Le renforcement des sols : des techniques devenues indispensables

Auteurs :
VILLARD Pascal, Professeur des Universités, Laboratoire 3SR (Sols, Solides, Structures et Risques), IUT1 de Grenoble, UGA (Université Grenoble Alpes)
BRIANÇON Laurent, Maitre de Conférences au laboratoire SMS-ID de l'INSA de Lyon – Directeur du LabCom PITAGOR

30-10-2018

Grâce à des techniques innovantes, il est désormais possible de construire sur tous types de sols. Du simple ouvrage à la prouesse architecturale, le savoir-faire des ingénieurs est mobilisé pour analyser, étudier, renforcer et consolider les sols. Le géotechnicien sonde et détermine les caractéristiques des sols afin de concevoir, au sein de bureaux d'études, les fondations des ouvrages. Le renforcement des sols même s'il est généralement invisible est la pierre angulaire de tout ouvrage construit sur un sol aux caractéristiques mécaniques médiocres. Les développements technologiques actuels en matière de renforcement des sols s'orientent vers des solutions techniques plus économes et plus respectueuses de l'environnement.

L'aménagement de sol de qualité médiocre est de plus en plus nécessaire, compte tenu de la croissance de l'humanité et de ses activités. Certains types de sol, jusque-là délaissés, car présentant des caractéristiques mécaniques faibles, doivent être renforcés pour assurer la stabilité des édifices et des infrastructures de génie civil qu'ils sont appelés à porter. Peu visibles pour le profane car enfouies dans le sol, **les techniques de renforcement sont très largement répandues** et nous entourent au quotidien (fondations, murs de soutènement, remblais routiers, voies de chemin de fer, etc.). Plus qu'un défi technologique, la réalisation d'infrastructure dans les zones classifiées inconstructibles, **représente un réel enjeu stratégique, économique et environnemental** dans de nombreux cas courants comme :

pour construire une ligne à grande vitesse (LGV) dans une zone de sol compressible, lorsque ceci est économiquement plus avantageux que de détourner la ligne (par exemple, LGV SEA traversant la Dordogne),

pour installer des entrepôts dans une zone portuaire dans laquelle les sols sont souvent très compressibles de par la géologie

côtière (par exemple, Port du Havre),

pour construire un aéroport sur une ile artificielle en milieu marin (par exemple, aéroport de Kobe au Japon).

1. Des techniques adaptées à la complexité du sol et à chaque domaine d'utilisation

Les sols, sont des matériaux complexes constitués **d'un squelette minéral** plus ou moins compact présentant une porosité naturelle **où l'air et l'eau circulent librement**. Les grains du sol proviennent de la fragmentation plus ou moins grossière de la roche en cailloux, gravier, sable ou limon, mais aussi de la décomposition chimique de certains composés de la roche en particules microscopiques d'argile. Dans les sols perméables, comme les cailloux, les graviers et les sables, l'eau circule facilement. Ce n'est pas le cas dans les sols peu perméables voire imperméables, comme le limon et l'argile. L'eau circule ainsi 1 million de fois moins vite dans l'argile que dans le gravier. Par ailleurs, suite à des sollicitations extérieures telles que des venues d'eau, des périodes de sècheresse ou des séismes, les caractéristiques mécaniques des sols peuvent évoluer et ne plus être adaptées à l'usage qui leur était destiné.

Suivant le type de sol considéré et le type d'ouvrage à réaliser, il convient de retenir **une solution de renforcement adaptée** qui s'accorde à la fois à la nature du sol en place et à son environnement. Le problème reste d'une grande complexité comme en témoigne les vestiges du passé (tour de Pise par exemple). **Deux techniques majeures** peuvent être utilisées pour accroître les caractéristiques mécaniques des sols : par **la modification de la structure interne du sol** en place et **le renforcement du sol** par ajout d'inclusions. Plus spécifiquement, les techniques d'amélioration des sols permettent d'accroître la compacité du sol en place, soit en réduisant le volume des vides, par exemple en appliquant une surcharge sur un sol saturé et en le laissant tasser par expulsion de l'eau en surpression, on parle dans ce cas de consolidation des sols, soit en imposant des vibrations dans le sol pour qu'il se densifie par réarrangement des grains (compatage dynamique). Les techniques de renforcement des sols proprement dites font intervenir des éléments de renfort verticaux ou horizontaux dans le sol. L'objectif de toutes ces techniques est de permettre la construction d'un ouvrage sans qu'il n'y ait de déformations excessives en surface ou des défauts de stabilité.

