

Journée technique du CFMS - 25 mars 2009

Hommage à Henri Vidal

Le contexte normatif français des ouvrages en sol renforcé des origines à nos jours

Pierre SEGRESTIN - Consultant
Ancien directeur technique de
Terre Armée Internationale

Journée technique du CFMS - 25 mars 2009

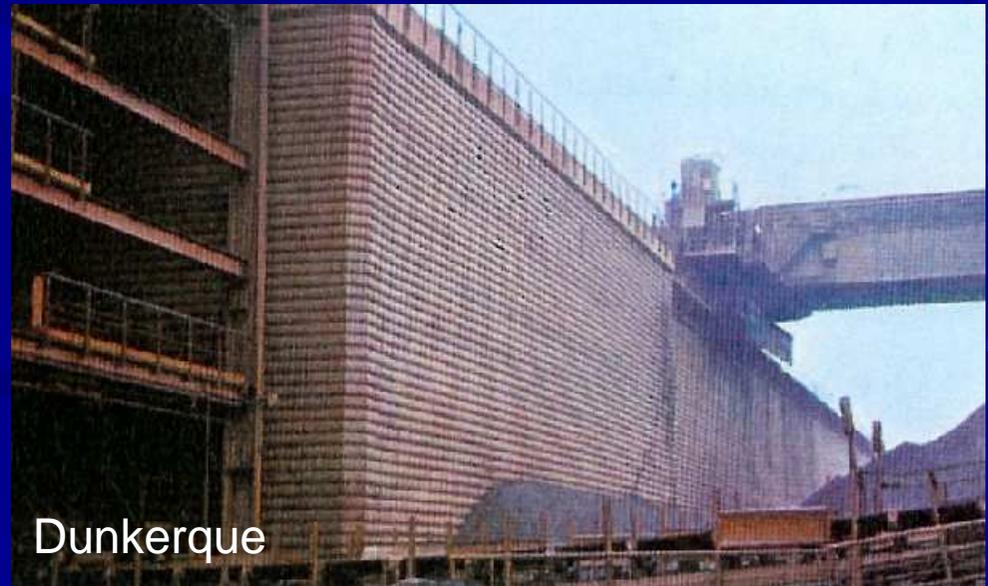
Hommage à Henri Vidal



La Réunion



A8 - Vigna



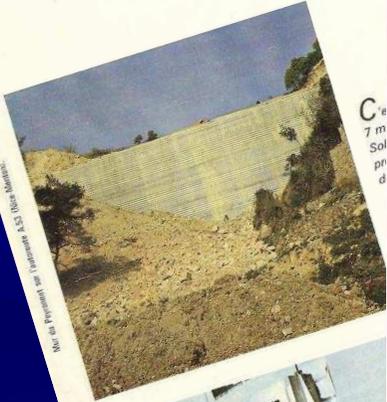
Dunkerque



la terre armée

F. SCHLOSSER
Ingénieur des Ponts et Chaussées
Chef de la Section • Mécanique des Sols
du Laboratoire Central

H. VIDAL
Ancien élève de l'Ecole Polytechnique
Ingénieur Civil des Ponts et Chaussées
Ingénieur Civil des Travaux Publics
Directeur Général du Bureau
des Ponts et Chaussées
Chef de la Terre Armée



MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT
DU TERRITOIRE, DE L'ÉQUIPEMENT,
DU LOGEMENT ET DU TOURISME

LCPC

LABORATOIRE CENTRAL
DES PONTS ET CHAUSSEES

La Terre Armée

NOTE D'INFORMATION TECHNIQUE

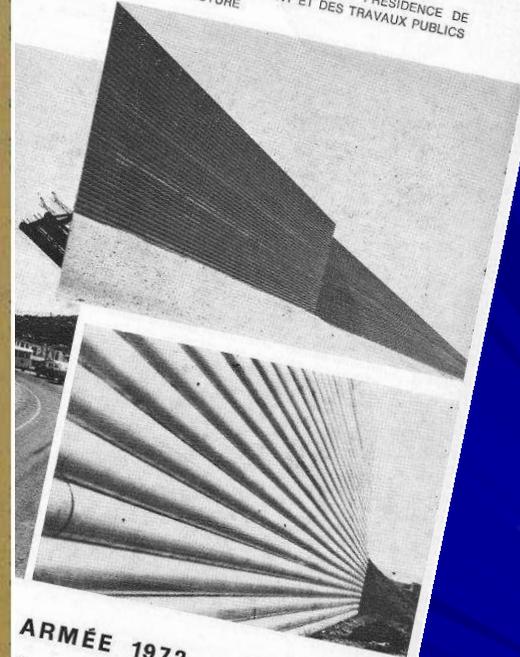
AVRIL 1973

ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE
DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

SERIE : MATERIAUX

N° 43

Supplément N° 299 NOVEMBRE 1972
PREMIÈRES, SEANCE DU 18 JANVIER 1972, SOUS LA PRESIDENCE DE
M. J. DEBRIEUX, DIRECTEUR DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS
ET DE LA CONJONCTURE



ARMÉE 1972

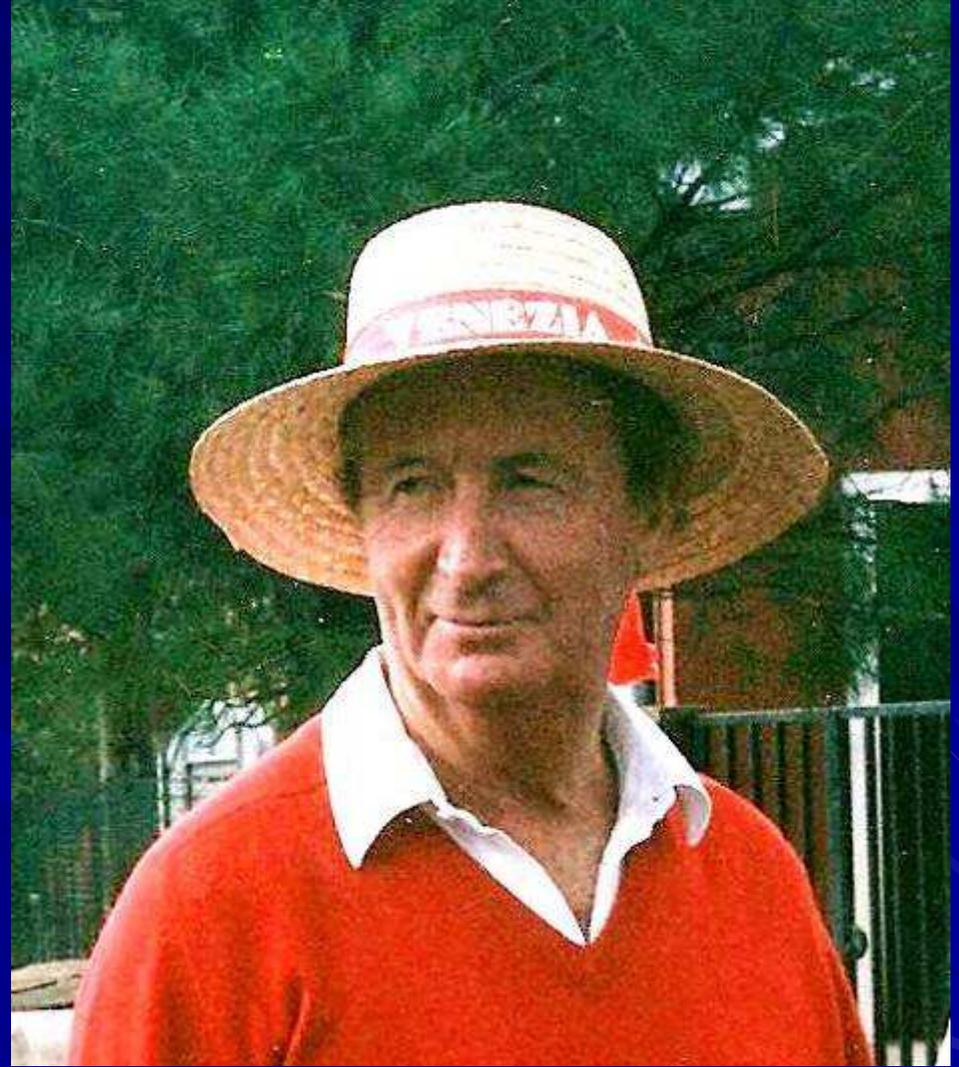
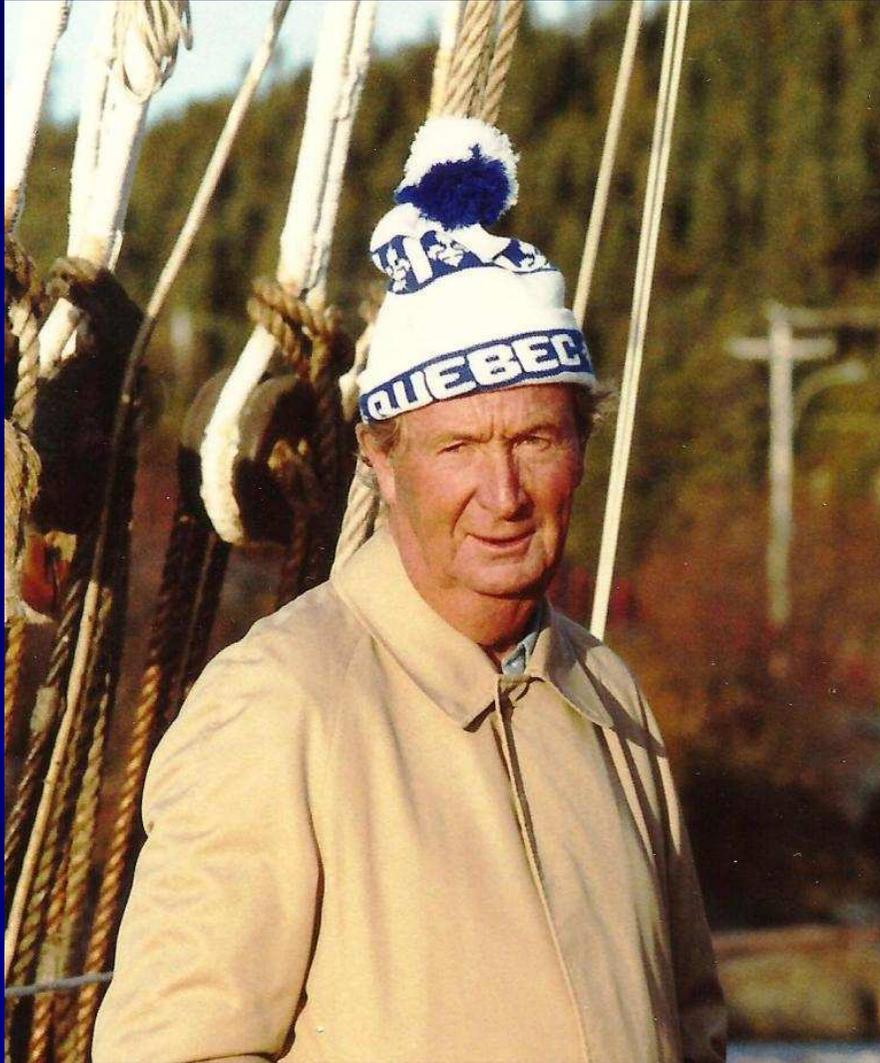
par
H. VIDAL

