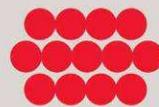




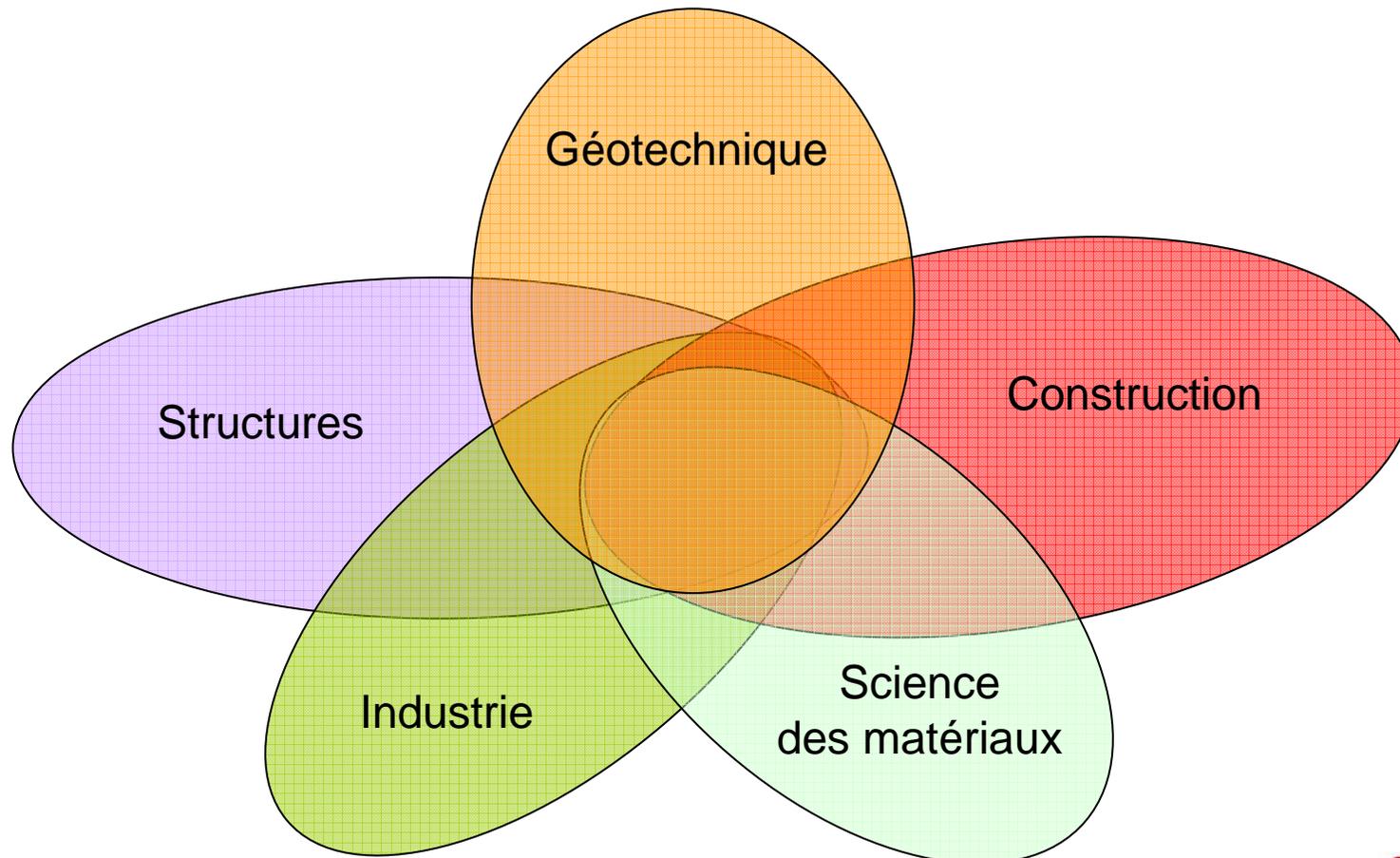
Sols renforcés Etat de l'art et perspectives



Terre Armée

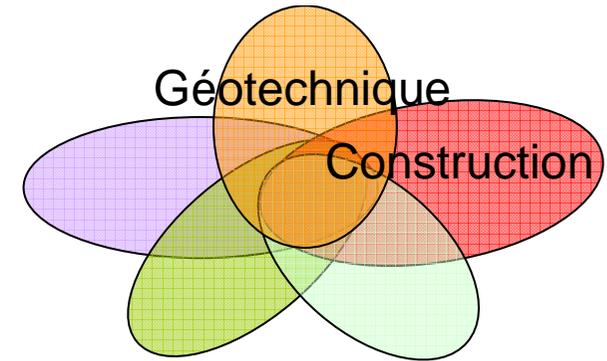
Les ouvrages en remblai renforcé

- Un métier à l'interface de nombreux domaines



Éléments constitutifs

- Éléments constitutifs d'un ouvrage
 1. Matériau de remblai
 - Matériau de construction qui doit pouvoir se mettre en œuvre sur chantier
 - Impératifs :
 - Permanence dans le temps de caractéristiques mécaniques minimales
 - » Résistance au cisaillement
 - » Pas de dégradation ni fluage excessifs
 2. Renforcements
 - En densité suffisante
 - En matériau et technologie adaptés :
 - À l'application
 - À l'environnement
 - À la durée d'utilisation de projet
 3. Parement (éventuel)
 - Rôle de stabilité local et d'aspect architectural
 - Assure la stabilité locale
 - Doit se faire discret par rapport au comportement global de la structure



La Terre Armée = nouvelle utilisation des matériaux de remblai – selon H. Vidal 1963

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE
—
SERVICE
de la PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

BREVET D'INVENTION

P.V. n° 929.421

N° 1.393.988

Classification internationale : _____

E 02 b



Perfectionnement aux ouvrages de construction.
M. HENRI VIDAL résidant en France (Seine-et-Oise).