2. Des solutions diverses et variées

Figure 1. Renforcement du sol en place. a) Inclusions rigides [Source : © Photothèque Keller] b et c) Renforcement des fondations du grand Palais [© Photothèque Solétanche Bachy].

De tout temps les techniques de renforcement des sols ont été utilisées, que ce soit pour renforcer les sols en place (Figure 1) par **l'ajout d'inclusions** verticales battues ou foncées dans le sol, ou pour réaliser des massifs de soutènement (Figure 2) par utilisation de sols remaniés et renforcés par **des armatures horizontales** (bandes, nappes, structures alvéolaires, etc.) ou par des fibres courtes ou continues.

2.1. Renforcement du sol en place

Figure 2. Renforcement des massifs de soutènement. (a) Mur renforcé par géosynthétiques ; (b) renforcement par géogrilles ; (c) Renforcement par nappes géotextiles ; (d) Renforcement par structures alvéolaires (procédé Armater [1]) et (e) renforcement par bandes géotextiles.

Les plus anciennes techniques de renforcement des sols en place reposent sur l'utilisation de pieux en bois destinés à répartir ou à transmettre la charge apportée par l'ouvrage vers des zones de sols plus étendues ou plus résistantes. En France, des fouilles à proximité du village de Benais (Indre-et-Loire) ont permis de relever au travers d'une vallée humide, et sur une longueur d'environ 200 m, les vestiges d'une chaussée romaine datant de l'an 8 avant J.C. L'assise carrossable était faite d'un empierrement de "perrons" (pierres siliceuses) épais d'une trentaine de centimètres. Les pierres étaient disposées de chant, et entre celles-ci, des pieux profondément enfouis dans le substrat sableux ont été utilisés. Au total 27 pieux ont pu être dénombrés, dont certains étaient encore associés à l'empierrement. Ces pieux de chêne mesuraient en moyenne 1 m de long et 30 cm de diamètre. Leur pointe avait été biseautée afin de faciliter leur enfoncement. Il a même été retrouvé une concentration de 3 alignements de 2 pieux, espacés les uns des autres de 1,60 m à 1,70 m, qui témoigne des pratiques innovatrices de l'époque concernant l'emploi d'éléments verticaux rigides, fichés dans le sol selon un espacement régulier, et associé à une couche d'empierrement subjacente permettant une redistribution des charges appliquées à la chaussée sur la tête des éléments verticaux d'une part et sur le sol entre ceux-ci d'autre part. Cet exemple illustre le principe actuel de tous les ouvrages sur sol renforcé **associant un réseau régulier d'inclusions rigides verticales et une couche granulaire horizontale** formant le matelas de répartition.

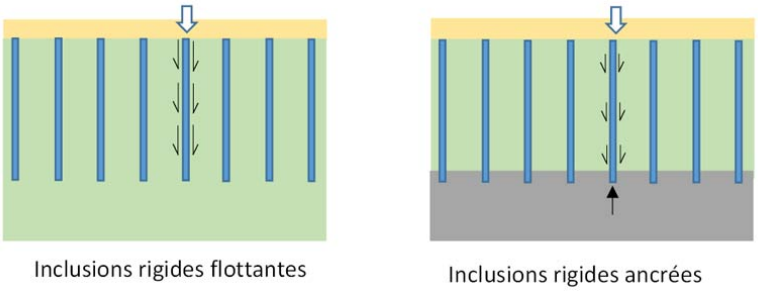

Figure 3. Système d'inclusions rigides flottantes et ancrées.

Suivant l'épaisseur de la zone de sol compressible concernée, les pieux peuvent être soit ancrés en pied dans une couche de sol résistante lorsque l'épaisseur de sol de qualité médiocre est faible, auquel cas les efforts en tête de pieu sont directement transmis via le pieu vers la zone stable (pieux ancrés), soit de longueur suffisante pour transmettre par frottement sur toute sa longueur l'intégralité des charges appliquées en tête du pieu par l'ouvrage (Figure 3).

