Chapitre 6

ANALYSE DES ESSAIS IN SITU CACTUS.

VI. ANALYSE DES ESSAIS IN SITU CACTUS.

L'étude du concept de stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde nécessite des expériences pour évaluer l'impact du chargement thermique provenant de ces déchets sur le massif avoisinant.

Les essais "CACTUS" (<u>ChAracterisation of Clay under Thermal loading for</u> <u>Underground Storage</u>) permettent une étude <u>dans des conditions in situ</u> des couplages entre champs thermiques, hydrauliques et mécaniques dans une <u>argile profonde</u>. Ces essais, conçus et réalisés par G.3S avec l'appui du Centre d'Études Nucléaires Belge (CEN/SCK), sont financés à parts égales par l'ANDRA et la Communauté Européenne. Ces expériences ont été conduites entre 1990 et 1993 dans les installations souterraines du CEN/SCK à Mol.

Ces essais consistent à installer une sonde chauffante dans un puits foré à partir d'une galerie souterraine et à mesurer divers paramètres thermohydromécaniques dans le massif argileux. Une période d'une année de chauffage suivie d'une année de refroidissement a été étudiée sur deux essais distincts de même géométrie.

Ces essais mettent en évidence certaines particularités de la réponse du massif lors des opérations suivantes, caractéristiques du concept de stockage en puits de déchets exothermiques :

- excavation d'un puits
- chauffage de ce puits
- refroidissement

VI.1. Présentation du projet "CACTUS"

VI.1.1. Objectifs généraux de l'essai "CACTUS"

Les essais "CACTUS" ont pour objectif premier <u>l'étude du comportement thermo-</u> <u>hydro-mécanique</u> du massif argileux autour d'une sonde chauffante. La puissance thermique a été ajustée afin de générer des élévations de température comparables à celles attendues pour un stockage réel.

La géométrie des essais s'apparente à une configuration du stockage en puits des déchets exothermiques. L'ambition de ces essais n'est cependant pas de valider un concept particulier de stockage, mais d'apporter des mesures in situ permettant de caractériser la "réponse" du massif pour un chargement thermique précis.

Chaque essai consiste à enfouir une sonde chauffante cylindrique dans le massif argileux instrumenté en périphérie pour mesurer l'ensemble des paramètres thermiques, hydrauliques et mécaniques au cours de cycles de chauffage et de refroidissement.

La mesure in situ de l'intensité des divers couplages au sein du massif argileux permet de les hiérarchiser et de proposer une modélisation pertinente. Cette expérience contribue ainsi à l'étude de sûreté d'un stockage de déchets radioactifs en milieu argileux.

Par ailleurs, de la même façon que pour d'autres essais in situ de nature géotechnique, l'essai "CACTUS" vise à tester la méthodologie, les procédures et l'instrumentation. L'expérience acquise dans ces essais sera profitable pour les essais futurs qui seront conduits dans d'autres laboratoires souterrains.



Figure 1: Laboratoire souterrain de Mol. Emplacement des 2 sondes "CACTUS".

VI.1.2. Présentation des essais in situ CACTUS

Le projet "CACTUS" se compose de 2 unités indépendantes, "CACTUS 1" et "CACTUS 2", installées dans le laboratoire souterrain de Mol à 230m de profondeur. Les sites des essais sont éloignés de 25m environ.

Un essai "CACTUS" comporte six forages de petit diamètre instrumentés par une soixantaine de capteurs au total. Ces forages sont disposés autour d'un puits central de plus grand diamètre dans lequel est enfouie une sonde chauffante.

L'instrumentation des forages périphériques est identique pour les deux essais.

Les mesures portent sur l'évolution des paramètres suivants:

- la température dans la sonde, le remblai et le massif,
- la contrainte mécanique exercée par le massif sur la sonde,
- la pression interstitielle, notamment dans le remblai et à proximité immédiate de la sonde,
- la teneur en eau dans la sonde et le massif,
- les contraintes mécaniques totales dans le massif,
- les déformations dans le massif.



