

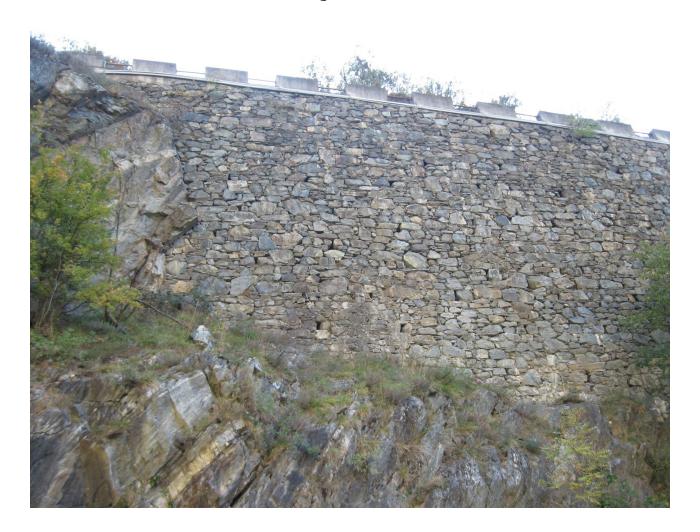
Direction des routes Service expertise

ETUDE DES MURS DE SOUTENEMENT EN MACONNERIE DE PIERRES SECHES

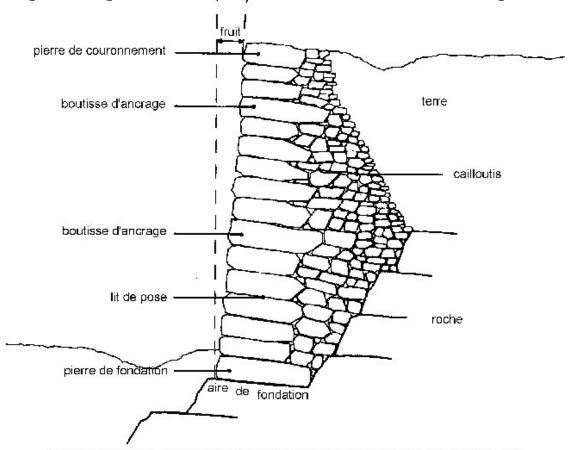


INTRODUCTION

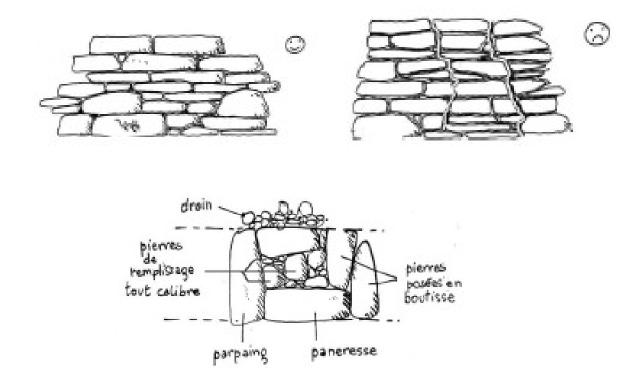
- Maçonnerie sans liant.
- Règles de l'art essentielles.
- Technique ancestrale répandue à travers le monde.
- Régions démunies : mise en œuvre sans eau ni ciment
- Europe méditerranéenne :
 - **préservation du patrimoine**, de l'environnement, des paysages ...
 - absence de cadre technique suffisant pour établir des documents reconnus
 - ⇒ Connaissance scientifique nécessaire



QUELQUES DISPOSITIONS TECHNIQUES



COUPE D'UN MUR DE SOUTENEMENT DE TERRASSE DE CULTURE



PLAN DE LA DEMARCHE

Etude théorique de la stabilité

I - Stabilité externe

- Le mur en pierre sèche doit se comporter comme un monolithe
- ⇒ Utilisation du cadre des murs poids

II - Stabilité interne

- Conditions pour garantir le quasi-monolithisme du mur
- ⇒ Coefficients de stabilité interne

Etude expérimentale

III - Essais en laboratoire

- Trois niveaux :
 - pierres
 - interfaces
 - maçonnerie elle-même (simplifiée)
- ⇒ Résultats expérimentaux