Ces techniques de base ont évolué vers de nombreuses variantes qui ont toutes comme objectif de réduire sensiblement les tassements de surface du sol en place, telles que :

Inclusions rigides de béton, réalisées en insérant dans le sol une tarière refoulante (par rotation ouvibrofonçage) jusqu'à la couche de sol porteur et en injectant gravitairement par le pied de l'outil le béton lors de la remontée de l'outil,

Colonnes ballastées, incontestablement les plus souples, constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactées par passes successives,

Colonnes de Jet Grouting, réalisées en déstructurant le sol en profondeur à l'aide d'un jet haute pression dans un forage et en mélangeant le sol érodé avec un coulis auto-durcissant pour former des colonnes dans le terrain,

Colonnes de Soil Mixing, réalisées par malaxage entre le sol en place et un liant (voie séche) ou un coulis (voie humide) formant une colonne verticale cylindrique.

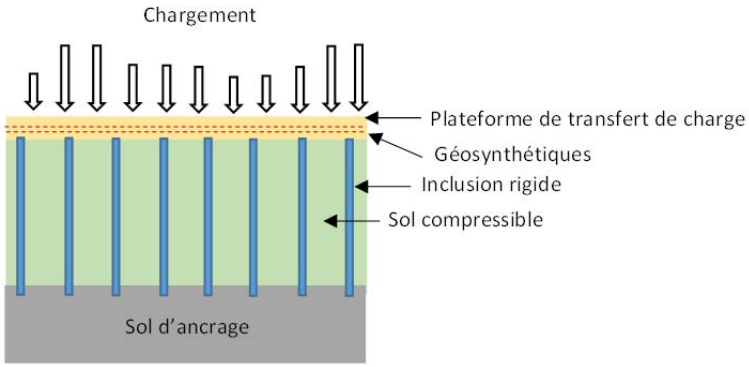

Figure 4. Principe de fonctionnement des inclusions rigides.

Enfin les techniques actuelles qui rencontrent un réel succès car économiques ou faciles de mise en œuvre sont les techniques dites **par inclusions rigides** dont l'efficacité est améliorée par la présence d'une plateforme granulaire renforcée ou non par des nappes de renforcement disposées sous l'ouvrage. Cette technique permet de limiter à des valeurs raisonnables les charges verticales transmises au sol compressible, de rediriger via des mécanismes de transfert de charge les charges verticales apportées par l'ouvrage vers les pieux tout en minimisant les composantes horizontales de la charge pouvant nuire à l'intégrité des pieux (Figure 4).

D'un point de vue environnemental, ces solutions sont intéressantes car elles ne nécessitent pas d'excavation du sol en place réduisant ainsi la pollution liée au transport des matériaux et le risque de déplacer des sols pollués. L'apport de nappes géosynthétique dans les plateformes granulaires réduit leur épaisseur et donc le besoin en matériaux « nobles ».

2.2. Renforcement des sols de remblaiement

Le renforcement des sols de remblaiement par des éléments intrusifs mixés au sol ou disposés en couches alternées, n'est pas nouvelle puisque déjà en -2100, en Mésopotamie, des constructions artificielles, les ziggourats, dont la réalisation requérait un énorme effort en matériau et en main-d'œuvre, étaient renforcées par des tissés de paille. La première ziggourat, construite à Ourouk, servit de modèle à toutes les tours à terrasses qui furent élevées en Mésopotamie pendant des dizaines de siècles. La mieux conservée est celle d'Our (fin du IIIe millénaire). Depuis, il y a eu de nombreuses évolutions dans les techniques de renforcement notamment grâce à l'utilisation de nouveaux types de renfort.

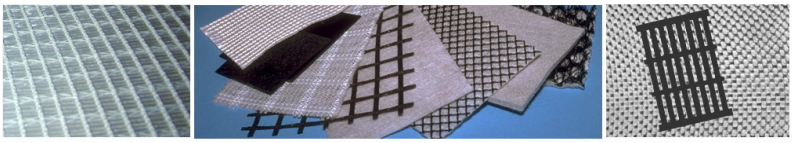

Figure 5. Exemples de géosynthétiques.