INSTITUT TECHNIQUE
DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

Henri Vidal



et moi et moi
et moi !..





Le contexte normatif français des ouvrages en sol renforcé, des origines à nos jours...

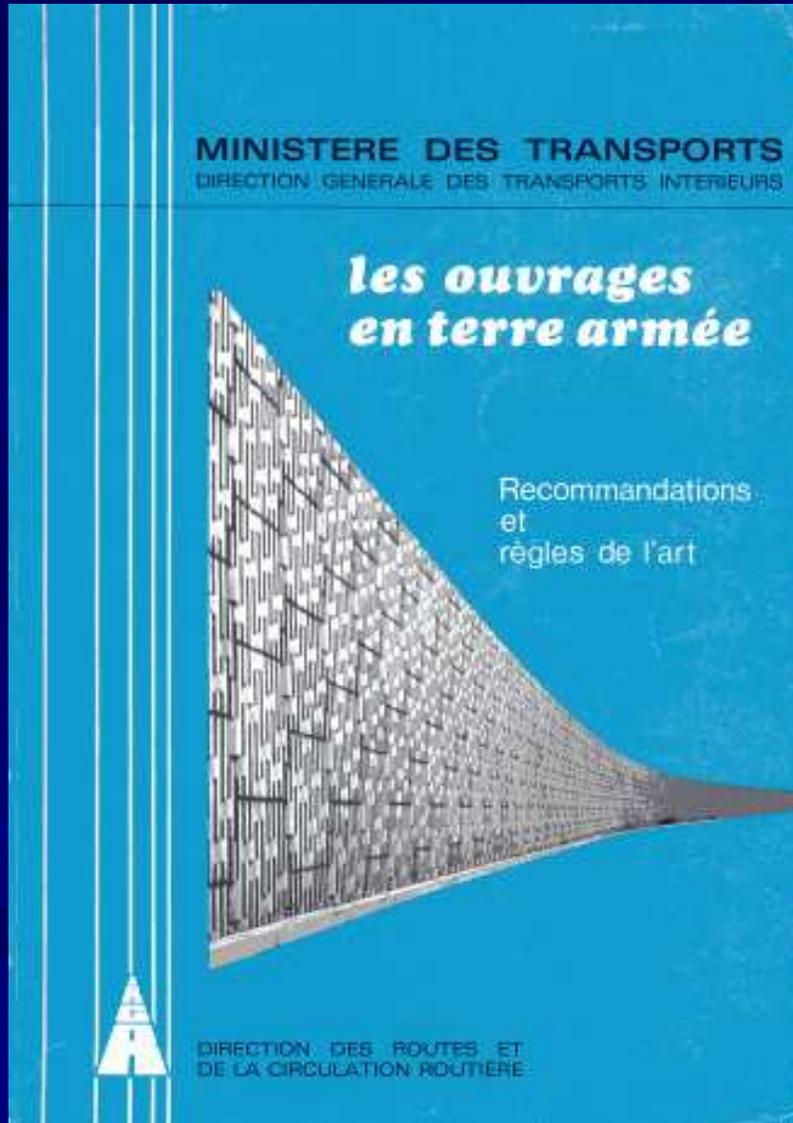
- **Années 80 : les recommandations**
- Années 90 : les premières normes
- Années 2000 : le contexte européen
(et concurrentiel...)

Recommandations LCPC – SETRA



- 1979
- **Recommandations pour les ouvrages en Terre Armée**
 - soutènements et culées
 - couvrant à la fois :
- **Projet**
 - Conception
 - Calculs justificatifs
- **Exécution**
 - Choix des matériaux
 - Mise en œuvre
- **Contrôle**