IV - Essais sur murs d'échelle 1 en calcaire

Validation du modèle

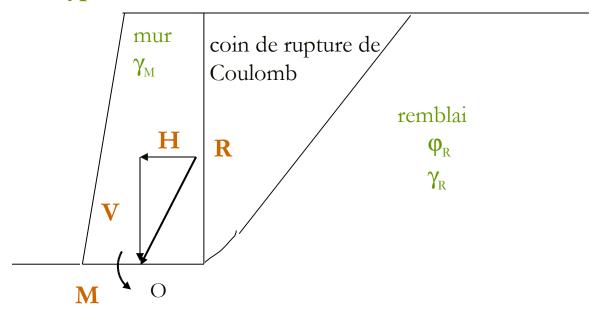
V - Essais sur mur d'échelle 1 en schiste

- Pierres plus élancées, mur plus régulier
- Vérification et enrichissement des résultats

Etude théorique de la stabilité

I - STABILITE EXTERNE

1 - Hypothèses

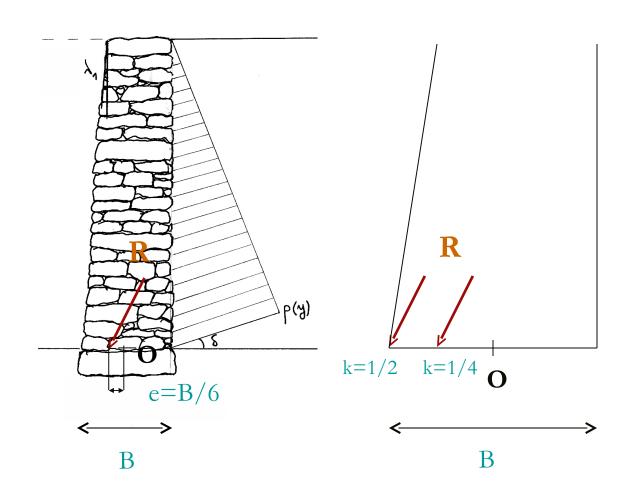


- Fondations rigides.
- Problème plan (transversalement au mur).
- Cadre des murs-poids pour un mur monolithe (faibles déplacements).
- Torseur M,V et H des efforts en O (milieu de la base)
 - R: résultante
 - V : composante verticale
 - **H**: composante horizontale
 - M: moment résultant
- Excentricité par rapport à O : e=M/V

I - STABILITE EXTERNE

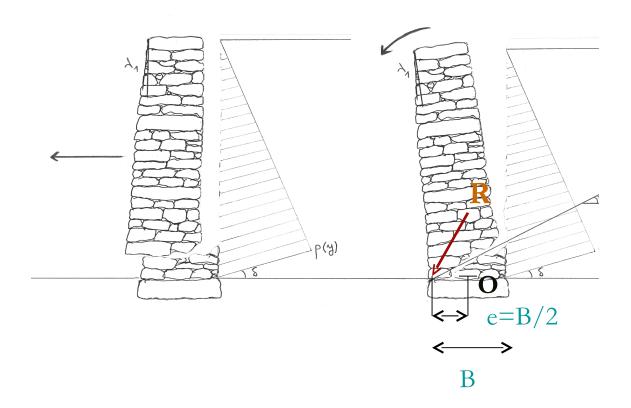
2 - Stabilité au renversement

- Excentricité relative : k = excentricité/Base
- Règle du « tiers central » : k < 1/6
- Fondation rigide: k < 1/4
- Rupture certaine: k > 1/2



II - STABILITE INTERNE

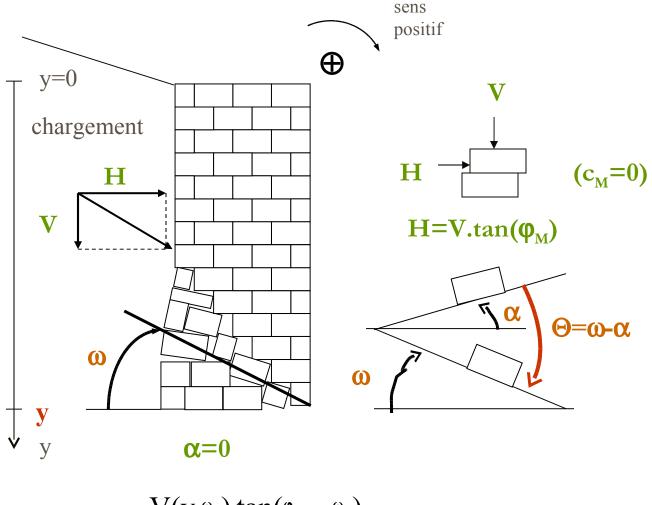
1 - Problématique



- Limites du comportement quasi-monolithique du mur
- Modes probables de rupture interne découplés : glissement interne renversement interne
- Coefficients de stabilité correspondants