C'est sur une plage, en 1957, que l'inventeur français de la **Terre Armée** [2], Henri Vidal, fit une constatation : quand on marche sur un tas de sable, il s'affaisse et les grains s'éparpillent dans tous les sens, mais quand on y insère des rangées d'aiguilles de pin,

l'ensemble reste stable même si on le sollicite fortement en marchant dessus par exemple. Henri Vidal développa cette idée pour mettre au point une nouvelle technique de construction de murs de soutènement qui s'est par la suite diversifiée sous la forme :

D'un renforcement par armatures plates, métalliques (Terre Armée) ou synthétiques disposées horizontalement et à intervalles réguliers.

D'un renforcement par nappes géosynthétiques (Figure 5).

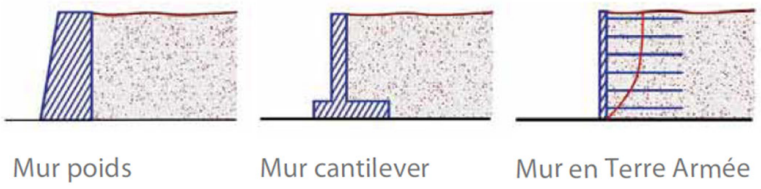

Figure 6. Évolution des murs de soutènement.

Dans les deux cas le parement vertical n'a pas de fonction de soutènement mais assure une protection vis-à-vis de l'érosion. Notons que la stabilité de l'ouvrage est assurée par les armatures qui s'opposent par traction à la déformation du massif du sol et que la mise en tension des armatures se fait grâce au frottement entre les éléments de renfort et le sol. Ce type de soutènement est en soit révolutionnaire de par sa conception puisque c'est le sol renforcé qui assure sa propre stabilité ; il n'y a donc pas la nécessité de réaliser un mur de soutien qui sert de butée au massif de sol – Mur poids ou mur cantilever (Figure 6).

Figure 7. (a) Stabilisation d'un glissement de terrain [Source : © Photothèque Hueske] ; (b) Mur de soutènement à parement rigide ; (c) Mur de soutènement à parement souple [Source : © Photothèque Huesker].

Ces techniques sont largement employées car elles permettent de limiter l'emprise de l'ouvrage au sol et s'appliquent avantageusement aux terrains accidentés et difficiles d'accès (Figure 7). La géométrie modulaire de ces ouvrages leur permet de s'intégrer harmonieusement dans le paysage ; une végétalisation de certains parements est possible, rendant leur présence quasi-indétectable.

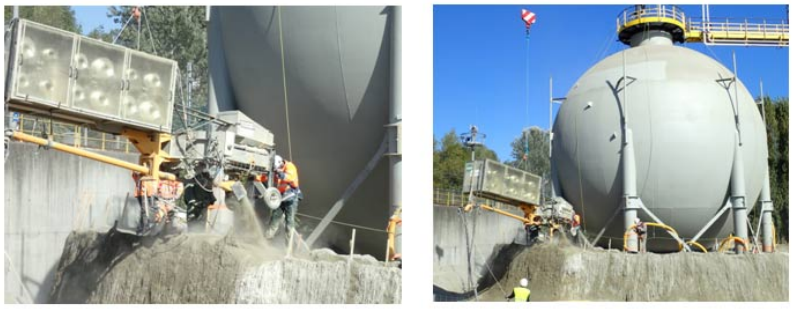

Figure 8. Protection d'un réservoir de gaz par un massif de sable renforcé par des fibres continues – Procédé Texsol [3] [Source : © Photothèque J.P. Gourc].

Par ailleurs, des fibres courtes ou continues sont parfois mais plus rarement utilisées pour renforcer les massifs de sol (Figure 8). Elles sont mélangées de façon homogène dans le sol et jouent localement le rôle de renfort. De par la capacité du mélange sol/fibre à dissiper de l'énergie, cette technique est utilisée, entre autre, pour limiter les dommages qui pourraient survenir suite à l'explosion d'un réservoir de gaz. Là encore la mise en tension des éléments de renforcement est possible grâce au frottement entre les fibres et les grains ou par enserrement des grains dans le cas des fibres longues.