Figure 2 : Schéma de principe d'un essai "CACTUS". Le centre de la sonde est placé à 14 mètres sous la galerie d'essai.

Ces capteurs sont installés plusieurs mois avant de forer le puits principal contenant la sonde, on peut ainsi mesurer les perturbations crées par ce forage. L'amorce de la phase de chauffage de la sonde est assujettie à une relative stabilisation des valeurs mesurées sur l'ensemble du dispositif.

Les périodes de chauffage sont suivies de périodes de refroidissement de longue durée. L'étude du refroidissement du massif a également de l'importance compte tenu de la décroissance de la puissance thermique émise par les déchets.

Toutes les mesures sont automatiques, le rythme d'acquisition allant de 4 à 24 mesures par jour. Font exception les mesures de densité et de teneur en eau qui sont faites manuellement tous les mois.

VI.1.3. Vue générale de l'instrumentation.

Un relevé précis de la position des forages a été effectué lors de l'installation des capteurs. Les figures 3, 4 et 5 donnent une vue générale de l'instrumentation.



Figure 3 : Vue en élévation des capteurs de l'essai "CACTUS 1".



Figure 4: Vue en élévation des capteurs de l'essai "CACTUS 2".

On note que la quasi-totalité des capteurs est placée dans un rayon compris entre 0,5m et 1m de l'axe de la sonde, c'est-à-dire deux et quatre fois le rayon du puits central

Les mesures de température sont les plus nombreuses. Une quarantaine de capteurs sont répartis dans tous les forages périphériques, et on compte de plus une vingtaine de points de mesures sur la sonde.

Dans chaque essai, les contraintes totales dans le massif sont déterminées dans deux forages contenant chacun cinq cellules. Trois d'entre elles donnent la valeur de la <u>compression</u> selon un axe horizontal dirigé vers la sonde (mesure radiale), les deux autres indiquent les compressions selon un axe horizontal perpendiculaire au précédent (mesure orthoradiale).

La mesure in situ des contraintes dans le massif est difficile. En multipliant les points de mesures (10 cellules dans chaque essai), on tente de pallier aux incertitudes existant pour la détermination de cette grandeur.

Un extensomètre est placé dans un forage incliné vers la sonde. L'inclinaison par rapport à la verticale reste cependant très faible, et cet appareillage donne en fait la <u>déformation verticale</u> du massif à une distance d'environ un mètre de la sonde.

La mesure de la pression interstitielle dans le massif est obtenue par cinq filtres placés dans le même forage. Ces filtres sont reliés à des capteurs situés dans la galerie d'essai.

Trois autres capteurs de pression sont placés sur la sonde chauffante, ils donnent la pression dans la boue de colmatage autour de la sonde.



Figure 5 : Position des forages au niveau du plan médian de la sonde. A gauche : essai "CACTUS 1". A droite : essai "CACTUS 2".

Une description des caractéristiques des capteurs est donnée en Annexe à ce chapitre.

VI.1.4. Procédures de mise en place des sondes "CACTUS"

Le forage du puits central de l'essai "CACTUS 1" a été réalisé en deux phases. La première phase consiste à forer un trou de diamètre 610 mm sur 11,2 m de profondeur ; il a été équipé d'un tubage métallique définitif de diamètre extérieur 559 mm.

Dans une seconde phase, le forage se poursuit en diamètre 500mm jusqu'à la profondeur de 15,8 m.

La rapidité de cette phase est essentielle pour limiter la convergence de la paroi par fluage avant le scellement définitif. Elle a été réalisée en continu (24 heures sur 24) en 23 heures sur l'essai "CACTUS 1" et 48 heures sur l'essai "CACTUS 2", (suite à un incident de forage).