II - STABILITE INTERNE

3 - Glissement interne



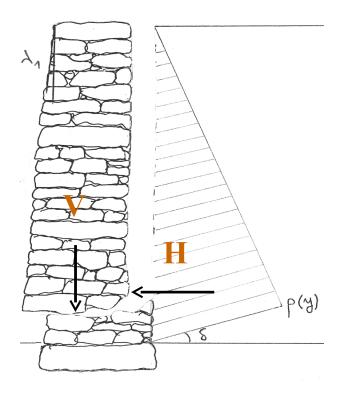
- $F_g(y,\omega) = \frac{V(y,\omega).tan(\phi M \omega)}{H(y,\omega)}$
- Glissement selon la stratification?
- Cinématique enrichie : glissement potentiel incliné de 🐠
- \forall $\mathbf{\omega}$ peut s'expliquer par l'existence de $\mathbf{\Theta}$ (rotation locale)
- F_g ne prend pas en compte la perturbation géométrique
- Rupture certaine pour : $F_g(y, \omega) < 1$

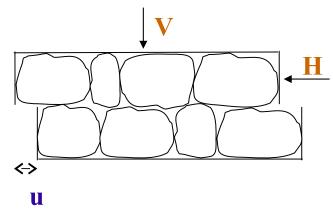
III - ESSAIS DE LABORATOIRE

2 - Essais de cisaillement

b - Essais de cisaillement inter-lits







V ⇔ hauteur du mur

H ⇔ poussée du remblai

u ⇔ déplacement horizontal du lit de pierre soumis à

V et H

IV - ESSAIS DE CHARGEMENT DE MURS EN TAILLE REELLE (CALCAIRE)

1 - Mise au point

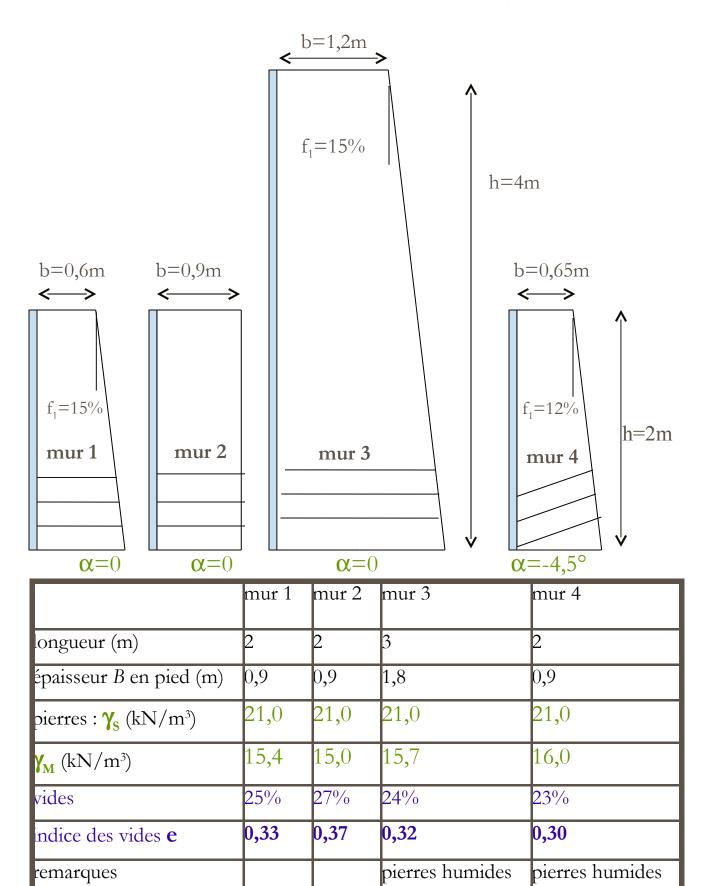
a - Principe

- Collaboration entre maçons, associations, collectivités territoriales, ministères.
- Construction des murs selon les règles de l'art avec la pierre calcaire de S^t-Gens.
- Chargement par pression d'eau (distribution connue).
- Instrumentation : capteurs et stéréophotogrammétrie.

b - Objectifs

- Faire varier la géométrie des murs
- Faire varier l'inclinaison des lits de pierres