3. Des mécanismes complexes qui entrent en jeu

En fait ces techniques de renforcement font appel à des mécanismes d'interaction entre le sol et les renforts qui sont complexes et qui requièrent certaines hypothèses simplificatrices pour être modélisés par des calculs analytiques ou numériques. Rappelons que la zone d'interface entre le sol et le renfort est le vecteur privilégié qui permet la transmission des efforts du sol au renfort, une interface totalement lisse se traduisant par un non-transfert des efforts et donc à un renforcement nul.

Que peut-on dire de **l'interface** ? C'est une zone sans épaisseur ou de l'épaisseur de quelques grains où les efforts induits dans le sol sont transmis au renfort. Pour que le frottement maximal soit mobilisé à l'interface il faut générer un déplacement relatif significatif entre le renfort et le sol (d'au moins quelques millimètres voir quelques centimètres suivant les matériaux en présence). La rugosité de l'interface influe sur l'intensité des efforts pouvant être transmis. Le plus souvent un angle de frottement dit angle de frottement de Coulomb est utilisé pour caractériser l'interface. Alterner des cycles de chargement (déplacements relatifs positifs ou négatifs) modifie l'intensité et la direction des efforts d'où la difficulté de prévoir l'efficacité du renforcement lors de sollicitations cycliques (effets du vent sur une éolienne, passages répétés de véhicules ou de trains, cycle de gel/dégel, cycle de gonflement/retrait des sols, etc).

Que peut-on dire **des inclusions** ? Si leur rôle est évident, celui de renforcer le sol, leur mode d'action est parfois complexe et très différent d'un renfort à l'autre. Les fibres et les nappes géosynthétiques sont sollicitées essentiellement par des efforts de traction (pas de compression ni de flexion). Les renforts de type géogrilles qui présentent une certaine rigidité en flexion acceptent des efforts de traction mais également de flexion (effort perpendiculaire au plan de la géogrille). Les renforcements verticaux de type pieux sont quant à eux sollicités essentiellement par des efforts de compression même si des efforts horizontaux sont dans certaines techniques tolérés.

Quant au sol lui-même son comportement dans le temps peut s'avérer complexe. Il s'y développe par exemple des mécanismes de transfert de charge des zones faibles vers les zones plus résistantes. On parle d'effet voûte au-dessus des réseaux de pieux.

4. Des techniques de pointes toujours en voie de développement

L'optimisation de ces techniques et la réduction des coûts de réalisation reste une problématique qui mobilise les chercheurs dans le monde entier. Les techniques récentes, les nouveaux matériaux de renforts, l'évolution des conditions climatiques et des sols sont autant d'éléments nouveaux qu'il faut sans cesse reconsidérer. Bien heureusement les moyens d'investigations évoluent en parallèle notamment en matière de dimensionnement. Si pour les ouvrages classiques, les méthodes de calcul sont largement éprouvées et validées, dans les cas complexes les ingénieurs ont de plus en plus recours à des modèles numériques élaborés. Le développement exponentiel des capacités des ordinateurs rendent aujourd'hui envisageables des calculs qu'il aurait été impossible de mettre en œuvre il y a quelques années.

Les méthodes de calculs classiques en ingénierie (méthodes numériques continues) considérant le sol comme un matériau continu sont très largement employés pour les phases de dimensionnement. Chaque élément du renforcement et de l'interface peut être pris en compte. Sous réserve d'hypothèses de calcul concernant les valeurs des paramètres des sols **les résultats obtenus sont assez réalistes**.

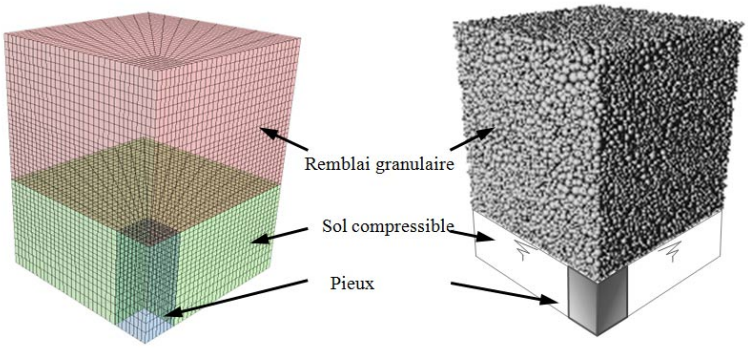

Figure 9. Modélisation Continue (à gauche) et Discrète (à droite) des mécanismes de transfert de charge dans un matelas granulaire positionné au dessus d'un réseau de pieux.