Demandé le 27 mars 1963, à 14^h 42^m, à Paris.

Délivré par arrêté du 22 février 1965.

(Bulletin officiel de la Propriété industrielle, n° 14 de 1965.)

(Brevet d'invention dont la délivrance a été ajournée en exécution de l'article 11, § 7, de la loi du 5 juillet 1844 modifiée par la loi du 7 avril 1902.)



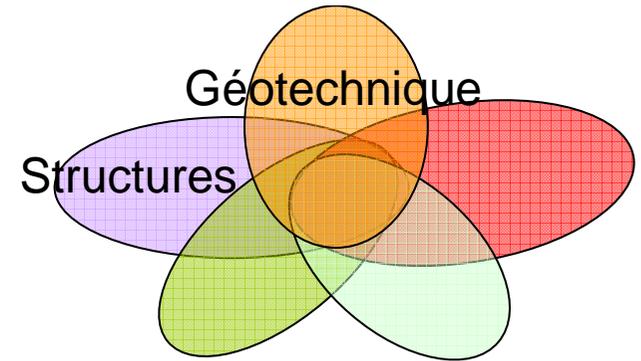
Les premiers ouvrages sortis de la main de l'homme ont emprunté l'essentiel de leurs matériaux à la nature, principalement au sol. C'est ainsi que parmi les constructions les plus anciennes, des fossés, remblais, canaux, huttes, etc., ont été exécutés en terre. De nos jours encore certaines régions connaissent, pour l'exécution de bâtiments, l'usage du torchis, c'est-à-dire d'un mélange de terre argileuse et de paille ou foin mis en place entre des branches.

Au cours des siècles, le progrès des techniques a conduit à une réduction du domaine d'application de la terre comme matériau de construction. C'est ainsi que le béton armé, s'il utilise des éléments tirés du sol, les agrégats — le plus souvent après traitement (concassage, criblage, lavage, etc.) — exige la mise en œuvre de deux constituants d'origine essentiellement industrielle, l'acier, pour les armatures et le ciment pour la liaison entre agrégats et armatures.

Ce n'est qu'au cours des dernières années, que sous l'effet de l'utilisation généralisée des engins de terrassement et du développement de la mécanique des sols, de nombreux ouvrages de haute technicité ont été exécutés, dans des conditions économiques, en terre : digues, routes, pistes d'aérodrome, barrages, etc.

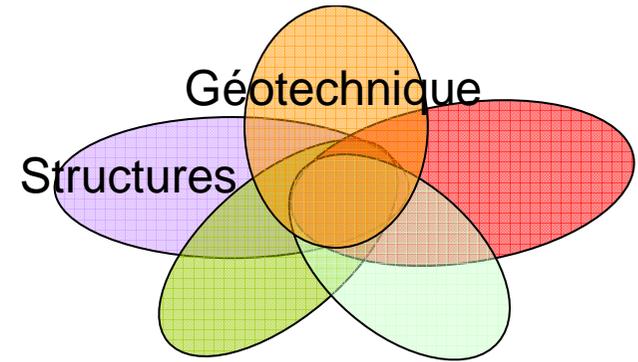
La présente invention se propose de réaliser une nouvelle application de la terre comme matériau de construction. Elle a plus particulièrement pour objet un ouvrage de construction caractérisé en ce qu'il comprend principalement des éléments granuleux ou pulvérulents et des armatures disposées de telle sorte que ces éléments sont maintenus les uns par rapport aux autres, soit par frottement direct avec les armatures, soit par frottement avec d'autres éléments en contact avec les armatures, l'ensemble formant ainsi un volume doué de cohésion et capable de résistance.





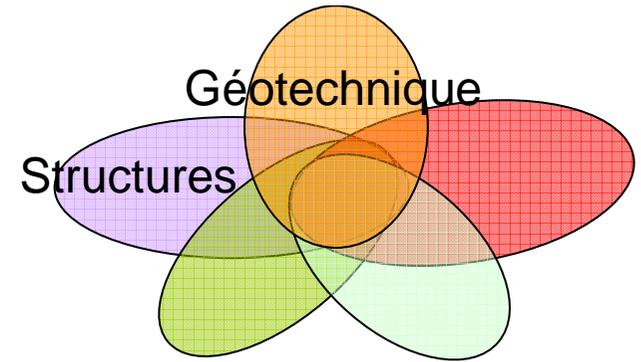
Méthodes de dimensionnement / justification

- Deux approches aujourd'hui : dualité ?
 - modèles semi-empiriques
 - approche « structures »
 - Méthodes basées sur l'extrapolation des mesures faites sur ouvrages, sur modèles réduits et sur modèles numériques
 - Détermination conservative des efforts qui se développent dans les renforcements
 - « STABILITE INTERNE »
 - Ne sont pas adaptés :
 - Aux géométries complexes
 - Aux cas où la géotechnique est complexe :
 - » Stabilité de pente
 - » Mauvais sols de fondation



