
  - Essai de frottement – cisaillement direct (NF EN ISO 12957-1)
  - Essai de résistance à l'arrachement du sol (NF EN 13738)
- Caractéristiques hydrauliques
  - Perméabilité à l'eau normalement au plan et sans contrainte mécanique (NF EN ISO 11058)
  - Capacité de débit dans le plan (NF EN ISO 12958)
  - Détermination de l'ouverture de filtration caractéristique  $O_f$  (NF EN ISO 12956)



# FICHE PRATIQUE DE SOLUTION GÉOTECHNIQUE RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT

Les fiches techniques des fabricants doivent fournir les principales valeurs caractéristiques du produit.

Les produits géosynthétiques sont soumis au marquage CE obligatoire avant mise sur le marché européen. Toutefois le seul marquage CE pour ces produits, ne peut garantir les caractéristiques annoncées.

Il existe aussi la certification des produits par l'ASQUAL ([www.asqual.com](http://www.asqual.com)). Cet organisme s'appuie sur un cahier des charges plus exigeant que celui du marquage CE, avec notamment des prélèvements d'échantillons chez le fabricant et des contrôles des caractéristiques annoncées par des laboratoires accrédités COFRAC.

## RÉFÉRENCES

- Cahier technique : Définition mise en œuvre et dimensionnement des géosynthétiques – Le moniteur des Travaux publics et du bâtiment – No. 5811 – 10 avril 2015 ;
- Analyse du cycle de vie des solutions géosynthétiques au regard des matériaux de construction conventionnels (2013°- 9èmes Rencontres Géosynthétiques – DIJON 9 au 11 avril 2013 ;
- Sustainable geosystems in civil engineering applications (2010) – Guidance document – WRAP ([www.wrap.org.uk](http://www.wrap.org.uk)) – Geosystems report – feb.2010

### Normes :

- séries Afnor : NF G38-xxx, Séries normes EN et normes EN ISO
- Normes de justification : NF P94-270, NF G38-064

### Sites web utiles :

- [www.cfg.asso.fr](http://www.cfg.asso.fr) : Comité Français des Géosynthétiques (CFG)
- <http://www.geosyntheticssociety.org> : Société internationale sur les géosynthétiques
- [www.geosynthetica.net](http://www.geosynthetica.net) : portail d'informations sur les géosynthétiques (en anglais)



## **TECHNIQUES D'AMÉLIORATION DES SOLS**

### **PRINCIPE**

Les techniques d'amélioration ont pour objectif de résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations et de rendre les sols en place propice à la construction. Elles regroupent des méthodes très diverses (préchargement, inclusions, injections, vibrocompactage...) qui sont souvent proposées en alternatives à des solutions plus classiques de fondations profondes ou de substitution.

Sans passer en revue l'ensemble des procédés, qui sont par ailleurs largement décrits dans la littérature, l'objectif de cette fiche est de souligner les principaux avantages d'une amélioration en place pour favoriser la prise en compte du critère environnemental dans les choix constructifs.

### **BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL**

- Réduction des volumes de sol à évacuer et des transports de matériaux comparativement à une solution classique de substitution ;
- Participation du sol en place qui optimise l'action des adjuvants (mortier, coulis, ballast...) ou des inclusions, et qui diminue en conséquence les volumes à intégrer ;
- Comparativement à des fondations profondes, une meilleure répartition de la charge appliquée par l'ouvrage qui permet d'alléger la superstructure.

### **POINTS D'ATTENTION & LIMITES**

- Domaine d'application propres à chaque procédé ;
- Bénéfice environnemental dépendant de la technique et de l'environnement des travaux ;
- Capacité d'adaptation de la structure au procédé et aux propriétés du sol traité ;
- Impact potentiel sur les avoisinants.

### **ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE**

- Caractéristiques et objectifs de l'amélioration (réduction des tassement, amélioration de la portance, stabilisation des pentes...)
- Besoins en matériaux d'apport ;
- Délais d'action des procédés ;
- Qualification des entreprises présentes sur le marché.

### **RÉFÉRENCES**

- Briançon L, Liausu P, Plumelle C, Simon B. (2018). AMSOL tomes 1 et 2 (Amélioration et renforcement des sols). Éditions Le Moniteur.
- Magnan JP, Pilot G (1988), Amélioration des sols, C255, Techniques de l'ingénieur.

## BIOCIMENTATION

### PRINCIPE

La biocimentation est une technique d'amélioration des sols en cours de développement qui valorise les processus naturels de calcification par certaines bactéries pour augmenter de façon pérenne la cohésion et la résistance mécanique du sol en place. La formation des cristaux de calcite est obtenue grâce à l'action d'une bactérie en présence d'une solution nutritive calcifiante composée d'urée et de chlorure de calcium. La résistance mécanique obtenue peut atteindre quelques centaines de kPa à plusieurs MPa en quelques jours, en fonction des paramètres de préparation.

Le procédé couvre des domaines d'applications variés :

- Renforcement du sol de fondation ;
- Confortement de soutènement ;
- Soutènements provisoires ;
- Traitement de la liquéfaction ;
- Traitement contre l'érosion interne.

### BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL

- Méthode simple et peu intrusive : la cimentation est réalisée en place, à température ambiante. La méthode ne fait appel qu'à des moyens légers par rapport à une intervention traditionnelle. Elle nécessite un nombre limité de points d'injection car les solutions injectées sont fortement pénétrantes ;
- Absence de modification significative de la perméabilité initiale du milieu ;
- Besoin en énergie limité : réduction des émissions de gaz à effet de serre pour stabiliser le même volume de terre (jusqu'à 40% d'émissions de CO<sub>2</sub> par rapport au coulis de ciment traditionnel).

### POINTS D'ATTENTION & LIMITES

Le procédé est utilisable sur une large gamme de granulométrie allant des graviers aux silts. La biocimentation par injection n'est en revanche pas adaptée pour renforcer les sols argileux très fins.

L'offre commerciale pour le procédé reste par ailleurs limitée et son coût la situe dans la gamme haute des procédés d'amélioration des sols existants.

### ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE

- La granulométrie du matériau ;
- Les propriétés hydrauliques du milieu ;
- Nécessité d'une modélisation spécifique et d'une planche d'essai pour calibrer les paramètres de l'injection.

## RÉFÉRENCES

- Briañon L, Liausu P, Plumelle C, Simon B. (2018). AMSOL tome 2 (Amélioration et renforcement des sols). Éditions Le Moniteur, pp. 259-273.
- Dadda A, Emeriau F, Geindreau C., Esnault-Filet A., Garandet A.(2019). Amélioration des propriétés mécaniques des sols par biocimentation : étude mécanique et microstructurale, RFG n°160, 4
- Esnault-Filet A, Gutjahr I., Sapin L. Lépine L. (2015), Prix de l'innovation Solscope. Biocalcis, un nouveau procédé de consolidation de sols par voie biologique.