Recommandations LCPC – SETRA

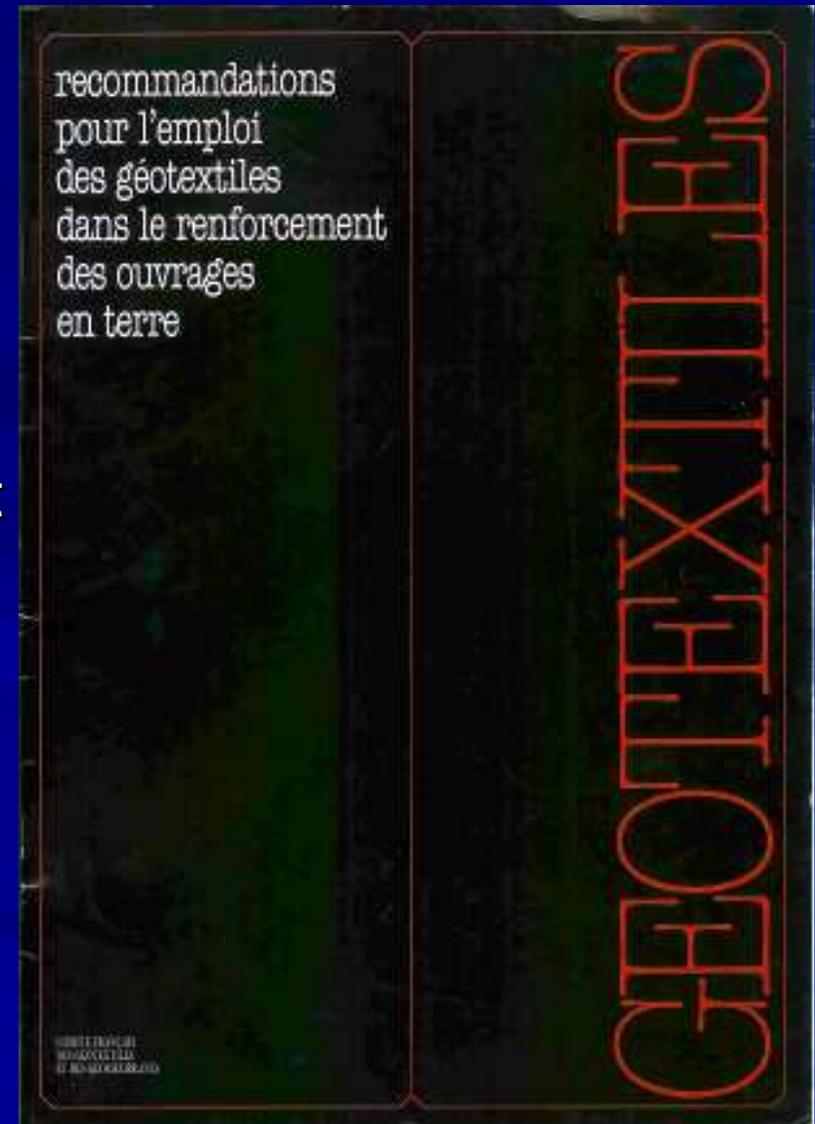


■ Premier standard introduisant

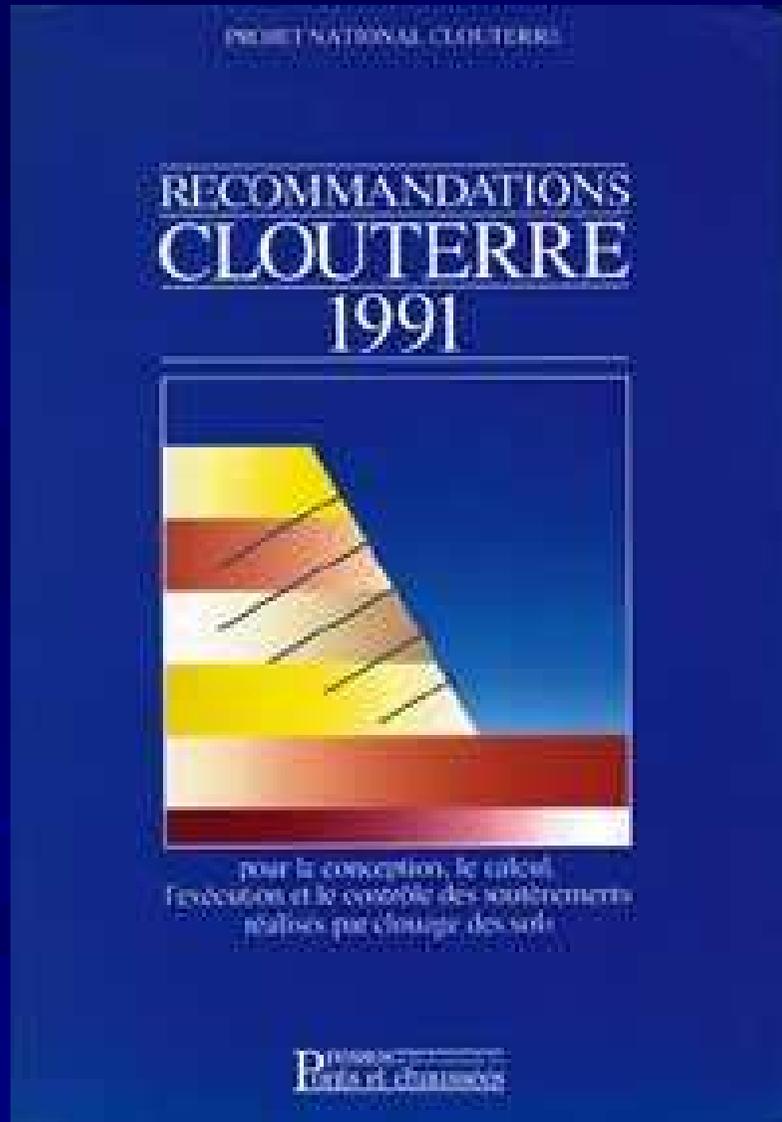
- notion de durée de service minimale
- principes de calcul semi-probabiliste
 - coefficients partiels, de pondération et de sécurité
- consignes de surveillance des ouvrages
 - en particulier : témoins de durabilité

Recommandations CFG

- 1990
- **Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans le renforcement des ouvrages en terre**
 - principes de dimensionnement
 - mise en œuvre
 - contrôles



Projet national Clouterre



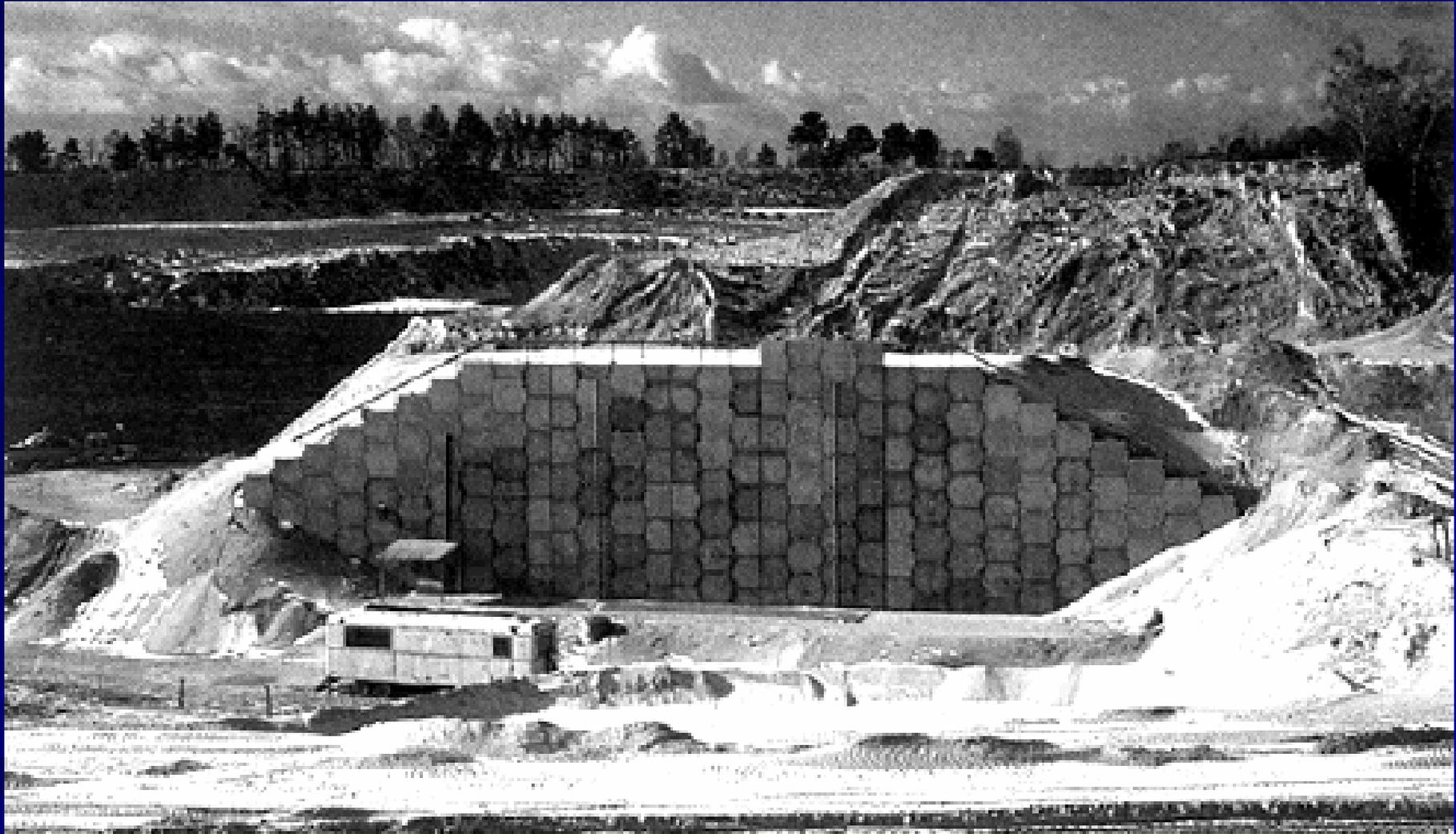
- 1991
- Recommandations pour les soutènements en sol cloué
 - couvrant également :
- **Projet**
 - Conception
 - Calculs justificatifs
- **Exécution**
- **Contrôle**

Le contexte normatif français des ouvrages en sol renforcé, des origines à nos jours...