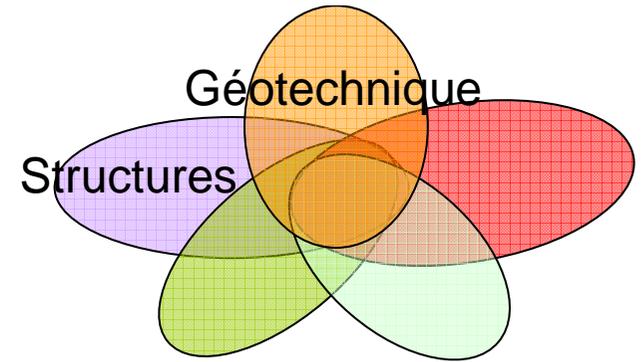
Méthodes de dimensionnement / justification

- Deux approches aujourd'hui : dualité ?
 - modèles théoriques
 - approche du géotechnicien
 - Méthodes de Bishop, perturbations et calcul « à la rupture »
 - Indice de « STABILITE GLOBALE »
 - Permet l'analyse systématique de profils complexes
 - Ne tient pas compte
 - de la mise en charge réelle des renforcements
 - des raideurs relatives
 - » des possibles concentrations d'effort
 - Existence d'une troisième approche ?
 - apportant des réponses aux lacunes des deux précédentes



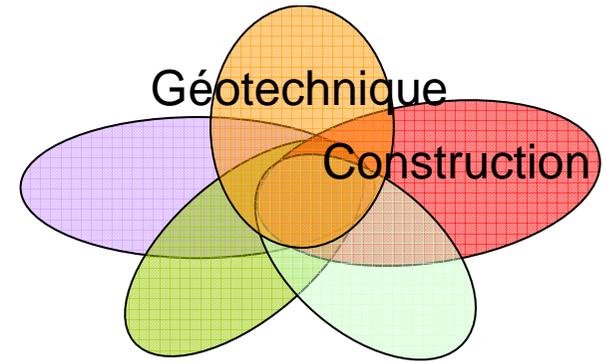
Méthodes de dimensionnement / justification

- Existence d'une troisième approche ?
 - apportant des réponses aux lacunes des deux précédentes
 - pouvant être utilisée tant au stade du dimensionnement qu'au stade de la justification ?
- Il y a bien des tentatives :
 - Méthode en déplacement – type « Carthage »
 - Avec prise en compte des raideurs respectives des lits
 - Méthode de coins
 - Avec distribution des efforts proportionnellement à la profondeur



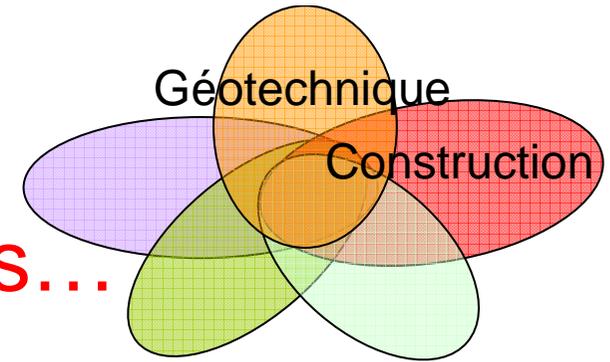
Méthodes de dimensionnement / justification

- Existence d'une troisième approche ?
 - Les méthodes en déformation :
 - éléments finis / différences finies
 - Permettent de simuler l'historique de la mise en œuvre
 - Permettent de bien prendre en compte les raideurs relatives
 - Complexité / Sensibilité
 - Attention aux valeurs absolues... en efforts et surtout en déplacements
 - Par contre excellentes méthodes pour comparer deux solutions



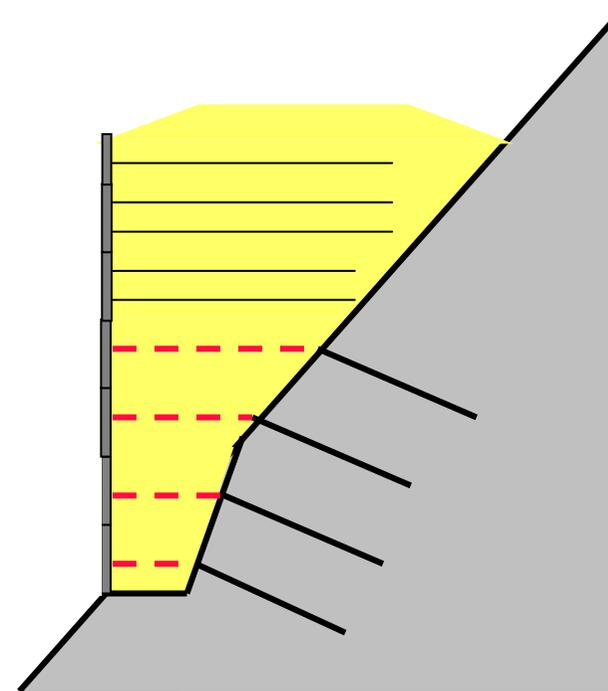
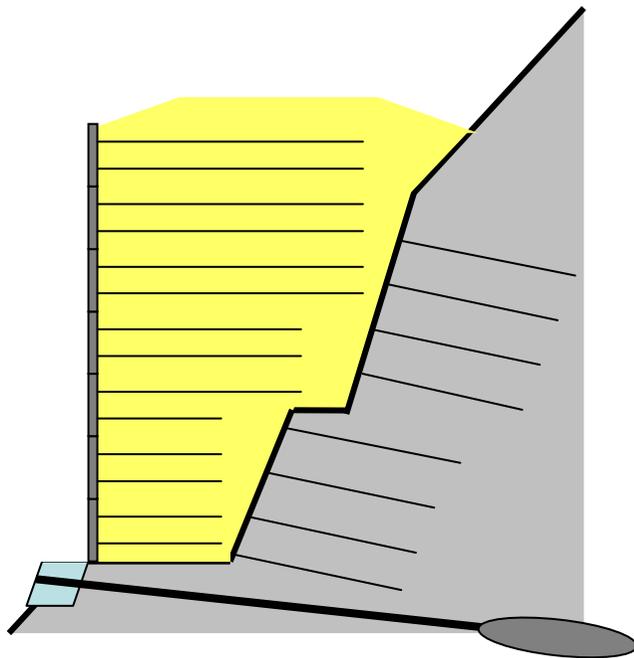
Des applications bien établies