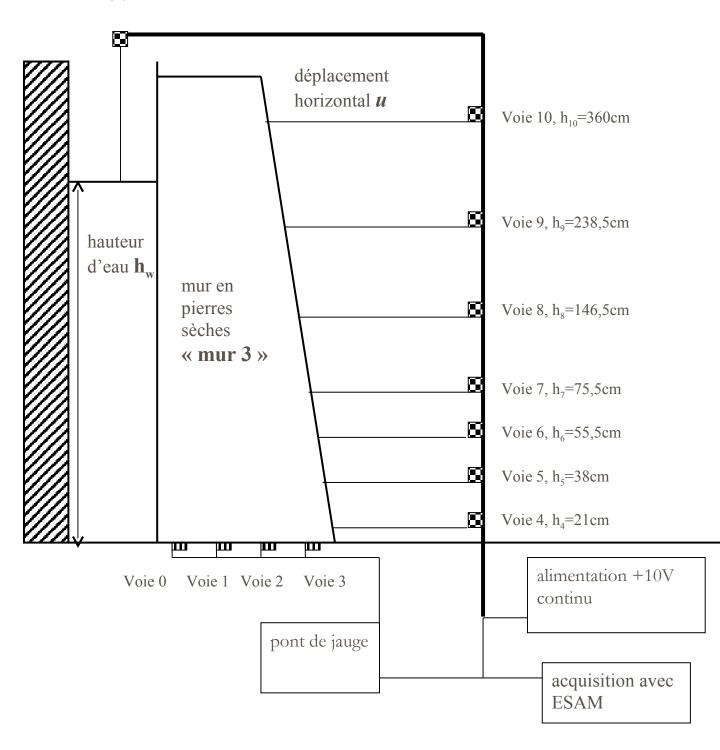
2 - Construction des murs et caractéristiques