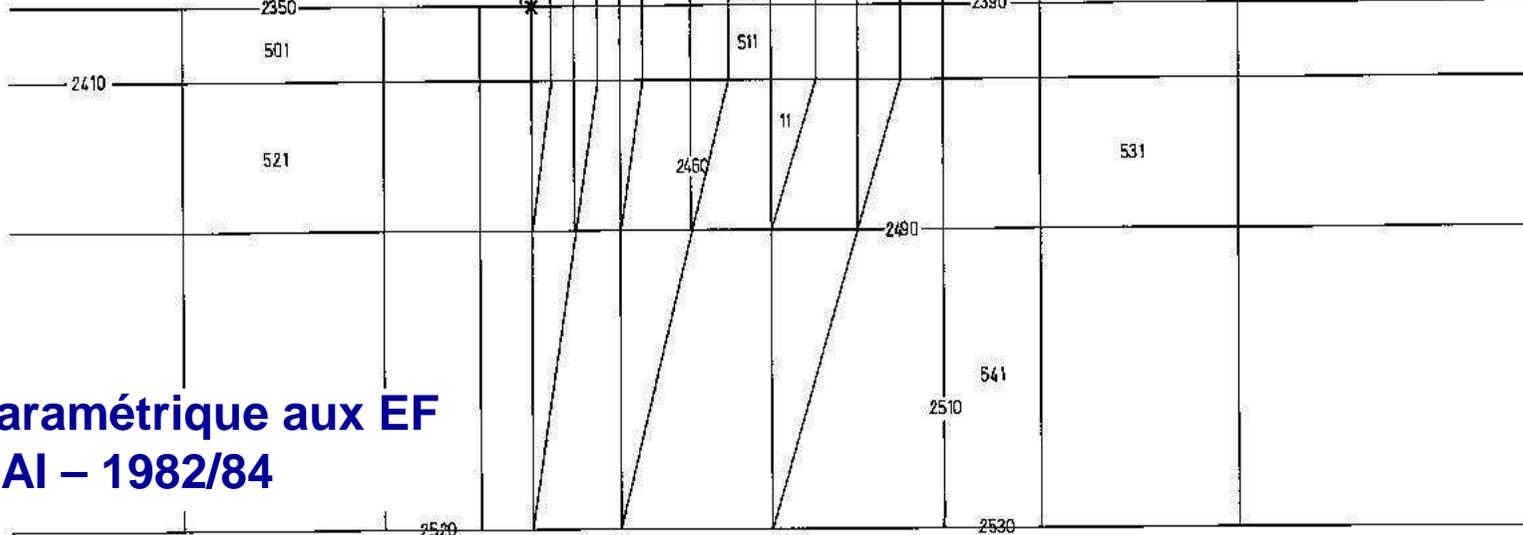
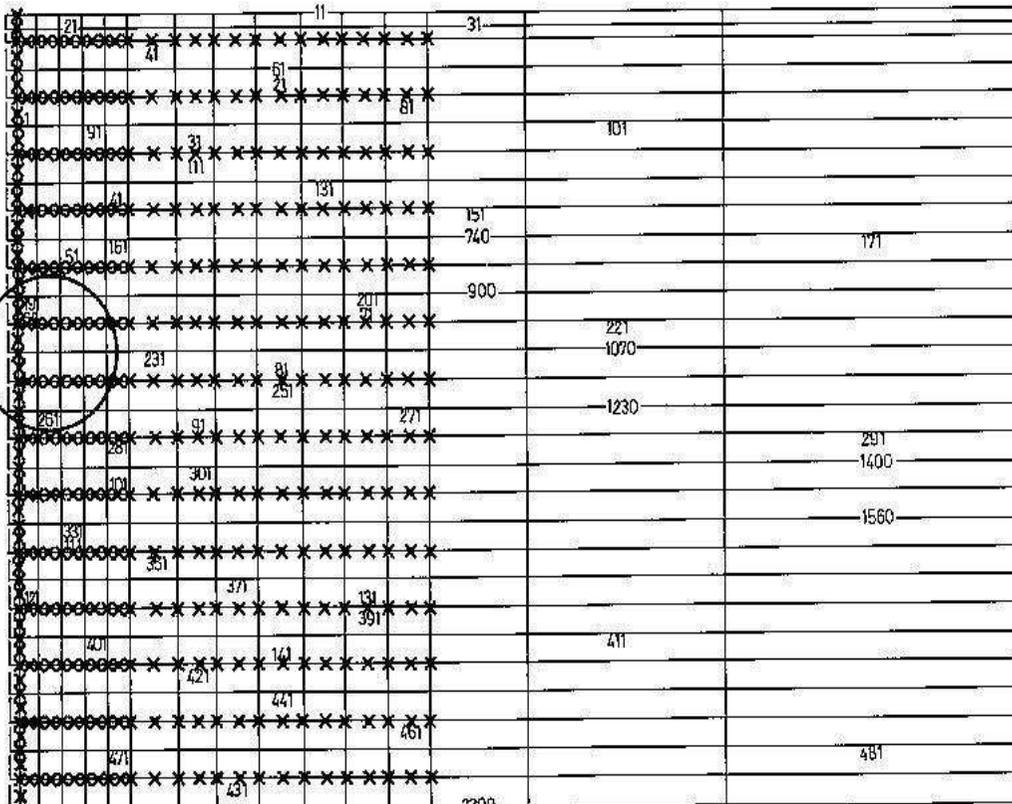
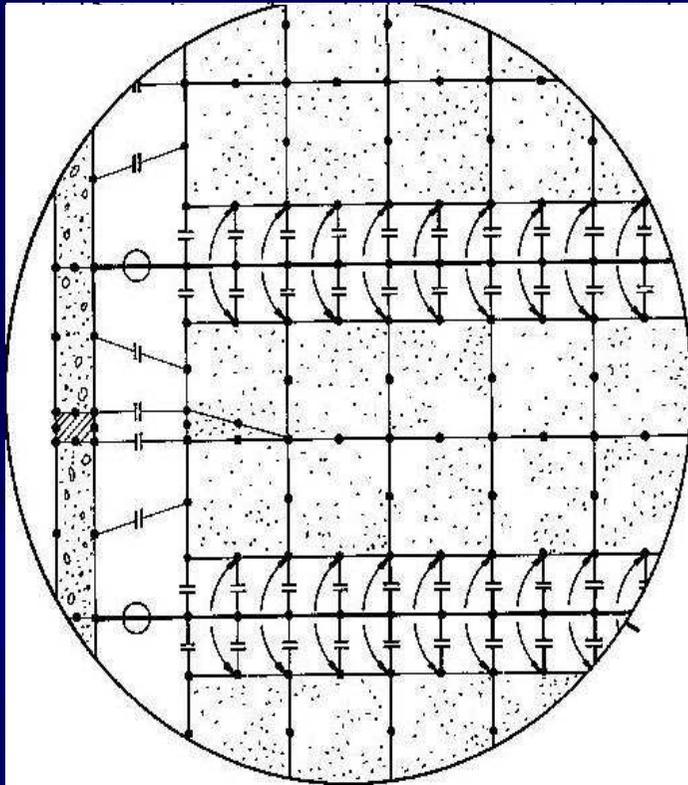
- Années 80 : les recommandations
- **Années 90 : les premières normes**
- Années 2000 : le contexte européen
(et concurrentiel...)

Norme NF P 94-220

- 1992, première norme "sol renforcé"
- Dimensionnement des ouvrages en remblai renforcé à renforcements métalliques
 - peu extensibles et souples (bandes, treillis)
 - remplace la section "Justifications" du livre bleu
 - pour les ouvrages en Terre Armée
- Règles de calcul perfectionnées, sur la base
 - de la synthèse des mesures sur ouvrages
 - en particulier : mur expérimental de Bourron-Marlotte
 - et de séries de modèles numériques