- Dans ses applications de base
 - Murs de soutènement
 - Talus raidis
 - Culées de pont
 - Ouvrages de stockage
 - Dignes et barrages
 - Ouvrages de protection
 - Ouvrages de rétention

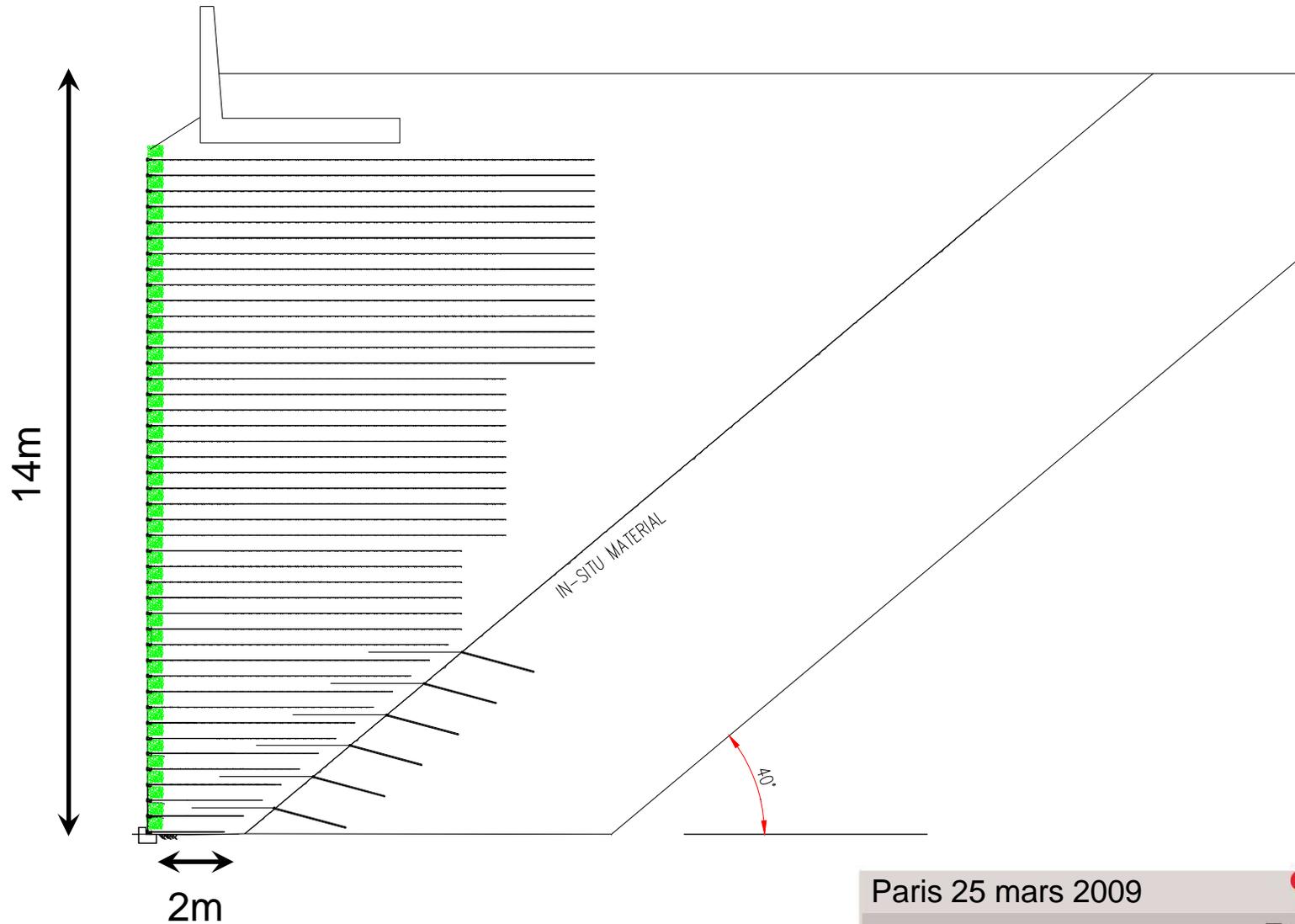


Mais il y a encore des perspectives...