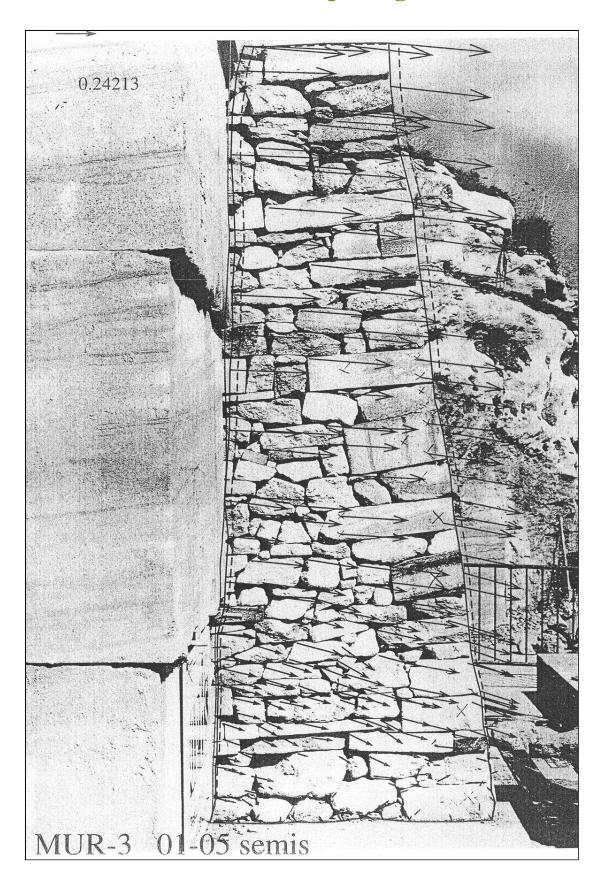
3 - Chaîne de mesure

a - Principe

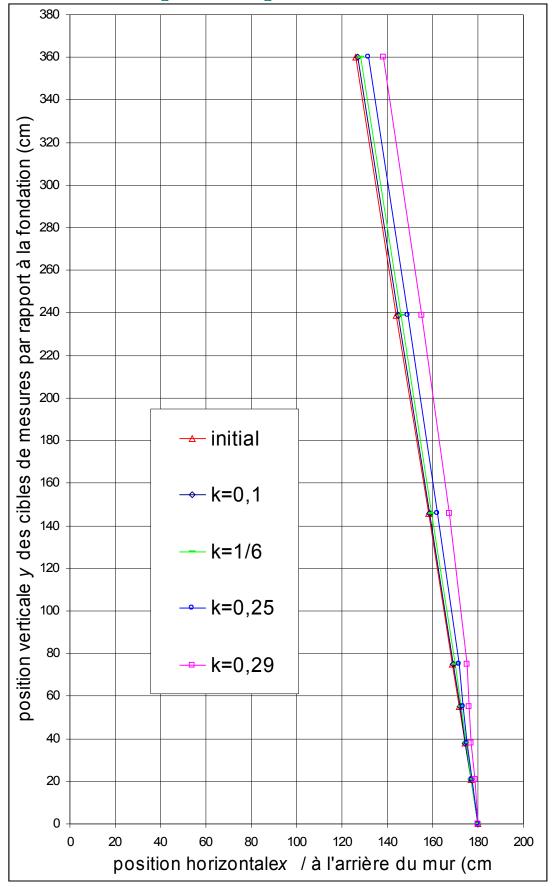
Voie 11



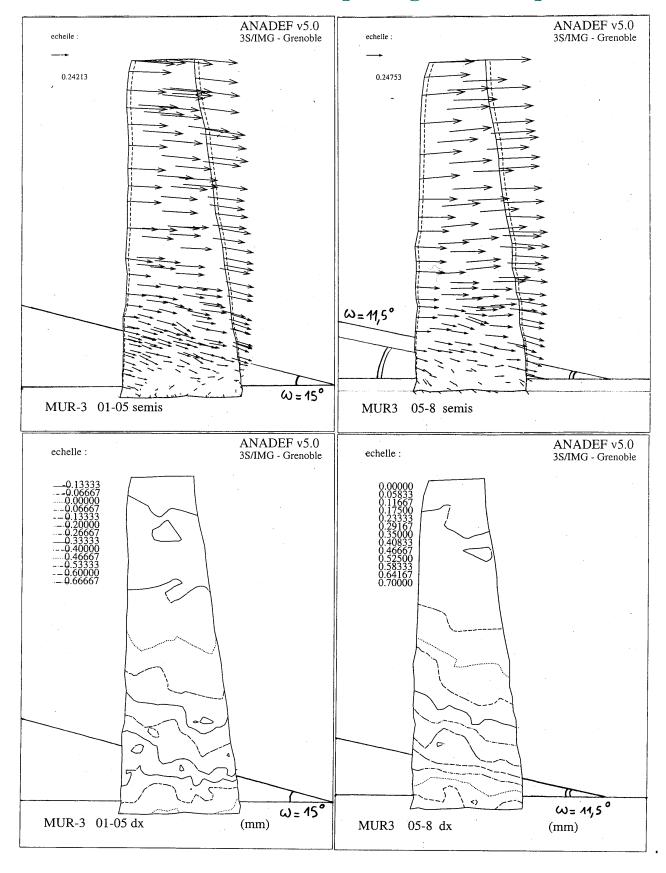
4 - Résultats bruts de la stéréophotogrammétrie



d - Evolution du profil du parement externe



f - Etude des mesures stéréophotogrammétriques



6 - Bilan de la mesure cinématique du mur 3

a - Méthode expérimentale

- Faibles déplacements : mesures par capteur et par stéréophotogrammétrie identiques.
- Grands déplacements : 15% de différence et conservation de l'allure de la déformée.
 - ⇒ méthodes complémentaires et fiables

b - Résultats

- Domaine de comportement quasi-monolithique (pour k<1/4)
- Rupture par glissement interne qui ne coïncide pas avec la stratification : $\omega=11,5^{\circ}$ ($\alpha=0^{\circ}$)
 - non visible sur les modèles réduits
 - explicable par l'existence d'une rotation locale: $\Theta = \omega \alpha$

V - ESSAIS DE CHARGEMENT DE MURS EN TAILLE REELLE (SCHISTE)

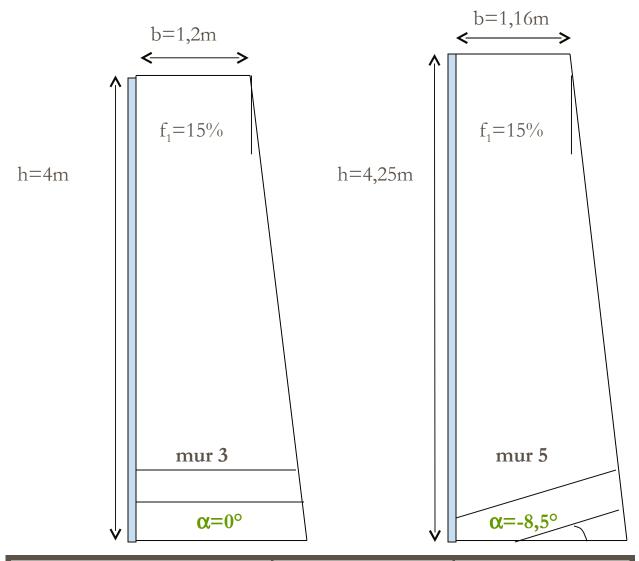
1 - Principe

- Continuité de la campagne expérimentale précédente
- Construction des murs selon les règles de l'art avec le schiste de « Galta »