Mur expérimental de Bourron-Marlotte



**Etude paramétrique aux EF
TAI – 1982/84**

Norme XP P 94-240

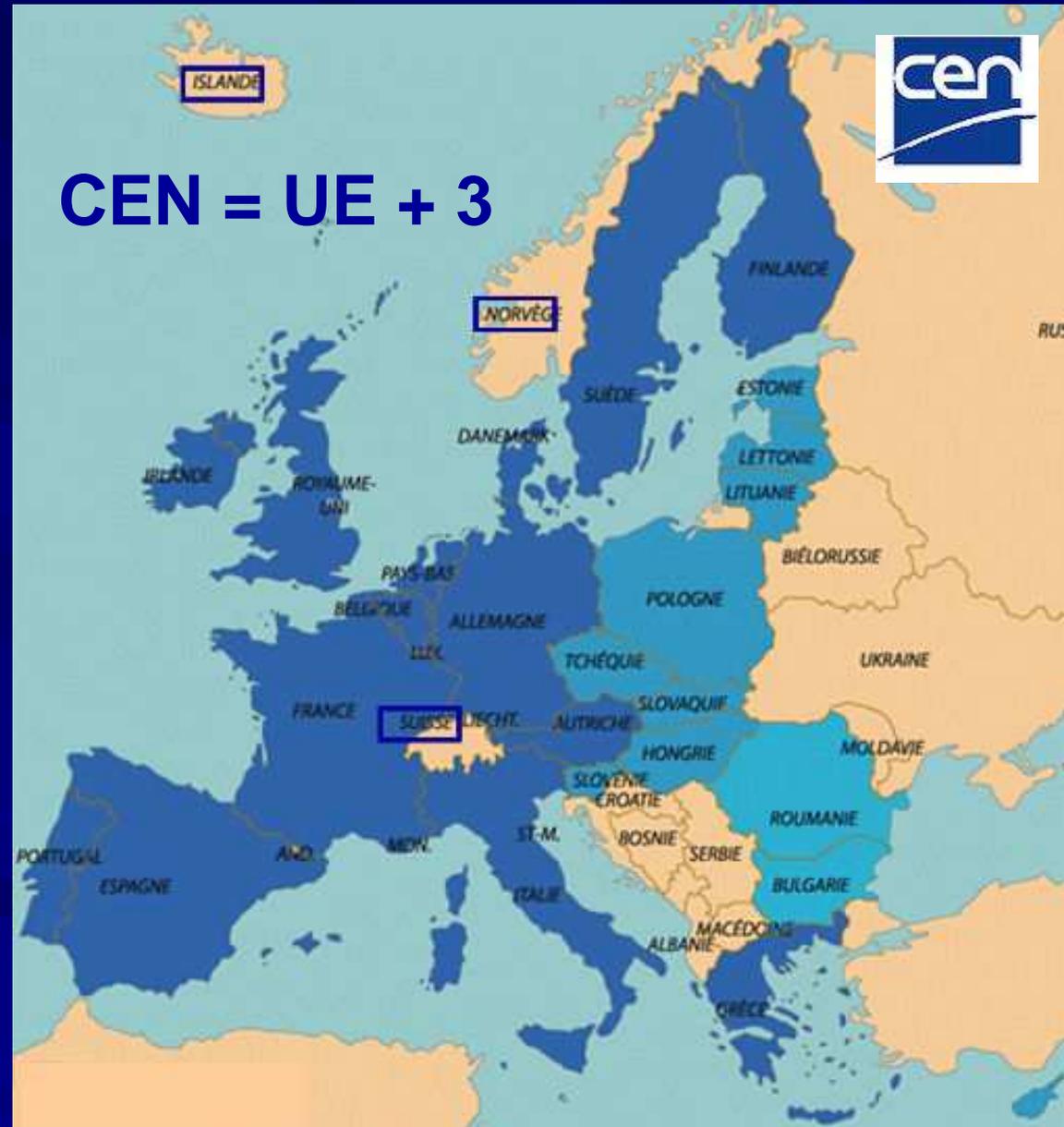
- 1998, norme expérimentale
- Dimensionnement des ouvrages en sol cloué
 - Norme basée sur les recommandations Clouterre



Le contexte normatif français des ouvrages en sol renforcé, des origines à nos jours...

- Années 80 : les recommandations
- Années 90 : les premières normes
- **Années 2000 : le contexte européen**
(et concurrentiel...)

Comité Européen de Normalisation



Normes relatives au sol renforcé

- Exécution des travaux géotechniques spéciaux
 - NF EN 14475 (2007) : remblais renforcés
 - pr NF EN 14490 (?) : massifs en sol cloué

- Justification par le calcul des ouvrages de soutènement en sol renforcé
 - NF P 94-270
 - publication attendue en avril 2008
 - *NB : pas une norme CEN, mais une...*
 - Norme nationale d'application de l'Eurocode 7
 - Calcul géotechnique

NF EN 14475

**Exécution des ouvrages
en remblai renforcé**

Large domaine d'application

- **Dans un contexte concurrentiel**

- **Tous types de structures**

 - murs, culées, talus, remblais sur sol mou...

- **Tous types de renforcements**

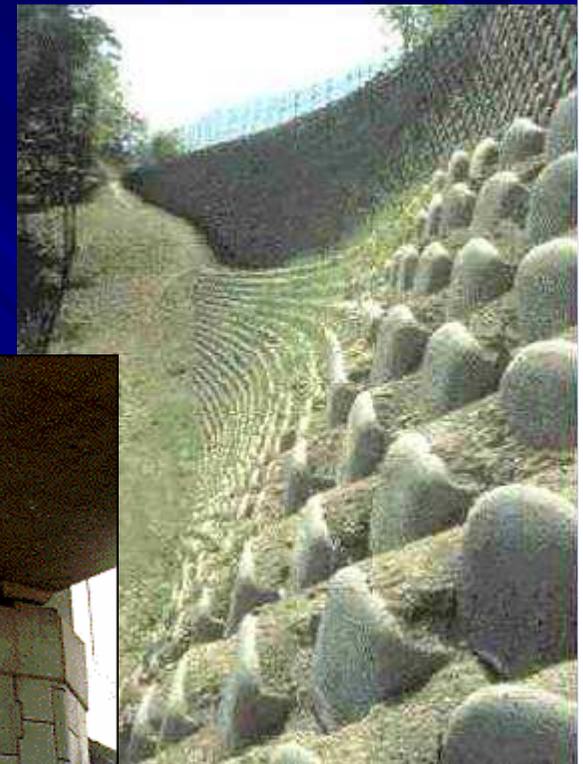
 - métalliques, géosynthétiques

 - bandes, grilles, nappes...

- **Tous types de parements**

 - panneaux préfabriqués, blocs, grillages, gabions, peaux métalliques, retournement de nappes...

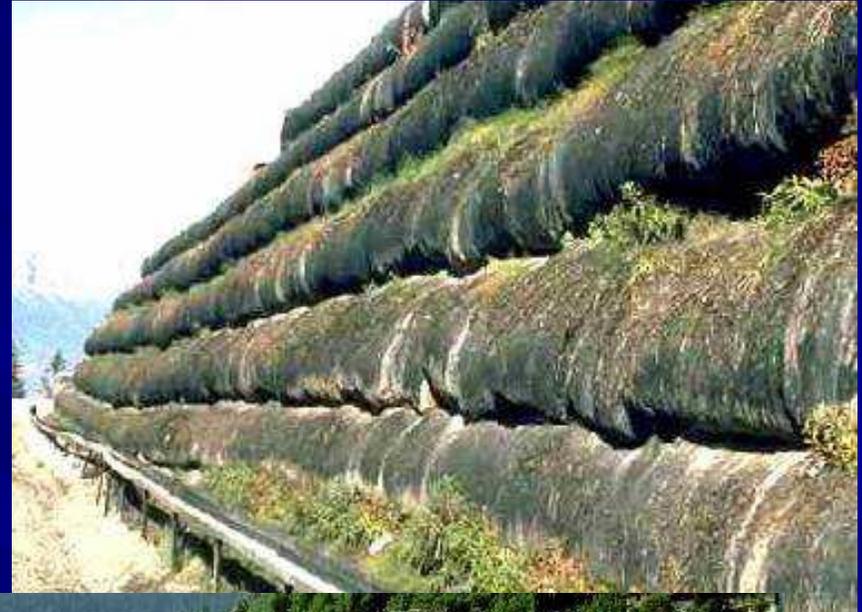
Tous types de structures



Tous types de renforcements



Tous types de parements



Nature de la norme

■ Norme relativement générale

- limitée aux prescriptions essentielles
- communes à toutes les techniques

■ Annexes informatives importantes

- recommandations spécifiques à certains matériaux ou produits
- informations pratiques concrètes

Points forts de la norme

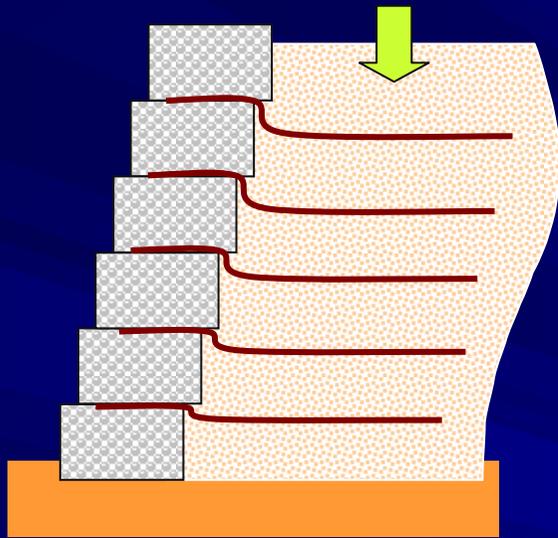
■ Attention à la compatibilité des matériaux

- remblai / renforcement / parement
- quand ils sont laissés au choix de l'entreprise
 - (dans une certaine mesure)