Peut-on rêver d'un modèle numérique qui prenne en compte chaque grain de sols et chaque élément de renfort ? En fait oui et certains rêvent déjà puisque les méthodesnumériques discrètes sont basées sur ce principe. Chaque grain de sol peut être modélisé par des éléments de forme adéquate et des lois d'interaction, définies entre les grains et les renforts, permettent de restituer avec très peu de paramètre le comportement des sols et des ouvrages renforcés. Très intéressants pour comprendre les mécanismes locaux qui interagissent aux interfaces et dans le sol, ces modèles sont très utilisés dans le domaine de la recherche. Leur application aux ouvrages ou parties d'ouvrages est moins fréquente compte tenu de la technicité de la méthode et des temps de calcul qui peuvent à l'heure actuelle être prohibitifs. D'ici quelques décennies ces temps de calcul prohibitifs seront sujets de plaisanterie.

Et **les expérimentateurs** dans tout cela ? Ils **ne sont pas en reste** puisque les techniques d'instrumentation et les capteurs évoluent également. Des grandeurs qui ne pouvaient pas être mesurées par le passé sont actuellement accessibles permettant une meilleure compréhension des mécanismes de renforcement. Des modèles réduits ou centrifugés en laboratoire et des ouvrages en vraie grandeur sont à l'heure actuelle très largement étudiés avec une instrumentation sophistiquée.

5. Des ouvrages sous surveillance

De par leur technicité les ouvrages renforcés sont des ouvrages complexes qu'il convient de suivre dans le temps notamment quand les enjeux économiques et environnementaux qu'ils suscitent sont d'importance. Dans ce cas l'ingénieur géotechnicien dispose d'un arsenal important d'outils et d'instruments de mesure pour analyser et anticiper le comportement de l'ouvrage renforcé. **L'instrumentation d'un ouvrage peut être intégrée dès sa conception**, elle permet de contrôler le comportement de l'ouvrage pendant les travaux et de valider le dimensionnement ; dans certains cas, l'instrumentation peut être utilisée pour optimiser le dimensionnement pendant la construction de l'ouvrage, on parle dans ce cas de méthode observationnelle. A partir de l'instrumentation d'un ouvrage, une approche SHM (Structural Health Monitoring) peut être développée ; cette démarche prévoit, au-delà des seuls procédés de contrôle, de mettre en place une stratégie de surveillance automatisée et planifiée afin de contrôler l'ouvrage renforcé pendant sa durée de service. Les approches SHM se développent grâce à la mise sur le marché de capteurs de nouvelles générations (mesures par fibres optiques notamment) et au développement des moyens de communications et de transferts des mesures par des centrales d'acquisitions autonomes.

6. Que nous réserve l'avenir ?

Ce que l'on sait, c'est que l'homme a dans ses gènes des envies de conquête et qu'il cherchera à s'implanter partout où il le pourra, notamment dans des zones réputées jusqu'alors inconstructibles et vraisemblablement sur les fonds marins. De plus en plus soucieux de son environnement, il fera appel à des techniques nouvelles plus économiques et plus écologiques. Dans cette perspective, les chercheurs développent actuellement des méthodes de couplages entre modélisation numérique et expérimentation pour mieux comprendre le comportement du sol et des interfaces sols-inclusions et donc pour aboutir à des solutions de renforcement optimisées. Les méthodes observationnelles déjà citées vont trouver, grâce au développement de l'auscultation géotechnique, de nouveaux débouchés. Enfin l'homme pourra compter sur de nouveaux alliés aussi inattendus que les bactéries par exemple qui sont déjà utilisées pour améliorer la portance des sols (technique de biocalcification) ou pour contribuer à leur dépollution. Des perspectives très prometteuses aujourd'hui !

Références et notes

[1] Armater : http://enka-solutions.com/en/home/

[2] Terre Armée - http://www.terre-armee.fr/TA/wtaf_fr.nsf

[3] Texsol : http://www.eiffageinfrastructures.com/home/produits/texsol.html

---

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteurs :** VILLARD Pascal - BRIANÇON Laurent (2018), Le renforcement des sols : des techniques devenues indispensables, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=4141

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.