2 - Objectifs

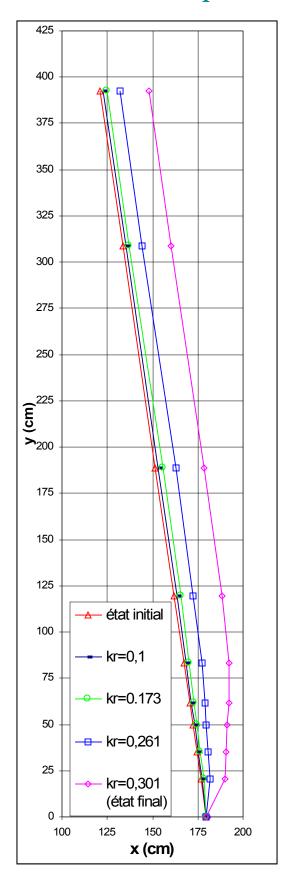
- Vérifier les résultats déjà obtenus pour une maçonnerie différente :
 - pierres plus élancées, moins résistantes, moins frottantes
 - maçonnerie plus régulière
- Enrichir les données expérimentales

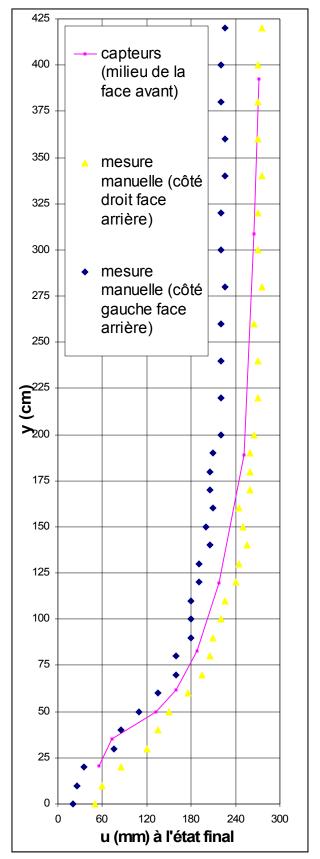
3 - Construction du mur et caractéristiques



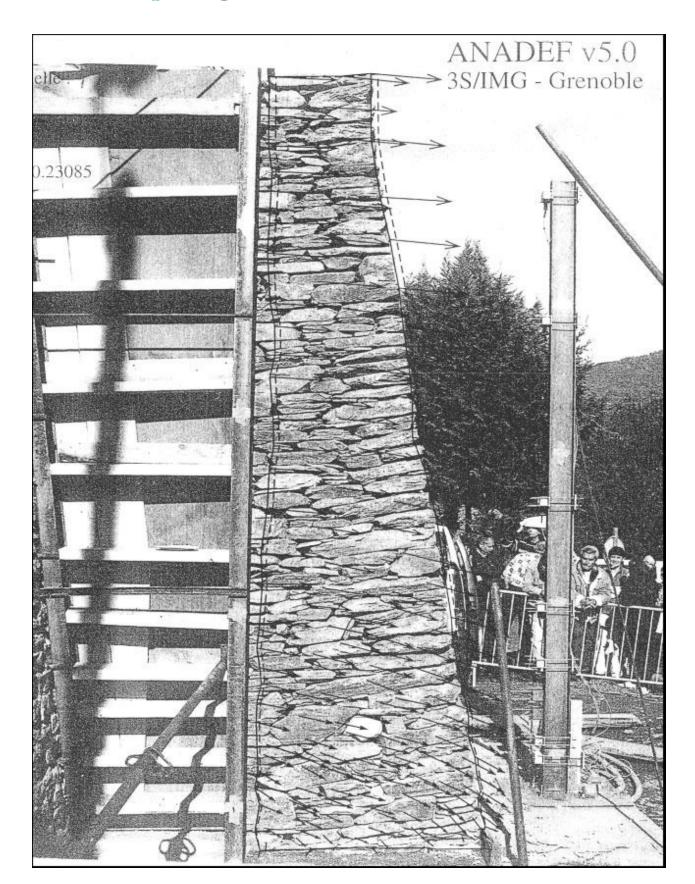
	mur 3	mur 5
ongueur (m)	3	2
épaisseur B en pied (m)	1,8	0,9
pierres : γ_s (kN/m ³)	21,0	26,5
$\gamma_{\rm M}$ (kN/m ³)	15,7	18,0
vides	24%	32%
ndice des vides e	0,32	0,47
assises	α=0°	α=-8,5°