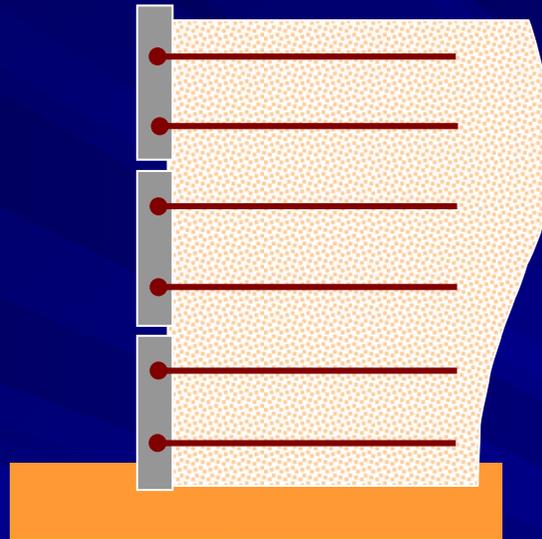
■ En particulier à propos du remblai

- en raison de l'interaction avec les renforcements
 - caractéristiques de "frottement"
 - compatibilité chimique et mécanique
- mais aussi des risques de déformation
 - inacceptables pour certains parements ou applications

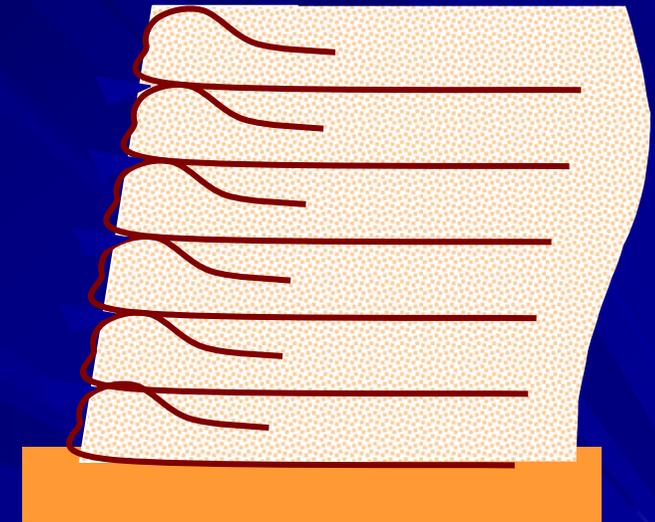
Compatibilité remblai / parement



Parement rigide



Semi-flexible



Flexible

■ Parement non flexible ?

→ choisir un remblai qui ne risque pas d'entraîner de tassement différentiel remblai / parement

Informations pratiques

■ Annexe A

– Définition de catégories de remblai

■ selon la granulométrie

- inspirées du GTR français
- et des critères classiques TAI

– Indications sur leur utilisation

- courante – possible - sujette à étude particulière - pas recommandée
- suivant : la fonction de l'ouvrage - le type de parement - le type de renforcement

Informations pratiques

■ Annexe B

- Indications sur les domaines usuels d'application des renforcements *métalliques*, suivant :
- Leur type
 - bande, treillis soudé, grillage tressé
- La durée d'utilisation du projet
- L'environnement
 - hors d'eau, en eau douce, marin, agressif
- Les propriétés électro - chimiques du remblai
 - où l'on retrouve les critères classiques TAI

En résumé

■ La norme "Exécution" NF EN 14475

- dit à quoi il faut veiller
 - plutôt que ce qu'il faut faire (dans l'esprit de EC 7)
- souligne que tous les systèmes n'ont pas les mêmes capacités
- guide dans le choix des matériaux
- remplace les sections "mise en œuvre" et "matériaux" du livre bleu...
 - pour la Terre Armée
- ...mais pas les manuels de montage

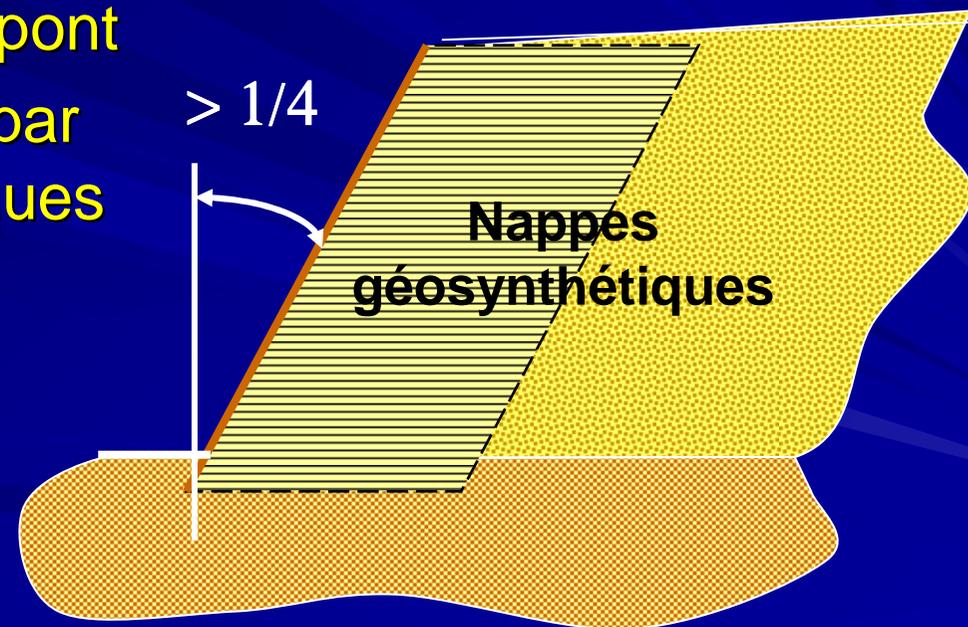
NF P 94-270

**Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement
Remblais renforcés et massifs en sol cloué**

Domaine d'application

■ Norme unique, pour tous les types de soutènement en sol renforcé

- sol cloué
- remblai renforcé
 - y compris culées de pont
 - sauf talus renforcés par nappes géosynthétiques
 - G 38064



Bases

■ Intègre, actualise et unifie

- dans le contexte de l'EC7

- la norme XP P 94-240

 - massifs cloués

- la norme NF P 94-220

 - remblais renforcés, renforcements métalliques

- le projet G 38064

 - remblais renforcés, renforcements géosynthétiques

 - pour tous les ouvrages avec renforcements en bande

 - et les murs et talus peu inclinés ($\eta_1 < 1/4$) avec des nappes

■ Avec quelques innovations...

NF P 94-270 – Justification des ouvrages en sol renforcé

1 – Principes généraux

■ Distinction claire entre ELU et ELS

– en accord avec EC0

■ Etats Limites Ultimes

– associés aux conditions d'un effondrement

- perte de stabilité, rupture, ou *déformation excessive* de tout ou partie de la structure en sol renforcé

■ Etats Limites de Service

– associés à des déformations

- préjudiciables à la bonne utilisation de l'ouvrage

ELU : 4 étapes de justification

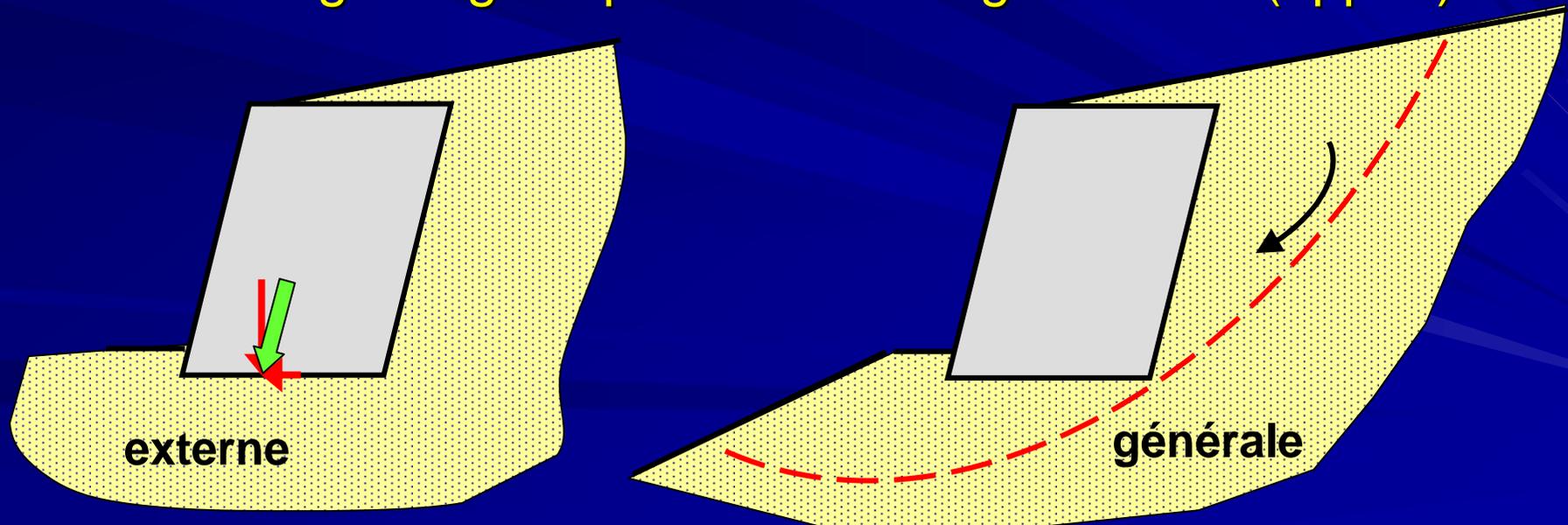
■ Solution globale et géométrie du massif