Pour les deux essais, les sondes sont installées dans leur emplacement définitif dès la fin des travaux de creusement. L'espace annulaire entre la sonde et le massif (10 cm d'épaisseur) est rempli avec un coulis d'argile dont la composition a été étudiée au laboratoire. Il s'agit d'<u>un mélange d'Argile de Boom et d'eau (boue de colmatage</u>) d'une teneur en eau massique de 65 %.

Ce matériau de remplissage répond aux spécifications suivantes :

- matériau saturé,
- facile à déposer par injection autour de la sonde,
- propriétés thermiques aussi proches que possible de celles du massif,
- consolidation rapide et aussi faible que possible.

Au-dessus de la boue est placée une couche de matériau souple et étanche. Il s'agit du <u>polysol</u>, un polymère utilisé comme joint d'étanchéité dans les fondations en génie civil. Cette couche est injectée par une pompe de la même façon que la boue. Après polymérisation, elle forme un matelas étanche et souple au-dessus de la sonde. Le puits est ensuite fermé par un bouchon de <u>ciment</u> d'environ 1 m d'épaisseur, puis par une colonne de <u>béton</u>.



Figure 6 : Schéma de mise en place de la sonde "CACTUS 1"

VI.1.5. Dates des travaux et chargements thermiques.

Les deux essais ont été réalisés entre 1989 et 1993. Ils débutent par la réalisation des forages périphériques et l'instrumentation de ces forages. Le puits central est réalisé quelques mois après, il est immédiatement suivi par l'installation de la sonde.

L'évolution de l'état hydromécanique du massif est observée pendant quelques mois, puis débutent les périodes de chauffage et de refroidissement. Deux périodes de chauffage ont été réalisées sur chacun des essais, une de courte durée (environ un mois) et une plus longue (environ une année).

	ESSAI		"CACTUS 1"		
Période	Date	(Jour)	Durée	Puissance	Perte
Forages périphériques.	Déc 89 à Mars	90	-	-	-
Forage du puits central	15-21 Mai 90				
Mise en place sonde n°1	21 Mai 90	(140)			
1 ^{er} Chauffage	26 Sept. 90	(268)	47 jours	4000 à 1200W	10%
1 ^{er} Refroidissement	12 Nov. 90	(315)	122 jours	ow	
2 ^{ème} Chauffage	14 Mars 91	(437)	298 jours	1200W	14 à 17%
2ème Refroidissement	6 Janv. 92	(735)	> 700 jours	ow	

Tableau 1 : Principaux événements de l'essai "CACTUS 1". Les n° de jours sont comptés depuis le 01/01/90.

	ESSAI		"CACTUS 2"		
Période	Date début	(Jour)	Durée	Puissance	Perte
Forages périphériques.	Fév. à Juil. 90		-	-	-
Forage du puits central	5-10 Déc 91				
Mise en place sonde n°1	10 Déc 91	(708)			
1 ^{er} Chauffage	10 Fév. 92	(770)	378 jours	1200W	4%
1 ^{er} Refroidissement	4 Mars. 93	(1158)	216 jours	ow	
2 ^{ème} Chauffage	7 Oct. 93	(1374)	33 jours	2500W	4%
2 ^{ème} Refroidissement	8 Nov. 93	(1407)	≈ 100 jours	ow	

Tableau 2 : Principaux événements de l'essai "CACTUS 2". Les n° de jours sont comptés depuis le 01/01/90.

Au cours des chauffages de longue durée, la puissance thermique a été maintenue à 1200 W dans les deux essais ce qui facilite la comparaison des résultats.

Une partie de la puissance thermique imposée est cependant dissipée et elle ne contribue pas au chauffage de la sonde (voir les colonnes "perte" dans le tableau 2).

Lors du chauffage de courte durée de l'essai 1, la puissance thermique est variable, elle est ajustée de façon à maintenir la température de la sonde à une valeur constante. Ce chauffage a été interrompu à la suite d'un incident électrique survenu après 47 jours de chauffe.