## **TECHNIQUE DU MÉLANGE PROFOND (DEEP MIXING METHOD)**

### **PRINCIPE**

La technique du mélange profond (Deep Mixing Method ou DMM en langue anglaise) permet la réalisation in situ d'éléments constitués par le sol en place mélangé de façon mécanique avec un matériau d'apport pour former un nouveau matériau appelé soilmix.

L'objectif est d'améliorer les caractéristiques mécaniques et hydrauliques du sol, voire de neutraliser sa pollution.

Le matériau d'apport est généralement un liant, composé d'un ou plusieurs éléments, et est incorporé soit par voie sèche sous forme de poudre, soit par voie humide sous forme de coulis.

Les domaines d'application sont les suivants : amélioration de sols compressibles, réalisation d'écrans d'étanchéité et de soutènements provisoires, raidissements de talus de déblais.

Différentes géométries d'éléments peuvent être réalisées : colonnes, panneaux, tranchées.

### **BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL**

Ces techniques de soil mixing ne produisent pas de déblais, ou alors très peu, ce qui diminue l'empreinte carbone des travaux.

### **POINTS D'ATTENTION & LIMITES**

La réalisation d'un projet de soil mixing devra comporter un suivi et un contrôle renforcés de l'exécution très importants et indispensables dans ce type d'ouvrage géotechnique.

Le procédé s'applique à tous les terrains meubles exempts d'éléments grossiers. Le sol à traiter ne doit pas être trop raide ni trop dense. Il ne doit pas contenir de gros éléments tels que des blocs.

Les profondeurs courantes de traitement restent généralement inférieures à 40 m pour des outillages de type tarière creuse ou Cutter Soil Mixing (CSM).

En méthode par voie humide, la technique DMM génère un certain volume de rejets d'autant plus important que le terrain est imperméable (mais tout de même beaucoup plus réduit que celui produit par le jet grouting).

Il est difficile de traiter localement une couche de sol lâche ou mou disposée entre plusieurs couches de sol de bonne qualité qui ne nécessitent pas d'amélioration.

Il est nécessaire de disposer de plateformes avec une portance suffisante pour assurer le trafic des machines et engins de chantier.

Il n'est généralement pas possible de venir au contact d'un ouvrage existant.

### **ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE**

En matière d'investigations géotechniques, on insistera surtout sur l'importance des mesures de teneurs en eau  $w_{nat}$  et des pourcentages de teneurs en matières organiques  $C_{MO}$ . Les quantités de liants nécessaires pour atteindre un objectif de résistance du mélange augmentent en effet avec ces deux paramètres. Une attention particulière sera portée sur la recherche de polluants, sur la mesure du pH, sur les mesures de températures à la surface du sol ainsi que des eaux de gâchage qui doivent rester supérieures à 4 °C pour ne pas retarder les réactions de prise des liants.

## FICHE PRATIQUE DE SOLUTION GÉOTECHNIQUE RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT

Si l'entreprise ne peut pas justifier d'une expérience suffisante pour garantir la faisabilité des technologies proposées pour le soil mixing et les critères de réception, elle devra exécuter au laboratoire des études de formulation et des essais mécaniques et hydrauliques. Il pourra être demandé en complément des essais préalables in situ.

La spécificité d'un projet comportant du soil mixing réside dans :

- l'étude de la formulation du matériau soilmix ;
- le suivi renforcé de l'exécution ;
- le prélèvement d'échantillons de mélange frais « wet grab samples » pour essais de laboratoire, généralement à titre de contrôle interne.

Pendant la phase d'exécution, il est essentiel de contrôler à minima deux facteurs : la quantité de liant incorporé et l'indice de malaxage. L'objectif des contrôles après construction est la vérification de la géométrie et des caractéristiques des éléments de soilmix.

### RÉFÉRENCES

- Amélioration et renforcement des sols (tome 2) – L.Briançon, P.Liausou, C. Plumelle, B. Simon – éditions le Moniteur
- Guide Technique SOLETANCHE BACHY
- Amélioration et renforcement des sols – traitement par injections -P.Liausou, C.Plumelle – Techniques de l'Ingénieur – C247V1



## **DENSIFICATION EN PLACE DES SOLS GRANULAIRES**

### **PRINCIPE**

La densification dans la masse des sols granulaires est obtenue par un réarrangement des particules de sols sous l'action d'un apport d'énergie. Les techniques les plus couramment utilisées sont le vibrocompactage qui consiste à générer des vibrations entretenues par un vibreur de profondeur et le compactage dynamique où l'énergie est apportée par un pilonnage de surface.

### **BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL**

- Valorise les sols en place ;
- Limite l'apport de matériaux extérieur.

### **POINTS D'ATTENTION & LIMITES**

- Procédés non adaptés dans les sols fins (>20% de fines pour le compactage dynamique, >10 à 12% pour le vibrocompactage) ;
- Procédés peu adaptés pour les petites surfaces ;
- Risques de nuisances pour les avoisinants sensibles aux vibrations.

### **ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE**

- Granulométrie du matériau et son indice de densité ;
- Présence de blocs ou de lentilles de sols fins ;
- Présence d'une nappe ou de sols saturés ;
- Profondeur à traiter ;
- Nécessité d'une planche d'essai pour calibrer les paramètres du traitement ;
- Présence d'avoisinants et leur sensibilité aux vibrations.

### **RÉFÉRENCES**

- CFLS, AFPS (2012). Guide Technique - Procédés d'amélioration et de renforcement des sols sous actions sismiques. Presses de l'ENPC
- Briçon L, Liausu P, Plumelle C, Simon B. (2018). AMSOL tome 1 (Amélioration et renforcement des sols). Éditions Le Moniteur, pp. 209-291.

## BÉTON BAS CARBONE

### PRINCIPE

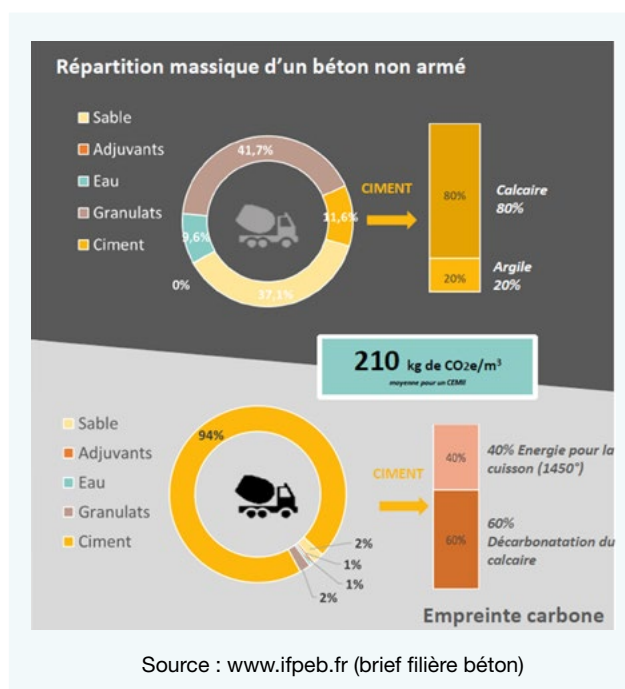
Dans le contexte actuel de réduction d'émission des gaz à effets de serre, des nouvelles approches sont mises en place pour réduire les éléments à empreinte carbone élevée dans le béton ou les remplacer par des substituts moins polluants ou issus du recyclage.