– 1. stabilité externe

■ glissement, capacité portante (app.2)

– 2. stabilité générale

■ le long de lignes potentielles de glissement (app. 3)



ELU : 4 étapes de justification

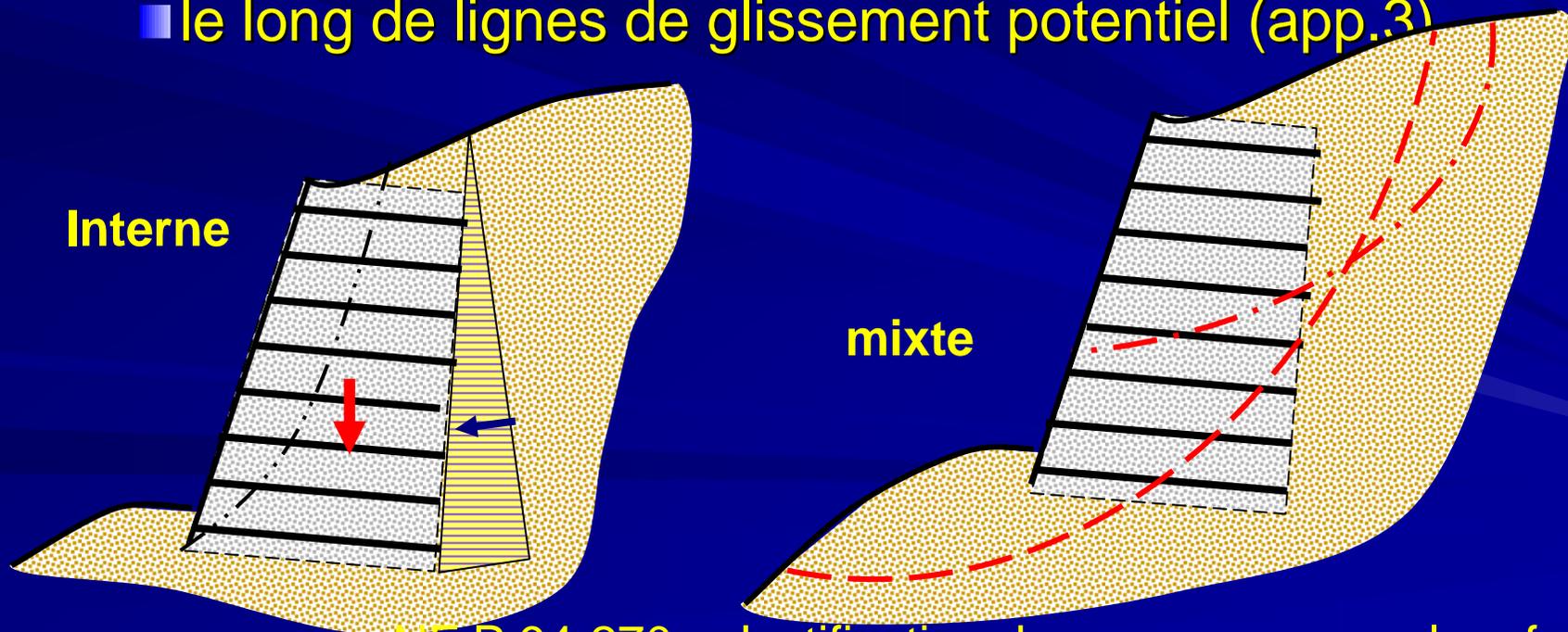
■ Distribution des renforcements, et parement

– 3. stabilité interne

■ suivant le comportement réel sous charges (app.2)

– 4. stabilité mixte

■ le long de lignes de glissement potentiel (app.3)



Stabilité mixte ↔ Stabilité interne

- Définie par rapport au risque de glissement en bloc, le long de surfaces qui recoupent le terrain et les renforcements
- Risque théorique (qui n'a pas de chance de se produire si l'ouvrage est bien dimensionné...)
 - privilégiée auparavant par P 94-240
- Liée à la façon dont l'ouvrage fonctionnera réellement, tout au long de sa durée de service
- En particulier, à l'ELU de rupture qui résultera de la dégradation inévitabile des renforcements
 - privilégiée auparavant par P 94-220

Les deux sont nécessaires !

Stabilité mixte \Leftrightarrow Stabilité interne

- Concept à "creuser" pour une version future
 - 2020 ?...
- Distinction dans le temps
- Stabilité mixte : liée surtout à la mobilisation de l'interaction sol renforcement, qui détermine, à *court terme*, le développement et la distribution des efforts
 - pendant la construction et la mise en service
- Stabilité interne : concerne surtout la résistance de traction des renforcements, à *long terme*, aux efforts ainsi développés

A propos de version future...

- **Modèles numériques**
- **Simplement évoqués dans la norme**
 - À propos de calculs de déformation (ELS)
 - A propos d'ouvrages complexes
 - **Catégorie géotechnique 3**
 - A l'appui de la justification de stabilité interne de certains mur cloués
- **Remis à plus tard comme méthode de *justification***
 - et, a priori, pas adaptés comme démarche de *dimensionnement*

2 - Dégradation des renforcements

- Une même formulation générale pour tous les types de renforcements
 - métalliques comme synthétiques
 - clous comme renforcements de remblai

$$R_{t;d} = \rho_{end} \rho_{flu} \rho_{deg} \frac{R_{t;k}}{\gamma_{M;t}}$$

Coefficients partiels

- ρ : coefficients de *réduction* spécifiques

- initial

 - ρ_{end} : endommagement à la mise en œuvre

- dans le temps

 - ρ_{flu} : évolution physique sous l'effet du fluage

 - ρ_{deg} : dégradation chimique

 - acier : corrosion

 - polyester : hydrolyse

- $\gamma_{M;t}$: coefficient partiel de *sécurité*

- deux éventualités :

- rupture

 - $\gamma_{M;t} = 1.25$ sur la résistance de rupture

- *déformation excessive*

 - $\gamma_{M;t} = 1.00$ sur la limite élastique (pour l'acier)