b - Evolution du profil du parement externe

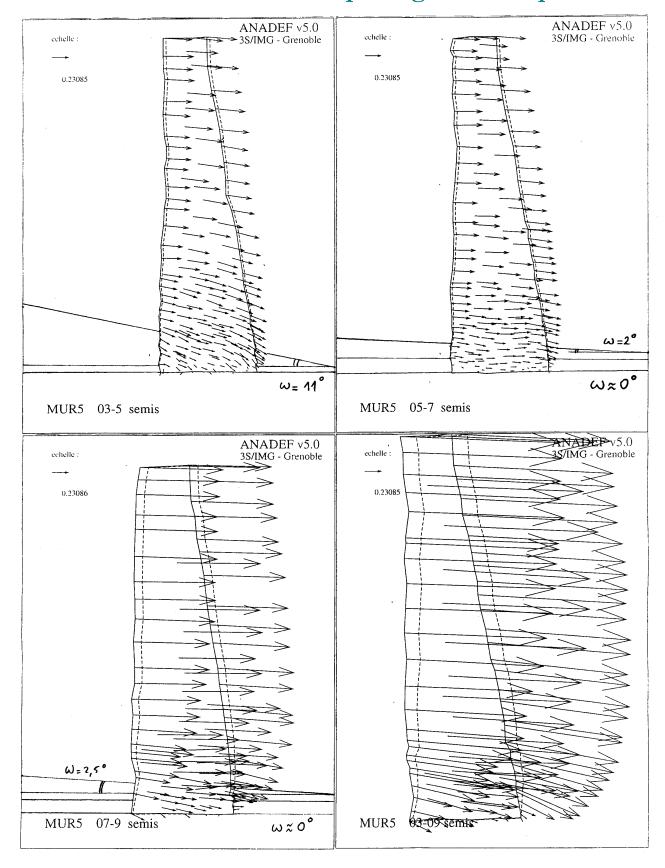


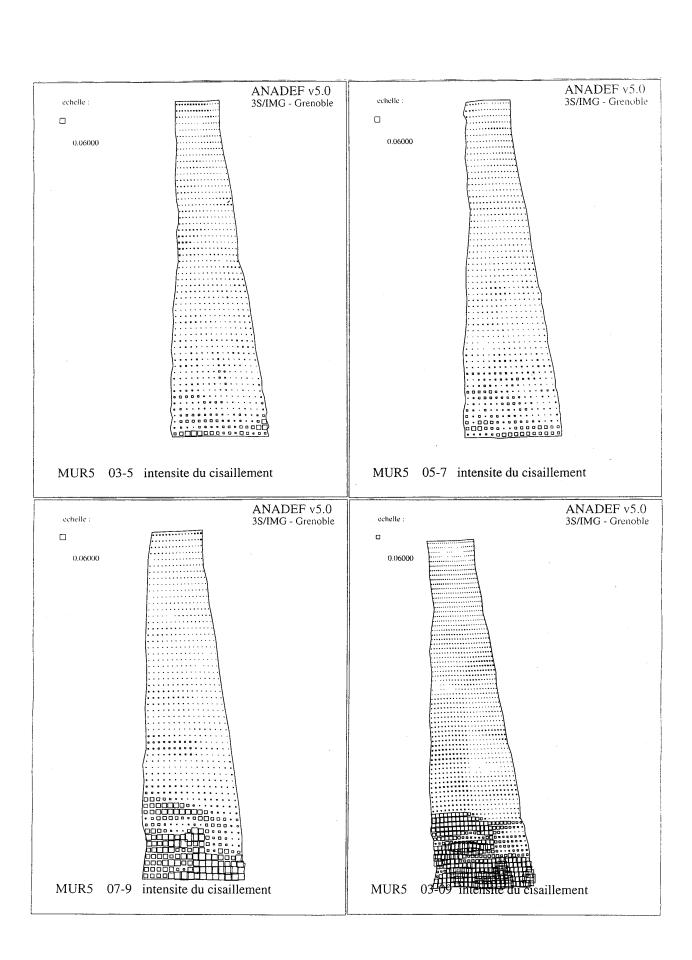


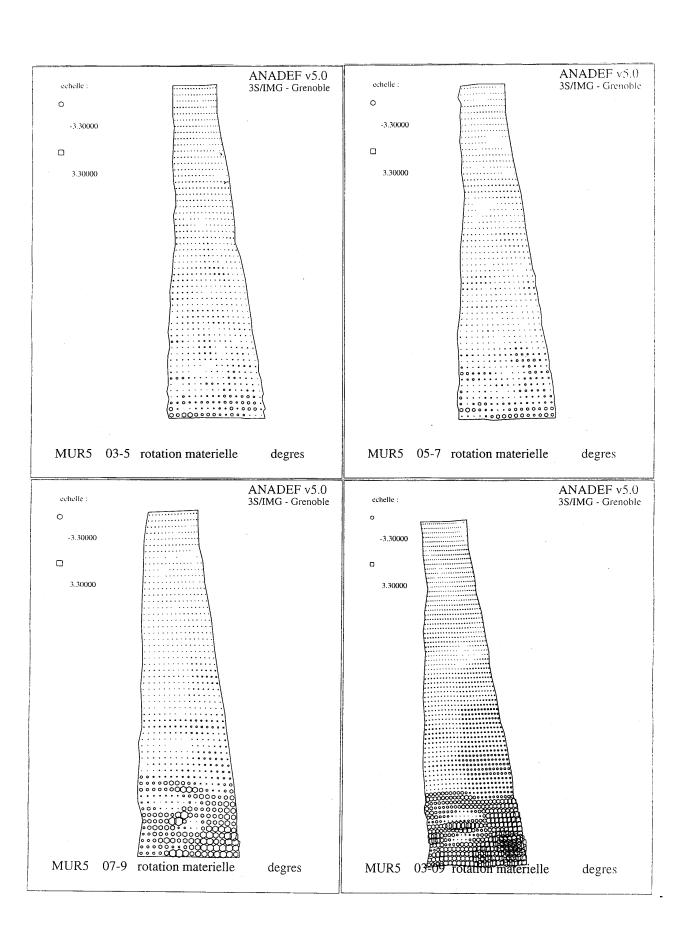
c - Stéréophotogrammétrie



e - Etude des mesures stéréophotogrammétriques









5 - Comparaison du modèle avec l'expérience pour le mur 5

a - Calculs

chargement limite : h _w = 3,62m	premier plan de	deuxième plan de
assises : $\alpha = -8,5^{\circ}$	glissement	glissement
glissement interne	oui	oui
renversement	non	non
k	0,31	0,31
F _r (h,0)	1,50	1,50
$F_{\rm g}$ (h- 0.1, α)	1,21	1,21
hauteur/fondation	h _g =15cm	h _g =30cm
angle d'inclinaison/horizontale	ω=0°	ω=2,5°
$F_{g}(h-h_{g}, \alpha)$	0,99	0,96
$\Theta = \omega - \alpha$	Θ=8,5°	Θ=11°
Θ des murs en calcaire	Θ=10,5°	Θ=11° (théorique)
	(mur 3 et 4)	(mur 1 et 2)

b - Résultats

- Adéquation des coefficients de stabilité
- Le glissement interne ne coïncide pas avec la stratification
- L'interprétation donne une rotation locale de même ordre de grandeur que pour les murs calcaires

CONCLUSION

a - Modèle de calcul

- Rustique, basé sur le calcul des murs poids
- Conditions de stabilité interne spécifiques :
 - renversement
 - glissement incliné de (différent de la stratification)

b - Expérience

- Adéquation des coefficients de stabilité du modèle
- Plan de glissement interne différent de la stratification
 - ⇒ nécessité de prendre en compte l'inclinaison **\omega** du glissement potentiel
 - ω non prévisible a priori mais limité par la technologie constructive (boutisses, ...)
 - interprétation : $\Theta = \omega \alpha \approx 10^{\circ}$
- Méthode expérimentale:
 - mesure des déplacements fiable et complémentaire (stéréo capteurs)
 - mesure des forces cohérente (efforts globaux)
 - distribution différente de l'hypothèse classique

c - Perspectives

- Analogie avec les matériaux granulaires (anisotropie et forte densité)
- Prédiction de ω