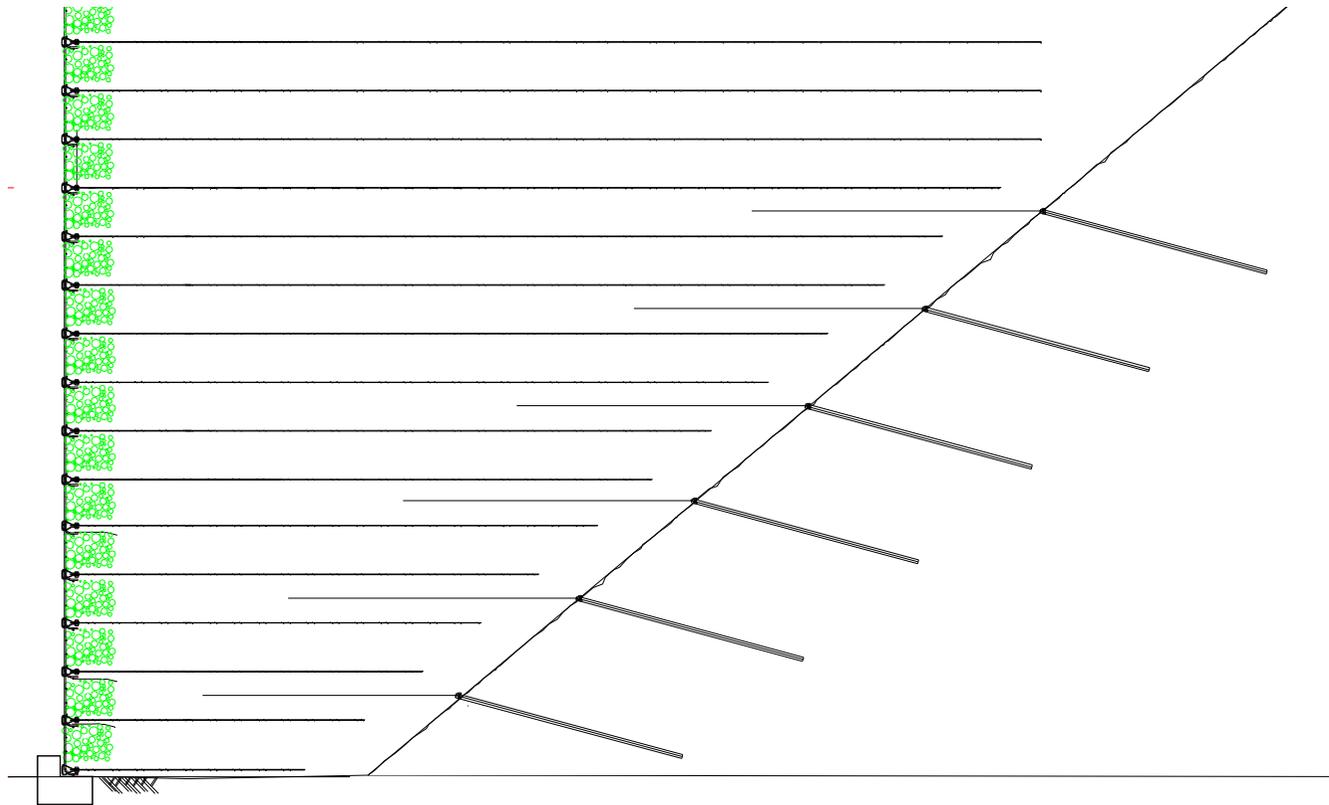
- Les possibilités d'applications sont encore nombreuses
 - Murs adossés contre talus naturels ou déblais
 - Avec faible espace en pied
 - Inférieur à 30-40 % de la hauteur