Différentes catégories de béton bas carbone peuvent être citées :

- **Notions de liants équivalent** : la norme NF EN 206/CN introduit le concept de liant équivalent ; ce concept autorise la prise en compte des additions (conformes aux normes qui les couvrent) en remplaçant l'exigence relative au dosage minimal en ciment par la même exigence appliquée au liant équivalent
- **Bétons optimisés respectant la NF EN 206/CN** : l'annexe nationale de la norme béton offre déjà de nombreuses possibilités de formulation des bétons ; en fonction des agressions et attaques subies par le béton dans son environnement, les exigences de moyen portent sur une teneur minimale en ciment, un rapport Eeff/C, une classe de résistance minimale ou un type de ciment/liant particulier
- **Bétons bas carbone validés par une approche performancielle** : la prochaine révision de la NF EN 206/CN permettra de déroger à certaines règles prescriptives habituelles sous condition d'évaluation amont de la performance du béton ; davantage de souplesse et l'utilisation de davantage de matériaux locaux pourront permettre de réduire l'empreinte carbone de ce type de béton.
- **Bétons à base de liants émergents** : de nouvelles technologies de liants se développent et s'écartent de ceux de la famille de ciments Portland ; on peut distinguer notamment les liants sulfoalumineux, les liants alcali-activés, les géopolymères, les liants sursulfatés.

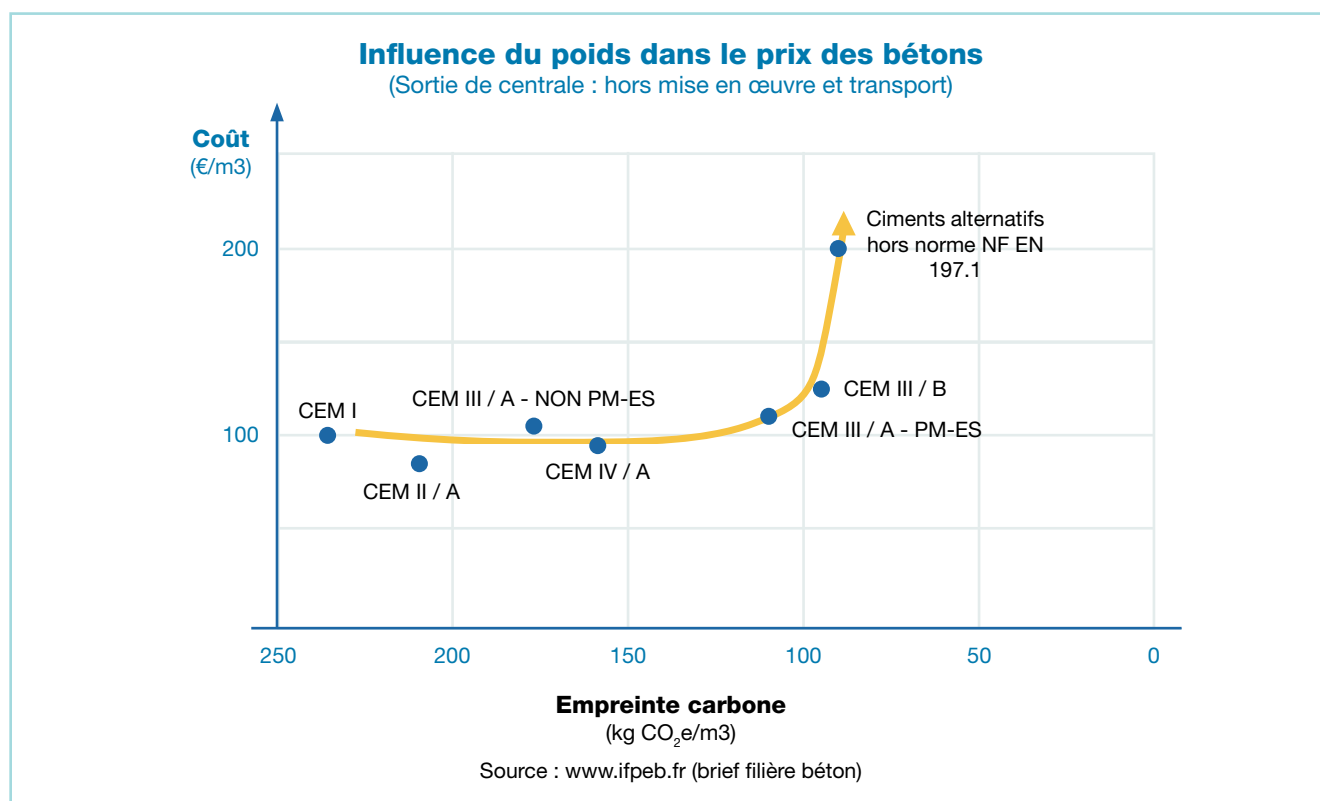
### BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL

- Une empreinte carbone pouvant être optimisée ;
- Un processus de fabrication avec le principe de l'économie circulaire : le recours aux co-produits permet de ne pas recourir à l'exploitation ni à l'ouverture de nouvelle carrières → préservation des ressources ;
- Un ciment avec moins de clinker principal responsable de l'empreinte carbone du ciment traditionnel ;
- Alternatives avec des temps de cuisson plus faibles ou des températures plus basses des matières premières ;
- Possibilité de fabriquer un ciment « sur mesure » à la demande ;
- Un ciment qui peut dans certains cas être moins nocif
- Minimiser l'émission du CO<sub>2</sub> voir l'absorber dans certaines méthodes



## POINTS D'ATTENTION & LIMITES

- **Un temps de prise en général lent entraînant un décoffrage tardif et diminution de cadence ;**
- **Sensibilité au phénomène de dessiccation avec le temps :** l'utilisation du ciment bas carbone nécessite souvent des mesures particulières comme pratiquer une cure très soignée pour éviter ce phénomène ;
- **Problème de disponibilité et de pérennité des ressources de substitution :** même si tout le laitier disponible en Europe par exemple est utilisé pour la fabrication du ciment, cela ne représentera que 20% de sa production totale ;
- **Des limites liées à la réglementation :** norme NF EN 206 en cours d'évolution et devrait sortir prochainement. L'approche performancielle sera pleinement introduite dans cette nouvelle version ;
- Procédés de fabrication nécessitant des conditions particulières ;
- Selon le substituant du granulat ou de la matrice cimentaire, les performances mécaniques doivent être vérifiées à court et long terme ;
- Le terme béton est régulièrement utilisé dans le cadre de l'utilisation des matériaux biosourcés. Ce terme peut être trompeur car il ne s'agit pas toujours de matériaux structurels mais souvent d'isolants de parois (il existe toutefois des bétons biosourcés pouvant composer une enveloppe porteuse) ;
- **La notion « Bas carbone »** n'est ni normée ni réglementée ; c'est la taxonomie européenne qui propose un seuil pour le ciment vert (498 kg CO<sub>2</sub>/tonne) qui équivaut à environ 174 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de béton (équivalent CEM III, C25/30) ; la méthode de calcul de prise en compte du poids carbone reste à préciser ; il faut également faire attention aux comparaisons de l'impact carbone de 2 bétons ; il est impératif avant tout de s'assurer qu'ils rendent le même service.
- **Prix parfois élevé par rapport au béton traditionnel :** l'arrivée de nouveaux bétons bas carbone va se reposer forcément sur une R&D très poussée qui peut entraîner des répercussions sur leur prix ; cependant, cela pourrait évoluer dans le temps car la production de certains constituants (argiles calcinées) est moins lourde que celle d'un clinker.



## ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE

- La **disponibilité des ressources** à proximité du chantier pour réduire l'empreinte carbone lié au transport (co-produits) ;
- Le **savoir-faire local** ;
- Le mode opératoire pour l'utilisation de tels bétons par rapport aux ciments traditionnels.

NB : le béton bas carbone est compatible avec l'utilisation en fondations profondes mais son emploi implique des études plus poussées en termes de modélisation de béton, des comportements thermo-mécaniques et de durabilité du béton et des aciers soumis à la corrosion par exemple.

## RÉFÉRENCES

- Béton bas carbone, perspectives et recommandations – Ministère de la Transition Ecologique – pôle prévention construction - Septembre 2021
- Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050, A. Favier, and al. 2018.
- Le Hub des prescripteurs bas carbone – Brief filière – Béton Les messages clés – ifpeb – Carbone 4 – [www.ifpeb.fr](http://www.ifpeb.fr)
- Empreinte carbone : liants hydrauliques et bétons (Mines et carrières N°295 octobre 2021)
- [https://conseils.xpair.com/actualite\\_experts/beton-bas-carbone.htm](https://conseils.xpair.com/actualite_experts/beton-bas-carbone.htm)
- <https://www.industryweek.com/technology-and-iiot/article/21177552/taking-a-hard-look-at-concretes-co2-footprint>

## UTILISATION DE BÉTON ARMÉ DE FIBRES

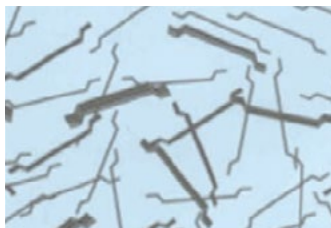
**Nota :** Cette fiche n'a pas vocation à évoquer les BFUP (Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances) en particulier.

### PRINCIPE

Substituer le béton armé (béton + armatures en acier) traditionnel par un béton armé de fibres réparties de façon homogène.

Une fibre est un matériau de longueur entre 5 et 60 mm. En fonction de leur nature, ces fibres confèrent des propriétés différentes aux bétons :

- Fibres métalliques: acier, fonte, inox;
- Fibres organiques: acrylique, aramide, carbone, kevlar, polypropylène, etc.;
- Fibres minérales: basalte, mica, verre, wollastonite.



Les bétons fibrés trouvent de nombreuses applications dans les ouvrages géotechniques (voussoirs, béton projeté, semelles filantes, fondations spéciales...).

### BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL

- 1 Facilité de mise en œuvre :** pas de mise en œuvre d'armatures (ni découpe, ni manipulation de ferraille) + facilité du coulage béton ;
- 2 Béton plus léger que le béton ordinaire ;**
- 3 Béton plus durable :** les fibres sont entièrement indépendantes les unes des autres et « noyées » dans la matrice béton. Si une fibre se corrode, la corrosion ne se propage pas au reste des fibres ☐ pas de détérioration des caractéristiques du béton fibré (réf. projet ANDRA). Dans le cas de fissures de petite taille (< 150 µm), il a été observé que le matériau qui corrode la fibre à travers la fissure en surface tend à refermer ladite fissure. Possible d'utilisation de béton « mixtes » armés de barres et de fibres afin de réduire leur sensibilité à la corrosion (notamment dans des environnements agressifs) ;
- 4 Remplacement total ou partiel des armatures traditionnelles passives (fibres métalliques) ;**
- 5 Diminution du risque de fissuration :** les fibres rendent le béton plus résistant sur le long terme en limitant la fissuration du matériau ;
- 6 Résistance au feu, à l'abrasion, aux chocs, à la traction, et à la flexion :** les fibres améliorent la ductilité du béton, lui permettant ainsi de se déformer sans se rompre. Elles permettent également d'améliorer la résistance du béton à l'abrasion et par conséquent d'en limiter la fissuration ;
- 7** Pour certains usages, moins d'acier au m<sup>3</sup> de béton ;
- 8** Une **durabilité augmentée** et des durées de vie d'ouvrages optimisées.



## POINTS D'ATTENTION & LIMITES

**Règlementation / Guide de bonne pratique** : Jusqu'à il y a environ 10 ans, il n'existait pas de guide de dimensionnement normatif sur ce sujet. Aujourd'hui cependant, le Model Code, recommandations éditées par la Fédération de l'Industrie du Béton, est la référence lorsque l'on souhaite dimensionner ce type de structure.

### 1 La fabrication du béton

- Équipement spécifique pour séparer correctement les fibres puis les mélanger au béton de façon homogène et constante,
- Mode de transport et d'installation du béton fibré doit prendre en compte les fibres pour éviter les agrégations,
- Contrôle de l'usure de tous les équipements en contact avec les fibres (lames, convoyeurs, joints, etc.),
- Essais spécifiques (en plus de ceux réalisés sur un béton classique) : teneur en fibres, évaluation de leur distribution dans le béton, etc. (et coûts associés) ;

### 2 Interdiction d'utiliser des fibres structurales en France en zone sismique modérée (3) ou plus ;

### 3 Diminution de l'ouvrabilité du béton : Ajout de superplastifiant recommandé ;

### 4 Coût plus élevé qu'un béton ordinaire

### 5 Difficultés complémentaires lors démantèlement/démolition de la structure.



## ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE

- Le domaine d'application des différents procédés et produits
- L'utilisation de béton fibré nécessite des études particulières et doit être anticipé.

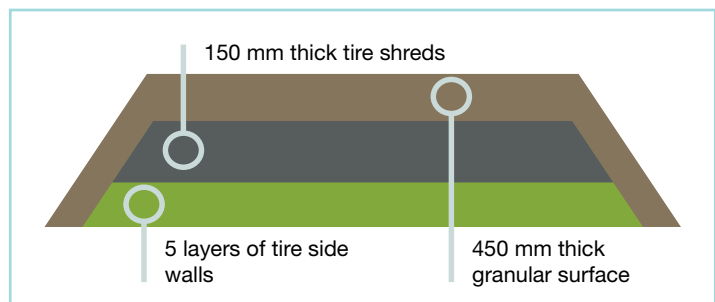
## RÉFÉRENCES

- [www.guidebeton.com](http://www.guidebeton.com)
- La Fédération de l'Industrie du Béton - Produits en béton ([fib.org](http://fib.org))

## UTILISATION DES AGRÉGATS À BASE DE PNEUS RECYCLÉS (ABPR) EN GÉNIE CIVIL

### PRINCIPE

Des pneus usés sont déchiquetés et traités pour produire des agrégats de taille comprise entre 12 et 305 mm ayant des propriétés intéressantes pour des applications dans le génie civil, tel que des remblais pour : des lignes ferroviaires pour la réduction des vibrations, la couverture et le drainage des décharges, les murs de soutènement, les chaussées, etc.



### BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL

- **Empêcher la mise en décharge de milliards de pneus** : la valorisation d'environ 1,5 milliards de tonnes de pneus usés produits chaque année permettrait d'éviter les risques de contamination des eaux et du sol, d'incendie, émissions du CO<sub>2</sub>, du SO<sub>2</sub>, NO... liés à leur mise en décharge ;
- **Plus de ressources disponibles donc une baisse de consommation des ressources naturelles via le recyclage**
- **Une alternative moins coûteuse aux remblais traditionnels** : réduction des pressions interstitielles au sein des ouvrages, une meilleure résistance au cisaillement et déformation élastique à moindre coût (à nuancer cependant, au cas par cas).
- **Une résistance sismique plus importante** : pour les murs de soutènement, les ABPR offriront une meilleure stabilité dynamique (dans les zones à sismicité élevée) ainsi qu'une réduction du mur par rapport aux remblais traditionnels.
- **Une meilleure alternative pour des remblais sur sols compressibles** : réduction du tassement avec leur poids volumique faible : jusqu'à 50% de réduction des contraintes verticales (E.J. Hoppe, .al, 1994).
- **Existence de réglementation** : en France, la filière a été encadrée en droit français par le décret du 24 décembre 2002, en plus de la directive européenne du 26 avril 1999.

### POINTS D'ATTENTION & LIMITES

Même si les ABPR ont des applications assez importantes et sûres pour les projets de génie civil, il y'a tout de même quelques limites à prendre en compte à leur utilisation :

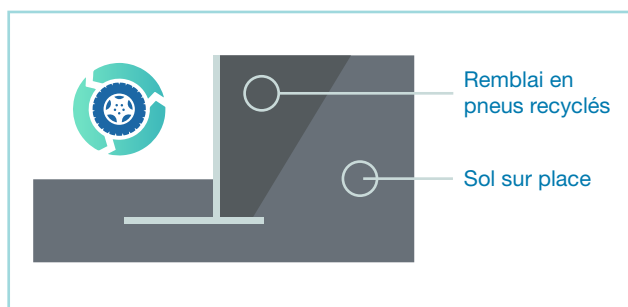
- **Risques d'auto-combustion** : conservation de leur composition après transformation donc leur combustibilité. Il y aurait risque d'incendie lorsque la température interne dépasse 185° dans la couche en ABPR (M. Arroyo, .al 2011),

# FICHE PRATIQUE DE SOLUTION GÉOTECHNIQUE RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT

- **Risques d'infiltration de substances chimiques dans les eaux** : bien qu'elle soit faible, la lixiviation des ABPR peut entraîner une contamination des eaux non négligeable en fonction de la nature du site (êtres humains ou poissons) – plusieurs études pour pallier ce phénomène sont en cours (utilisation de filtres, lits bactériens, etc. → site de l'ADEME). La solution devra être adaptée à la nature et la fonction de l'ouvrage, ainsi qu'au contexte hydrogéologique
- **Risques humains** : les particules en suspension représentent un risque, notamment dans les installations de broyage ;
- **Absence de normes régissant le dimensionnement des ouvrages à base des ABPR.**

## ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE

- **La disponibilité des ressources** à l'échelle locale (matières premières et unités de transformations)
- **Le respect des normes sanitaires** pendant les phases de recyclage
- **La pertinence des essais permettant la validité des caractérisations mécanique des ABPR**
- **Les caractéristiques du site** (conditions météorologiques, niveau de la nappe, etc.)



## RÉFÉRENCES

- Amirkhanian, A., & Skelton, E. (2021). Tire-derived aggregate applications in civil engineering. In *Tire Waste and Recycling* (pp. 565-578). Academic Press.
- Liu, L., Cai, G., Zhang, J., Liu, X., & Liu, K. (2020). Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled waste tire-sand/soil in geotechnical engineering:
- H. El Naggar, A. Marlin, D. Dennis, Lessons learned from the construction of Kelly Lake TDA embankment, in: *World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*,
- E.J. Hoppe, *Field Study of Shredded-Tire Embankment*, Tech. Rep., 6, 1994
- Shalaby, A., & Khan, R. A. (2005). Design of unsurfaced roads constructed with large-size shredded rubber tires: a case study. *Resources, conservation and recycling*, 44(4), 318-332
- Aliapur | Collecte et recyclage de vos pneus : éco-organisme spécialisé dans la collecte et le recyclage de pneus usagés en France.

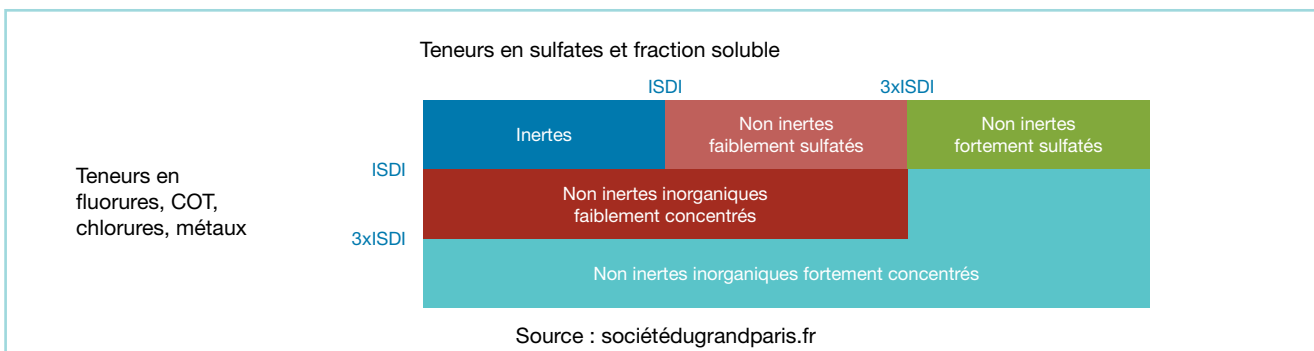
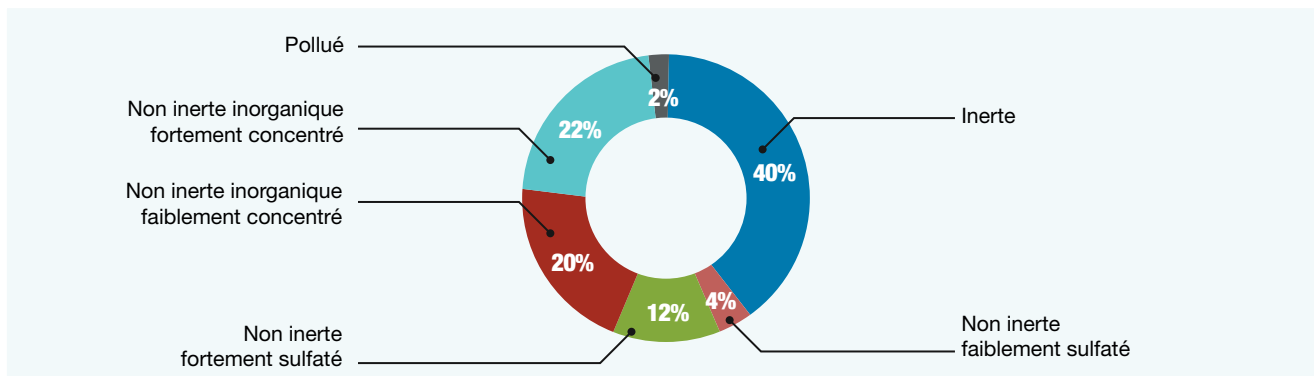
## VALORISATION DES DEBLAIS