Le chauffage de courte durée de l'essai 2 est réalisé en fin d'expérience avec une puissance thermique élevée. Un objectif de ce chauffage est d'activer éventuellement un écrouissage thermique de l'argile du massif.

VI.2. Mesures in situ avant la phase de chauffage.

Cette partie est consacrée aux résultats avant la mise en chauffe des essais. On s'intéresse :

- aux effets du creusement du puits central où est placée la sonde
- aux évolutions différées qui ont suivi.

La détermination de l'état du massif avant la mise en route du chauffage est en effet essentielle pour mener à bien l'interprétation des phénomènes liés au chargement thermique.

VI.2.1. Etat initial (avant excavation).

Les capteurs dans le massif fournissent des mesures stables quelques mois après leur installation. On relève alors:

-une pression d'eau moyenne de 0,84 MPa dans l'essai 1.

-une pression d'eau moyenne de 1,07 MPa dans l'essai 2.

-des contraintes totales (compression) de 1 à 1,2 MPa dans l'essai 1.

-des contraintes totales (compression) de 1 à 1,6 MPa dans l'essai 2.

ESSAI	"CACTUS 1"	ESSAI	"CACTUS 1"	
Distance depuis la galerie	Pression interstitielle (S1PI)	Distance depuis la galerie	Contrainte horizontale (S1SMA)	Contrainte horizontale (S1SMB)
12,6 m	0,69 MPa	14,0 m	1,29 MPa	1,41 MPa
13,3 m	0,71 MPa	14,3 m	0,91 MPa	1,03 MPa
14,0 m	0,74 MPa	14,6 m	0,91 MPa	1,18 MPa
14,7 m	0,88 MPa	14,9 m	0,92 MPa	0,99 MPa
15,4 m	1,17 MPa	15,1 m	(0,06 MPa)	1,28 MPa
Moyenne	0,84 MPa	Moyenne	1,01 MPa	1,18 MPa

Tableau 3 : Mesures hydromécaniques avant excavation du puits central ("CACTUS 1").

ESSAI	"CACTUS 2"	ESSAI	"CACTUS 2"	
Distance depuis la galerie	Pression interstitielle (S2PI)	Distance depuis la galerie	Contrainte horizontale (S2SMC)	Contrainte horizontale (S2SMD)
12,6 m	0,96 MPa	13,7 m	1,59 MPa	1,06 MPa
13,3 m	1,00 MPa	14,1 m	1,61 MPa	0,90 MPa
14,0 m	1,04 MPa	14,5 m	(1,00 MPa)	1,00 MPa
14,7 m	1,08 MPa	14,9 m	1,54 MPa	0,94 MPa
15,4 m	1,28 MPa	15,3 m	1,54 MPa	0,89 MPa
Moyenne	1,07 MPa	Moyenne	1,57 MPa	0,96 MPa

Tableau 4 : Mesures hydromécaniques avant excavation du puits central ("CACTUS 2").

Ces valeurs des contraintes et des pressions initiales sont bien inférieures aux valeurs des pressions litho-statiques à cette profondeur. Compte tenu du poids des terres et de la hauteur de nappe en eau sur ce site, les valeurs attendues sont :

- 4,7 MPa pour la contrainte verticale,

- 2,2 MPa pour la pression d'eau.

Cet écart n'est pas propre aux mesures faites dans ces essais in situ, de telles différences se rencontrent également sur d'autres expériences in situ sur le même site d'essai. On peut suggérer diverses explications à ces résultats, les plus communément admises étant celles-ci :

1/ La construction de la galerie d'essai, qui a eu lieu 5 ans auparavant, a fortement décomprimé le massif. La zone proche de la galerie est alors dans un état hydromécanique bien différent de l'état litho-statique.

2/ L'installation des capteurs nécessite un forage de petit diamètre (5 à 10cm). Ce forage décomprime localement le massif, et la zone très proche plastifie. On mesure un état de contraintes perturbé par le forage qui a servi à placer le capteur.