Exemple : Sishen Mine – Afrique du Sud



Exemple : Sishen Mine – Afrique du Sud



Exemple : Sishen Mine – Afrique du Sud



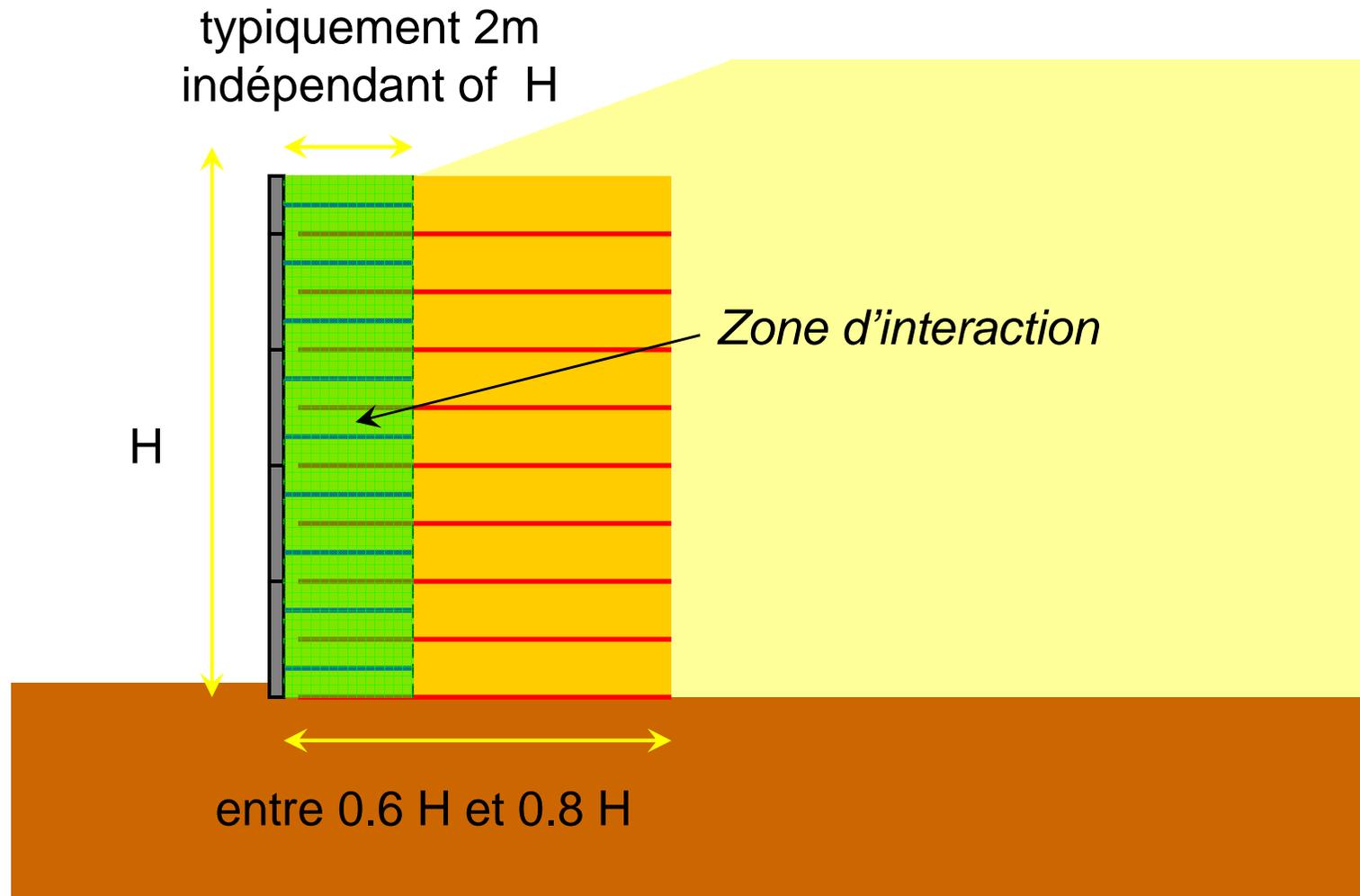
Interaction remblai / renforcement



Interaction remblai / renforcement



Interaction remblai / renforcement

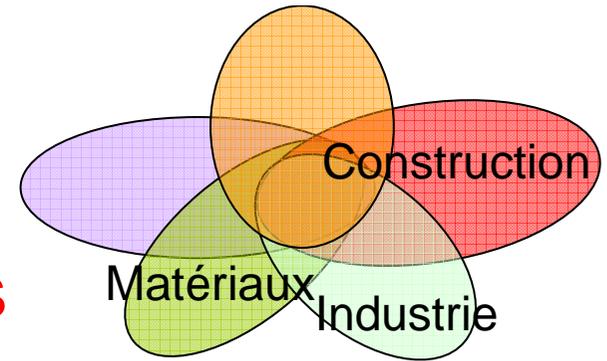


Interaction remblai / renforcement



Interaction remblai / renforcement

- Mélanges fils / sols
 - cf Développement Texsol
- Naturellement riches en fibres
 - Comme les bétons fibrés
 - Même conséquence :
 - Viables économiquement que si l'on réduit considérablement les volumes renforcés
 - D'autres conceptions d'ouvrages :
 - Analogie des perrés pour les talus
 - Analogie des murs traditionnels pour les murs de soutènement



De multiples solutions technologiques

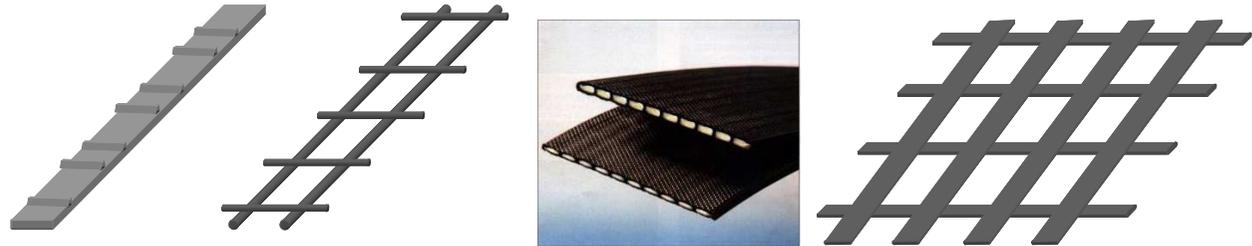
- Renforcements

- Acier

- Bandes
 - Treillis soudés
 - ...

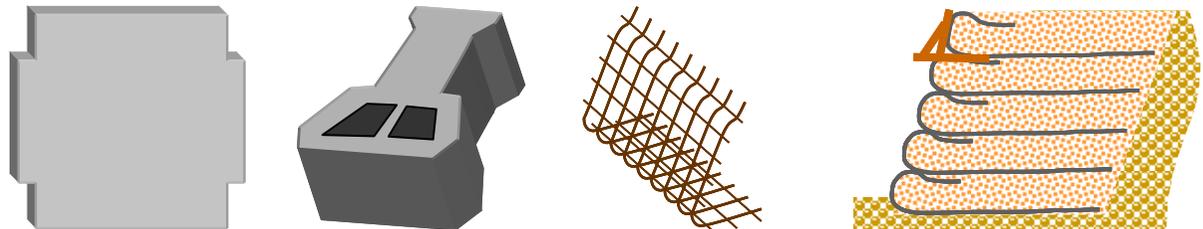
- Géosynthétiques

- Bandes
 - Geogrilles
 - Tissés
 - Non tissés



- Parements

- Peaux métalliques
 - Ecailles en béton
 - Treillis métalliques
 - Blocs
 - Gabions