### PRINCIPE

La valorisation des déblais issus de la démolition, ou d'excavations, nécessite plusieurs étapes :

- 1 La reconnaissance préalable des sols** : permet de mieux gérer les déblais une fois excavés (anticipation des problématiques). La réutilisation sur site des terres excavées nécessite une bonne connaissance géotechnique des matériaux concernés :
  - Sensibilité à l'eau
  - Portance
  - Traficabilité des matériaux
  - Etc.
- 2 Construction / excavation** : optimisation du projet à chaque phase d'étude.
- 3 Tri et contrôle**, indispensables pour certaines voies de valorisation
- 4 Le transport** : Définition des scénarios logistiques pour chaque site de production (fluvial, ferré, routier).
- 5 Destination / Valorisation** : les déblais sont traités pour avoir les propriétés requises pour la réalisation des opérations telles que les remblaiements de tranchées, le nivellement de support de voies, de plates-formes, les aménagements paysagers etc.

Ci-après, un exemple, sur le projet du Grand Paris Express (GPE), de la répartition par type de déblai. Il s'agit cependant d'une approche assez spécifique au GPE, très orientée vers la mise en centre de stockage plutôt que vers la valorisation.



NB : D'autres filières de valorisation existent : granulats pour béton pour les roches dures, les formations alluvionnaires par exemple, industrie minérale pour des lithologies spécifiques (cimenterie, argiles calcinées, terres crues ou cuites...)

## BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL

- Réduction des déblais mis en décharge et amélioration du taux de réutilisation des déblais (évalué à ce jour d'au moins 5 à 10%) ;
- Réduction du besoin de prélèvement des ressources naturelles ;
- Diminution du transport routier des déblais/remblais et ses inconvénients (trafic, pollution, bruit, etc.) ;

### ■ Possibilités diverses d'utilisation :

- Briqueterie
- Remblais courants
- Graves/sables
- Production de ciments
- Sous-couche routière
- BTP
- Aménagement de carrières



- Réplicabilité : Le réemploi des déblais en remblais est une pratique relativement facile à mettre en œuvre notamment sur site.

## POINTS D'ATTENTION & LIMITES

- **Traçabilité** des déblais ;
- Liées au **transport** :
  - En fonction de leur provenance (des déblais issus d'un creusement traditionnel seront plus facile à transporter que ceux issus des parois moulées) ;
  - Empreinte carbone liée au transport des déblais utilisés hors site (principalement routier) ;
- **Hétérogénéité des matériaux** ;
- **Problème de traitement** pour certains déblais ;
- **Capacité de stockage** souvent limitée sur les sites où ils sont produits ;
- Nécessité importante d'analyses (jusqu'à une **analyse** pour 150 à 200 tonnes), de contrôle et durée des circuits de validation.

## ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE

- Le niveau de recyclabilité ;
- Disponibilité des unités de valorisation ;
- Distance entre lieu de production et lieu d'utilisation ;
- La pertinence des essais de caractérisation des déblais ;
- Connaissance de leurs caractéristiques de réutilisation par rapport aux autres matériaux
- Éventuels liants nécessaires pour rendre ces déblais aptes (chaux, ciment...).



## RÉFÉRENCES

- ARCADIS. (2017). Gestion des déblais excédentaires en dehors des contaminations concentrées ;
- Éco-chantiers. (s.d.). eco-chantiers.com. Récupéré sur Technique de réemploi des sols en place en remblais de tranchée : Grand Paris express. (2019, 07 17) ;
- Groupe de travail composé de UNICMCIDF, S. (2003). Valorisation des excédents de déblais de travaux publics ;
- <http://materrio.construction>;
- Ministère de la transition écologique et solidaire. (2019). Plan national de gestion des déchets ;
- Société du Grand Paris. (2017). Schéma de gestion et de valorisation des déblais.

## ACTIONS SUR LA NAPPE DANS LES TRAVAUX

### PRINCIPE

La réalisation d'ouvrages géotechniques peut nécessiter des actions sur la nappe et principalement des actions de rabattement pour permettre :

- de réaliser des ouvrages enterrés au sec,
- d'éviter la stagnation et les infiltrations de l'eau, dans la chaussée et/ou le sol support d'un ouvrage,
- de stabiliser des masses instables.

Les rabattements peuvent être soit permanents soit provisoires pendant tout ou partie des travaux.

Les solutions de rabattements de nappes sont multiples. Les critères qui influent sur le choix d'une solution sont :

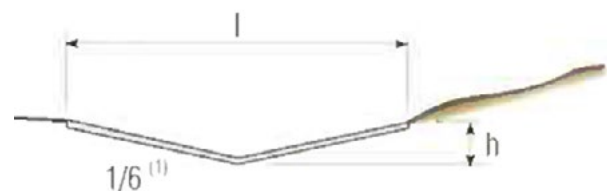
- l'existence et les caractéristiques de l'exutoire,
- les caractéristiques du sol support et sa perméabilité,
- l'environnement hydrique (bassin versant, aquifères...)
- les caractéristiques du projet.

### BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL

D'un point de vue bilan carbone, les solutions de rabattement ne nécessitant pas d'énergie sont naturellement plus avantageuses. Par conséquent on cherchera dans un premier temps à rabattre la nappe de manière gravitaire à la faveur de la pente et d'un exutoire aval.