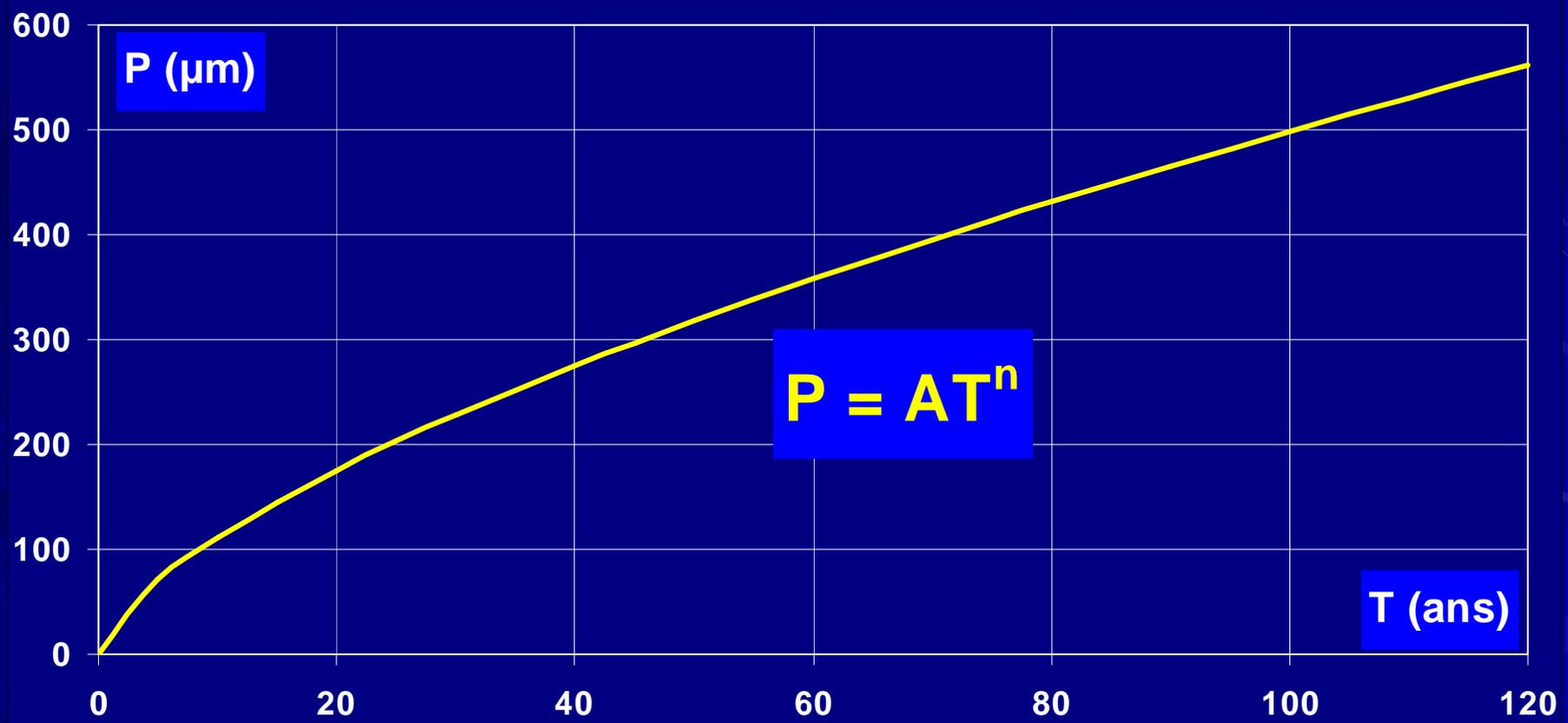
$$R_{t;d} = \rho_{end} \rho_{flu} \rho_{deg} \frac{R_{t;k}}{\gamma_{M;t}}$$

Prise en compte de la corrosion

■ Suivant l'analyse développée par TAI

■ 1 - Pénétration moyenne de la corrosion : $P = AT^n$

– fonction de T, avec $n < 1$

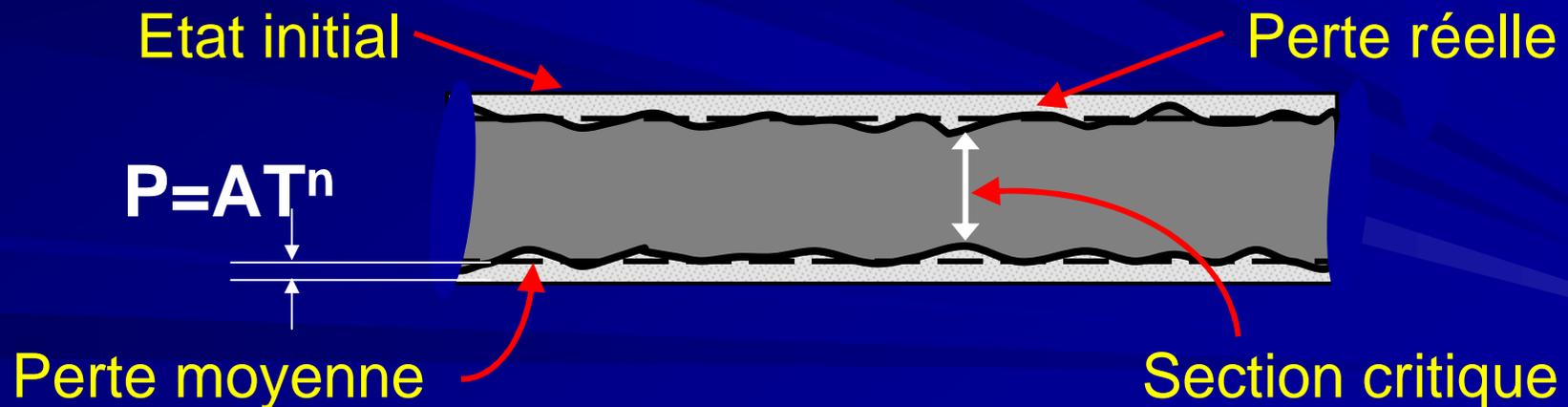


Prise en compte de la corrosion

- 2 - Perte de résistance dans la section critique : supérieure à la perte de section moyenne

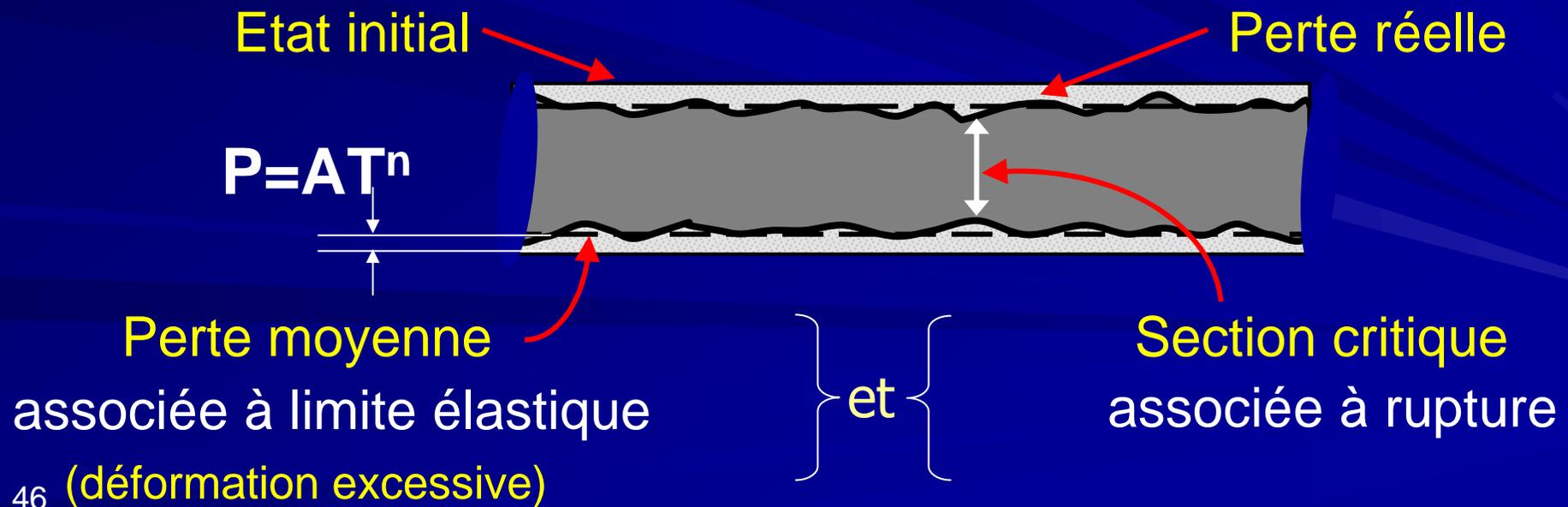
$$\Delta R/R_0 = K(\Delta S/S_0)$$

- A, n, K : données expérimentales, fonctions du milieu, du revêtement



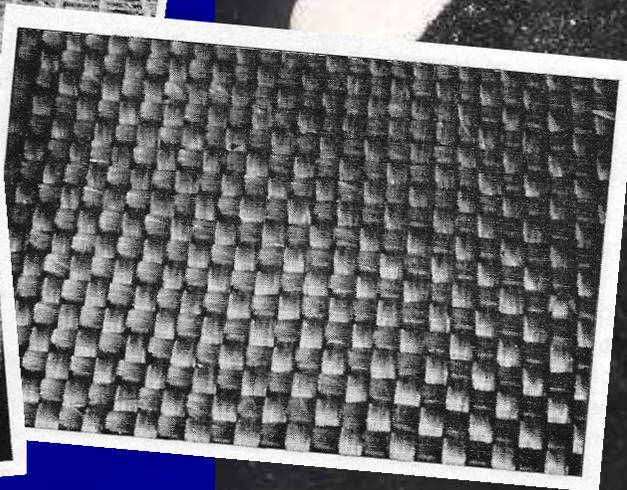
Prise en compte de la corrosion

- Le recours aux paramètres A , n et K se substitue aux anciennes "épaisseurs sacrifiées"
- Le principe s'applique aussi aux clous métalliques



**Le contexte normatif français des ouvrages en sol renforcé,
des origines à nos jours...**

Conclusion



1963

LA TERRE ARMÉE

HENRI VIDAL
Ingénieur de l'Ecole Polytechnique
Ingénieur civil de l'Ecole des Ponts et Chaussées
Architecte D.P.L.