Il est très difficile d'obtenir des mesures fiables des contraintes in situ. Quel que soit le diamètre du forage recevant les appareils de mesures, on a inévitablement une décompression du massif autour de ce forage. Ainsi, même si l'on dispose d'un appareillage précis, les valeurs mesurées ne sont pas représentatives de l'état de contraintes existant dans le massif.

L'état hydraulique est également perturbé juste après l'installation des capteurs, mais après quelques mois la pression interstitielle est rétablie. En effet, à moins d'une étanchéité imparfaite autour du forage, on mesure après équilibre une pression d'eau égale à celle existant dans le massif.

La "faible" valeur de pression interstitielle est certainement due à la proximité de la galerie d'essai, qui agit à la manière d'un drain dans le massif. Cette valeur ne résulte pas d'un défaut de mesure, mais d'un écart réel entre la pression attendue et la pression existante.

Par conséquent, on adopte l'attitude suivante dans l'analyse des résultats :

- -la mesure de la <u>pression</u> est considérée comme <u>représentative</u> de l'état du massif au voisinage de la sonde,
- on accorde une importance moindre à la valeur absolue de la mesure de contraintes totales,
- en revanche, on suppose que les <u>variations des contraintes</u> mesurées représentent des variations identiques de l'état de contrainte dans le massif.

VI.2.2. Effets de l'excavation du puits central.

La mise en place de la sonde se décompose en deux étapes :

- l'excavation du puits central où sera placée cette sonde ;
- le rebouchage de ce puits avec des matériaux assurant l'étanchéité du forage.

Le forage étant effectué 'à sec', la paroi du puits n'est pas soutenue après le passage de l'outil. La réponse du massif dépend alors de l'état hydromécanique initial du massif et du diamètre du forage.

Variation de contrainte

La figure 7 montre les mesures de contraintes dans le massif lors du passage de l'outil de forage à proximité des capteurs.



Figure 7 : Evolutions des contraintes, du déviateur et de la pression interstitielle durant la phase d'excavation (CACTUS 1). A gauche contrainte à 95cm, à droite contraintes à 150cm.

On note

- une augmentation de la compression orthoradiale
- une diminution de la compression radiale.

Cette réponse du massif est conforme à ce que l'on attend lors de la réalisation d'un forage, la compression orthoradiale permettant de supporter la décompression des contraintes radiales ("effet de voûte").

Les <u>variations des contraintes</u> mesurées dans l'essai 1 sont données dans le tableau 3. Certaines valeurs atypiques ont été mises entre parenthèses. Ces mesures sont cohérentes entres elles :

- -les variations radiales et orthoradiales sont de même ordre de grandeur en valeur absolue.
- -l'amplitude des variations de contraintes diminue avec la distance à l'axe du puits.

Distance à l'axe du puits : 95 cm (S1SMB)			
Profondeur	$\Delta \sigma$ (compression)		
12,6 m (rad.)	- 0,35 MPa		
13,3 m (ortho.)	+ 0,18 MPa		
14,0 m (rad.)	-0,24 MPa		
14,7 m (ortho.)	+0,24 MPa		
15,4 m (rad.)	(-0,50 MPa)		
Radial moyen	-0,30 MPa		
Orthoradial moyen	+0,22 MPa		

(S1SMA)	•
Profondeur	$\Delta\sigma$ (compression)
14,0 m (rad.)	- 0,08 MPa
14,3 m (ortho.)	+0,13 MPa
14,6 m (rad.)	- 0,04 MPa
14,9 m (ortho.)	+ 0,13 MPa
15,1 m (rad.)	(+0,03 MPa)
Radial moyen	- 0,06 MPa
Orthoradial moyen	+ 0,13 MPa

Distance à l'axe du puits : 150 cm

Tableau 5: Variations de contraintes (en compression) lors de l'excavation du puits central ("CACTUS 1").

Pression interstitielle

La pression interstitielle dans le massif chute pendant l'excavation du puits central.