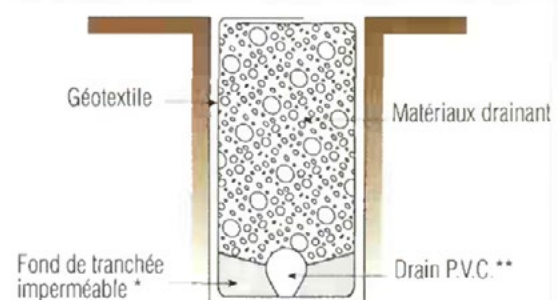
#### Fossé superficiel revêtu

Evacuation gravitaire des eaux superficielles



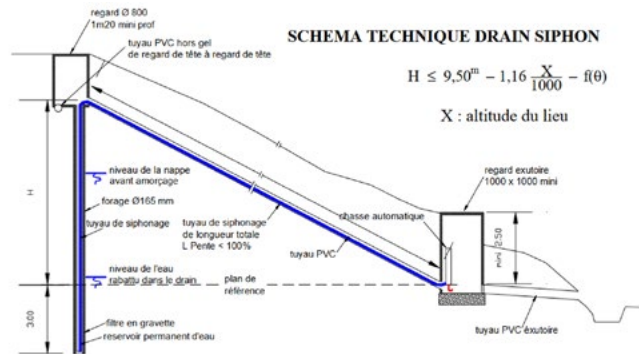
#### Tranchée drainante gravitaire

Bien adaptée pour des débits d'eau interne importants (rabattements, nappe, sources,...) et de faibles linéaires.



## Tranchée drainante gravitaire

Bien adaptée pour des débits d'eau interne importants (rabattements, nappe, sources,...) et de faibles linéaires.



Suivant l'ouvrage et ses caractéristiques, on peut aussi envisager la mise en œuvre :

- de drains subhorizontaux,
- de puits perdus
- de drains de décharge de la nappe.

**Si le rabattement gravitaire n'est pas envisageable, les solutions de rabattement de nappe nécessiteront une consommation d'énergie. Elles peuvent être :**

**Par pompage direct** au moyen de pompes de surfaces ou pompes immergées dans des puits. Pompes inadaptées aux faibles débits.

- Pompes à membranes
- Pompes submersibles
- Pompes de surface

## Par dépression (pointes filtrantes)

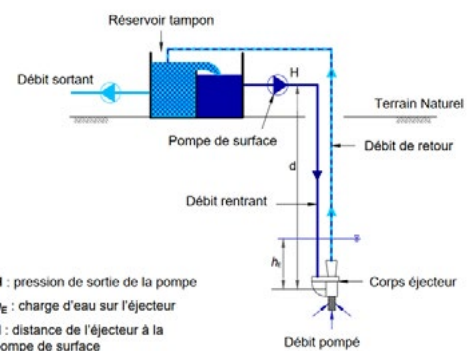
Rabattement limité à 6m environ par rapport à la position de la pompe à vide.



## Par éjecteurs

Permettant de pomper dans des niveaux à  $10^{-7}$ m/s

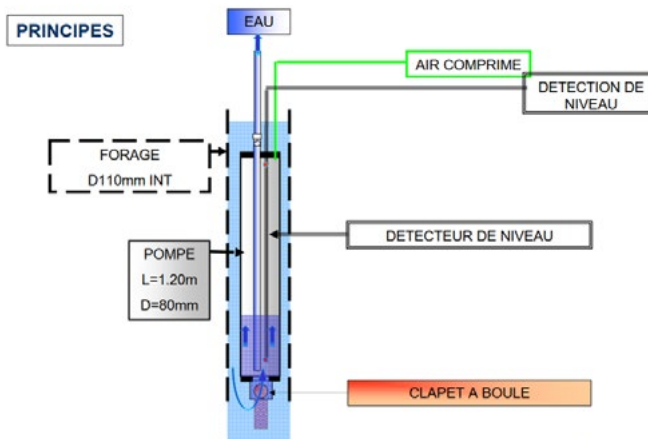
### Schéma d'un éjecteur unique



# FICHE PRATIQUE DE SOLUTION GÉOTECHNIQUE RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT

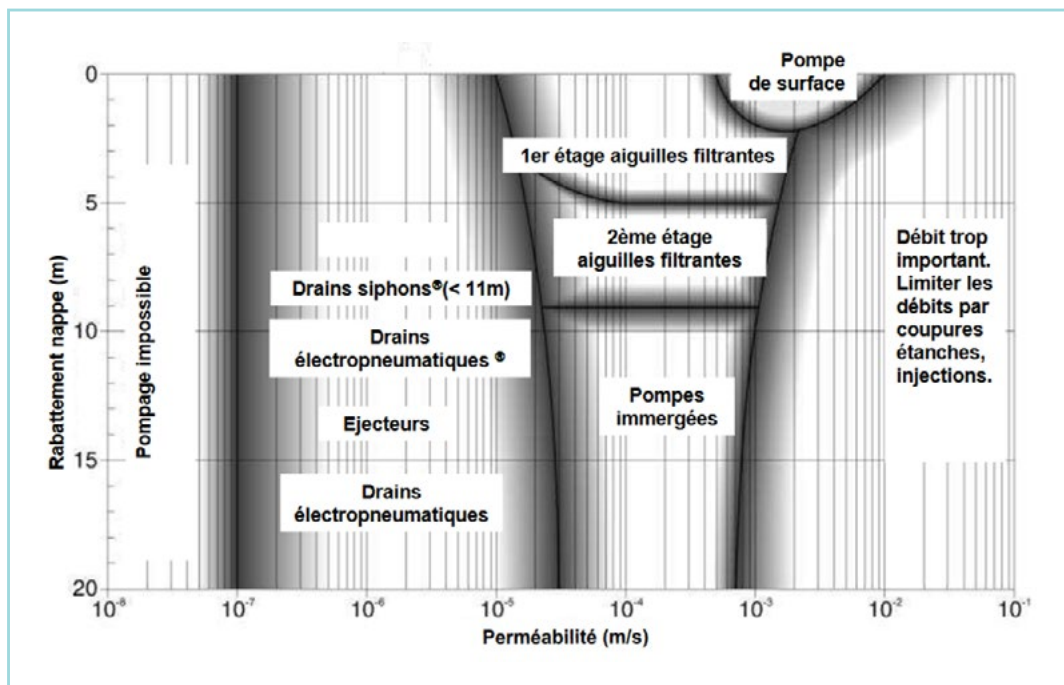
## Par drains électropneumatiques®

Permettant le rabattement de nappe jusque 40m pour terrain de perméabilité inférieure à  $10^{-5}$  m/s nécessitant une énergie électrique et pneumatique.



## POINTS D'ATTENTION & LIMITES

Le graphique suivant donne les domaines d'application des différentes techniques de pompage en fonction de la perméabilité des sols et de la profondeur de rabattement de nappe souhaitée.



NB : Les coupures étanches et injections peuvent être nécessaires même pour des formations entre  $10^{-5}$  et  $10^{-2}$  m/s. Pour les drains siphons, il faut également prendre en compte le risque de désamorçage.