Durabilité des renforcements

- Sujet essentiel !
 - Bonne connaissance aujourd'hui sur les matériaux les plus usités
 - Acier
 - En labo
 - Dans les ouvrages
 - Synthétiques
 - Polyester PET, polyéthylène HDPE, polypropylène PP...
 - Surtout en laboratoire
 - Même exigence sur les nouveaux matériaux
 - Par exemple polyalcool de vinyle PVA
 - La connaissance de l'environnement de l'ouvrage reste à améliorer
 - Températures dans les remblais
 - Présence d'eau
 - Carbonatation ou pas des remblais traités

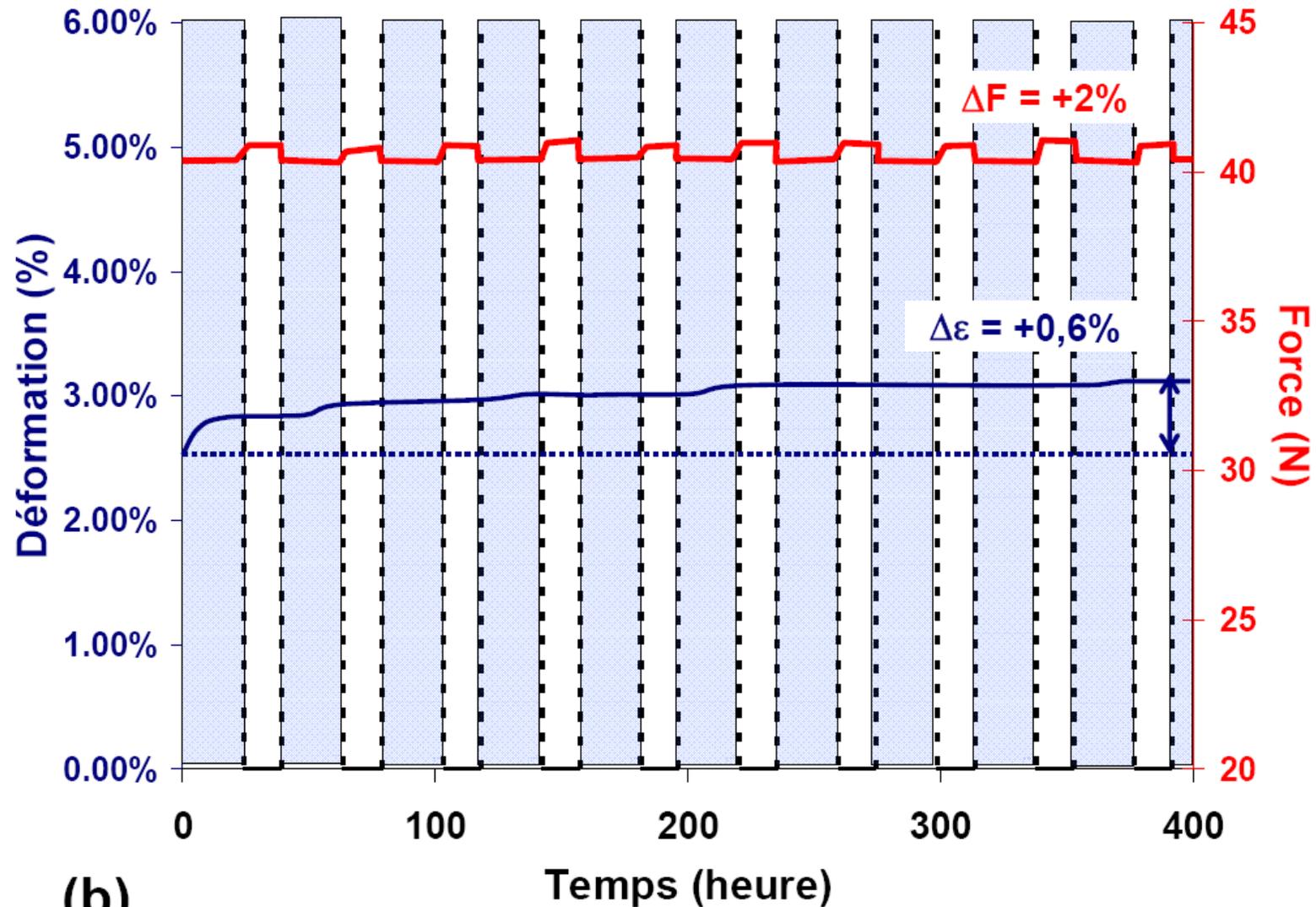
Le cas de la fibre PVA

- Après plus de 2 ans d'essais divers, nous pouvons affirmer les choses suivantes :
 - La fibre de PVA ne montre pas de signe de dégradation chimique, même dans les conditions les plus sévères
 - Chaux pH 12
 - Acide sulfurique pH 2
 - L'allongement sous service est faible : de l'ordre de 1 à 2% contre 2 à 4% pour le PET, plus pour les polyoléfinés
 - La fibre montre une affinité à l'eau, et s'allonge sensiblement quand elle est mouillée : environ + 0,6% !
 - Ce qui après analyse conduit à un coefficient de réduction de la résistance égal à 0,83 ¹