Les valeurs de <u>pression interstitielle</u> après excavation sont mêmes en deçà de la valeur minimale accessible par ce système de mesure. En effet, la pression d'eau doit être environ de 0,15 MPa au-dessus de la pression atmosphérique pour que l'eau puisse remonter jusqu'au capteur placé dans la galerie.

L'origine de cette chute de pression peut être attribuée :

- soit à un écoulement hydraulique du massif vers le puits,
- soit à une variation de l'état de contrainte totale du massif, en particulier une variation de la contrainte moyenne de compression.

Il est a priori peu probable que la diffusion hydraulique soit responsable des chutes de pression. En effet, avec une diffusivité hydraulique de l'argile de Boom d'environ 10^{-07} m²/s, la distance caractéristique de diffusion hydraulique au bout d'une journée est inférieure à 10cm. Un écoulement hydraulique de cette nature ne peut donc expliquer une chute de pression aussi rapide à plus de 30cm de la paroi du puits.

La réponse du massif lors de l'excavation dépend du comportement non drainé de l'argile. La chute de pression provient d'une diminution du même ordre de grandeur de la compression moyenne dans le massif. En effet, en condition non drainée, les variations de ces deux quantités sont proportionnelles. Cependant, un examen de la paroi du puits de l'essai "CACTUS 2" a révélé la présence de fissurations en paroi. Si ces fissures s'étendent à l'intérieur du massif, la perméabilité est fortement modifiée. En ce cas, le rôle de la diffusion hydraulique ne doit pas être sous-estimé.

VI.2.3. Calcul de la décharge mécanique due à l'excavation.

L'état de contrainte initial dans le massif est mal connu, les mesures in situ sont en effet peu fiables. On donne dans cette partie une estimation de la valeur des contraintes en s'appuyant sur une analyse des variations de contrainte au cours de l'excavation. Le forage étant effectué 'à sec', la décompression lors de cette excavation est fonction de la valeur de la contrainte initiale dans le massif.

La différence entre les contraintes radiales et orthoradiales définit un <u>déviateur</u> de contraintes. La variation de ce déviateur au cours de l'excavation est dans notre analyse une mesure a priori plus fiable que la valeur absolue des compressions.

Dans l'essai "CACTUS 1", on relève ainsi un déviateur moyen de

- 0,52 MPa à une distance de 0,95m de l'axe du puits,

- 0,19 MPa à une distance de 1,50m (tableau 5).

Selon un calcul classique en géotechnique, le déviateur créé par un forage est inversement proportionnel au carré du rayon (loi en $1/r^2$). Ce résultat est obtenu dans un calcul élastique linéaire d'une excavation d'un puits de longueur infinie dans un milieu homogène et isotrope.

Dans ces mesures, le rapport entre les déviateurs mesurés et le rapport du carré des rayons valent respectivement 2,7 et 2,5. Le profil du déviateur en fonction du rayon suit approximativement une loi en $1/r^2$.

Sachant par ailleurs que la cohésion à court terme de l'argile de Boom est estimée à 1MPa, le déviateur ne peut excéder cette valeur de 2,0MPa. Compte tenu de ce qui précède, toute la région située en deçà d'un rayon de 50cm de l'axe du puits central plastifie au cours de l'excavation.

Un autre résultat classique en géotechnique porte sur l'évolution de la contrainte radiale dans la zone plastique. Dans l'hypothèse d'une excavation d'un puits d'une longueur infinie dans un massif homogène élastoplastique suivant un <u>modèle élastoplastique parfait de Tresca</u>, la simple écriture de l<u>'équilibre mécanique</u> donne le résultat suivant <u>dans la zone plastique</u> :

$$\Delta \sigma_{\rm rr} = \Delta \sigma_0 - 2C \ln(\frac{r}{r_0})$$

où $\Delta \sigma_0$ est la variation de contrainte en paroi, r₀ le rayon du puits excavé et C la cohésion.