# FICHE PRATIQUE DE SOLUTION GÉOTECHNIQUE RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT

Dans le tableau suivant sont résumées les différentes techniques de drains ou puits verticaux pompés :

	AIGUILLES FILTRANTES	PUITS	EJECTEURS	DRAINS SIPHON®	POMPES ÉLECTRO- PNEUMATIQUES®
<b>Profondeur (m)</b>	6	100m	50	11	100m
<b>Débit (l/s)</b>	0 à 1	1 à 50	0 à 1	0 à 0,3	0 à 1
<b>Débit (m³/h)</b>	0 à 3	3 à 150	0 à 3	0 à 1	0 à 3
<b>Espacement (m)</b>	1 à 3	10 à 30	2 à 10	2 à 5	2 à 10
<b>Vide</b>	Par construction	Possible par système additionnel	0,8 bar		
<b>Rendement</b>	50%	80%	15%	Pas de consommation	40 à 60%

## ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE

Dans la conception des ouvrages, on privilégiera alors un rabattement de nappe provisoire pendant la durée des travaux.

La solution la moins vertueuse d'un point de vue bilan carbone est celle d'un pompage permanent au moyen de solutions mécaniques énergivores.

Le drainage gravitaire sans énergie est en général l'action sur la nappe la plus vertueuse. Vient ensuite le rabattement provisoire par pompage pendant la phase travaux. Généralement, le rabattement définitif pendant la durée de vie de l'ouvrage est une action peu favorable ; mais ce n'est pas toujours le cas, par exemple en cas d'ouvrages très profonds et calés dans des argiles plastiques (avec débits résiduels très faibles), à comparer, pour la reprise des sous pressions, à un radier, avec ou sans micropieux travaillant en traction.

## RÉFÉRENCES

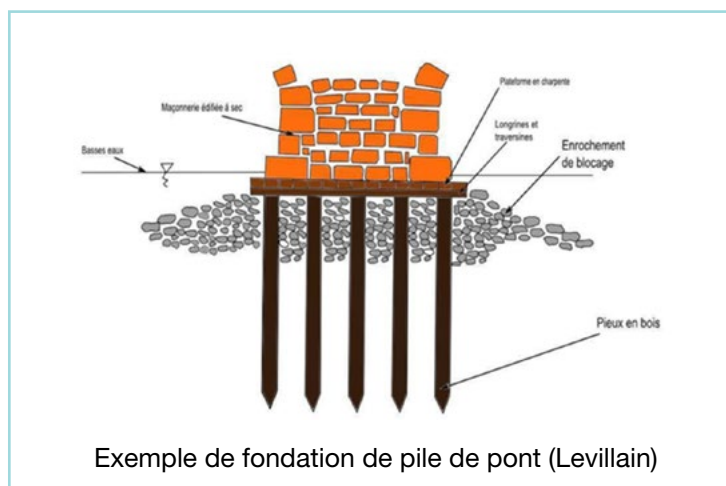
- <https://www.geotechnique-journal.org> : Note technique : Le drainage profond pour la stabilisation des glissements de terrain par drains siphons® et drains électropneumatiques®
- Innovations récentes dans le domaine du drainage profond - Jean-Claude GRESS Ingénieur civil des Ponts et Chaussées, Professeur à l'ENTPE
- SETRA : Méthodologie pratique et efficace de recherche de solutions d'assainissement et de drainage



## FONDATEMENTS PAR PIEUX BOIS

### PRINCIPE

Remplacer les ouvrages de fondations profondes en béton armé ou en acier par des pieux bois. Cette technique utilisée jusque dans le milieu du 19ème siècle, a été abandonnée au profit de ces nouveaux matériaux (pieux forés en béton notamment).



### BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL

- Utiliser une ressource écologique, durable et renouvelable
- Limiter l'empreinte carbone par :
  - l'utilisation d'une production locale, raisonnée et adaptée (certification pour l'exploitation)
  - la réduction de l'extraction et l'exploitation des sols pour la confection de béton
  - l'importation d'acier pour les cages d'armatures
  - le poids des ouvrages de fondations plus faible
- Mise en place par refoulement de sol, limitant les problématiques liées à l'évacuation des déblais
- Solution présentant un prix réduit par rapport à l'emploi de matériaux aujourd'hui d'usage courant (béton armé).

### POINTS D'ATTENTION & LIMITES

Les essences utilisées sont fonction de caractéristiques (NF EN 338) et de l'environnement.

Cette solution est généralement adaptée des ouvrages présentant de faibles descentes de charges (maisons, petits bâtiments) et des ouvrages maritimes et fluviaux, du fait de la limitation en diamètre et en profondeur (aboutage de pieux).

Le traitement du bois hors nappe phréatique est indispensable.

Lorsque que les pieux sont soumis à un battement de nappe (naturel ou lié à des travaux de rabattement), leur durabilité peut être réduite. Il est souvent nécessaire de prévoir le traitement du bois lors de la conception et/ou lors du contrôle en cours de vie de l'ouvrage.

## ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE

Le contexte géotechnique doit être adapté au battage ou au fonçage.

Le diamètre des pieux bois est généralement compris entre 20 et 35 cm, et leur longueur entre 4 et 12 m sans aboutage.

## RÉFÉRENCES

- Projet Pieux Bois 2012-2013 – Proposition d'une méthode de dimensionnement des pieux en bois à partir des caractéristiques pressiométriques des terrains – IFSTTAR.
- Essais de chargement statique de pieux en bois instrumentés avec des extensomètres amovibles – IFSTTAR/TERRASOL/SETRA 2013
- Système de fondations sur pieux bois : une technique millénaire pour demain – Thèse de Jérôme Christin – Sept 2013.
- Timber Pile Design Construction Manual – American Wood Preservers Institute.

## **RÉUTILISATION EN PLACE DE FONDATIONS EXISTANTES**

### **PRINCIPE**

Il est de pouvoir réutiliser des fondations existantes pour un nouvel ouvrage, construit en lieu et place de l'ouvrage existant, démolé ou non, et fondé sur les fondations originelles. Les fondations existantes sont conservées en l'état, élargies, ou reprises en sous-œuvre.

Les domaines d'application sont multiples, par exemple :

- surélévation d'un bâtiment
- réutilisation de pieux
- repowering d'un parc éolien, avec conservation des fondations existantes, élargies ou non en fonction des nouvelles descentes de charge
- adaptation des fondations de pylônes à des descentes de charge réévaluées en fonction des modifications des hypothèses climatiques.

### **BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL**

La réutilisation évite les travaux de déconstruction des fondations existantes ainsi que le traitement des matériaux extraits. Elle évite également les travaux de construction de fondations neuves, sauf ceux d'adaptation et de renforcement.

### **POINTS D'ATTENTION & LIMITES**

La réutilisation de fondations existantes nécessite :

- de bien connaître leur géométrie et leur constitution
- de bien connaître également l'état des matériaux
- d'évaluer la fatigue et le compactage du sol sous l'action des fondations existantes
- d'évaluer également la fatigue des matériaux.

### **ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE**

- géométrie et nature des matériaux constitutifs des fondations existantes (plans « tel que construit », études géotechniques existantes, notamment de suivi d'exécution, reconnaissances de fondation par fouilles de découverte, carottages, méthodes géophysiques etc...)
- descentes de charge initiales et projetées
- études géotechniques complémentaires et adaptées au nouveau projet
- si besoin essais de chargement