¹ cf Naït-Ali et Freitag, Rencontres Géosynthétiques 2009, Nantes 1-3 avril 2009



Le cas de la fibre PVA

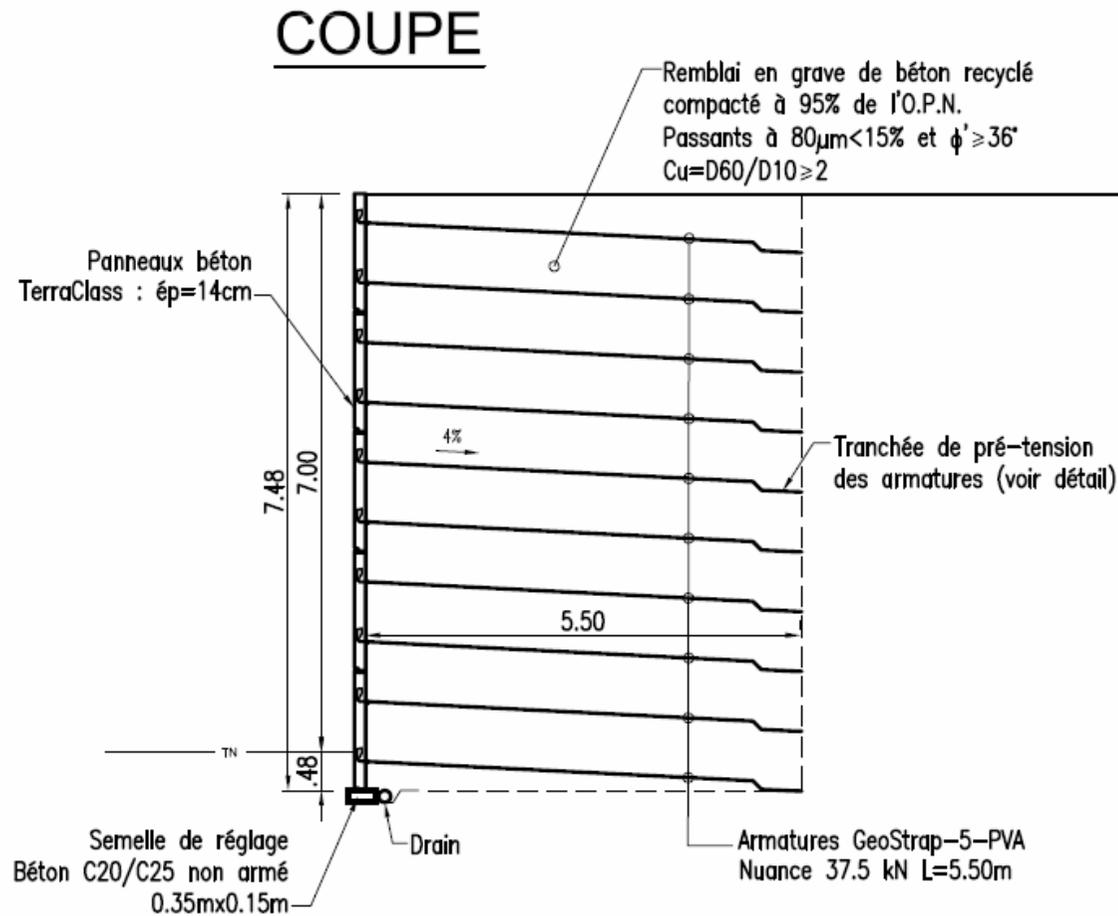


Première application en Terre Armée

- Rampe d'accès à un concasseur
- Site de concassage de matériaux de démolition en RP
 - 70% démolition : béton, brique... sauf plâtre
 - 30% fraisats routiers : granulats et enrobés
- Hauteur de l'ouvrage : 7.50m
- Technologie :
 - connexion GeoMega : totalement synthétique
 - GeoStraps + : fibre de PVA
- Réduction de 60% des émissions de CO₂ par rapport à l'apport d'un matériau de carrière

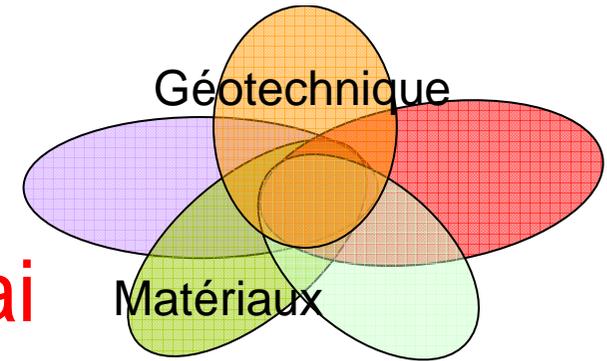


Systeme GeoMega



Systeme GeoMega





Durabilité du remblai

- A ne pas négliger
 - Bon nombre de déboires sont dus à l'utilisation de remblais naturels « évolutifs »
 - Schistes, marnes, certaines craies
 - Parfois matériaux chargés de pyrites
 - Tassements importants à court ou moyen terme
 - Quid de la durabilité des remblais fins traités ou stabilisés au ciment ou à la chaux
 - La demande de la part des entreprises est de plus en plus forte
 - Apparemment on est encore loin de tout maîtriser
 - Projet Terdouest

Durabilité du remblai

- A ne pas négliger
 - Bon nombre de déboires sont dus à l'utilisation de remblais naturels « évolutifs »
 - Schistes, marnes, certaines craies
 - Parfois matériaux chargés de pyrites
 - Tassements importants à court ou moyen terme
 - Quid de la durabilité des remblais fins traités ou stabilisés au ciment ou à la chaux
 - La demande de la part des entreprises est de plus en plus forte
 - Apparemment on est encore loin de tout maîtriser
 - Projet Terdouest

Ouvrages en remblai renforcé

- Il reste encore beaucoup à développer...
- ... mais l'essentiel était déjà imaginé par Henri Vidal il y a près de 50 ans