Ainsi, connaissant le rayon plastique r_p, on en déduit la valeur de la décharge en paroi :

$$\Delta \sigma_0 = C + 2C \ln(\frac{r_p}{r_0})$$

La figure 8 présente les profil de contraintes obtenus en suivant cette analyse.



Figure 8 : Profil des contraintes lors de l'excavation obtenu par un calcul simplifié avec un modèle élastoplastique de Tresca.

Compte tenu d'une incertitude sur la valeur de la cohésion, on obtient les estimations du tableau 6.

Cohésion	Rayon plastique	Décharge en paroi
0,8 MPa	0,53 m	2,0 MPa
1,0 MPa	0,47 m	2,3 MPa
1,2 MPa	0,43 m	2,5 MPa

Tableau 6 : Estimation du rayon plastique et de la décharge en paroi (r=0,25m) obtenus à partir des mesures de déviateurs.

Pour conclure, on retiendra les points suivants :

- Le rayon plastique est d'environ 50cm (deux fois le rayon du puits).
- L'état de contraintes dans le massif avant excavation est compris entre 2 et 2,5 MPa.

Cette analyse mérite toutefois d'être complétée par des calculs plus élaborés.

VI.2.4. Evolutions différées après le rebouchage du puits

Après excavation du puits, la sonde est installée et le puits est rebouché de façon étanche. On assiste au cours des mois suivants à une évolution différée de l'état hydromécanique du massif.

Le caractère viscoplastique de l'argile de Boom donne lieu à une redistribution des efforts au sein du massif. Ces évolutions proviennent également des écoulements hydrauliques au sein du massif. On se référera à cette phase sous le nom de "<u>reconsolidation</u> <u>du massif</u>".

L'étude de cette phase est importante afin de déterminer l'état du massif lorsque débute le chauffage.

On retient de l'analyse des résultats d'essais les caractéristiques suivantes :

- l'état de contrainte évolue dans le sens d'une compression dans les deux directions horizontales (radiale et orthoradiale),
- le déviateur diminue,
- la remontée des pressions dans le massif est précédée d'un palier à la pression minimale du système de mesure,
- en revanche les pressions d'eau dans la boue de colmatage autour de la sonde augmentent dès que le puits est rebouché.



Figure 9 Évolution hydromécanique dans le massif et dans la boue de colmatage durant la phase de reconsolidation après excavation. A gauche pressions interstitielles, à droite contraintes (CACTUS 1)

Ces observations se renouvellent lors de la mise en place du deuxième essai "CACTUS 2". On note en particulier que l'évolution de la pression d'eau dans le massif est identique dans les deux essais.

De façon générale, l'analyse des concordances entre ces deux essais donne une bonne impression sur la qualité de ces mesures.



Figure 10 : Évolution hydromécanique dans le massif et dans la boue de colmatage durant la phase de reconsolidation après excavation. A gauche pressions interstitielles, à droite contraintes (CACTUS 2). On note une anomalie de contrainte moyenne dans les jours qui suivent l'excavation.

VI.2.5. Bilan de la phase isotherme.

Les essais CACTUS ont été conçus à l'origine pour une étude thermique mais la richesse des mesures faites en phase isotherme mérite d'être soulignée. En effet :

- les mesures sont cohérentes entre elles,
- elles sont faites en nombre suffisant pour pouvoir apprécier les erreurs expérimentales,
- elles portent sur deux essais distincts réalisés dans les mêmes conditions.

Le <u>forage</u> entraîne des <u>variations brusques</u> de contraintes et de pressions dans le massif à proximité du puits. Par conséquent, cette phase met en jeu les <u>caractéristiques à court terme</u> du matériau, et en particulier les <u>caractéristiques non drainées</u>.

Cette excavation provoque donc des perturbations importantes de l'état du massif à proximité du puits. Une zone plastique s'étend vraisemblablement jusqu'à un rayon de 50cm autour du puits. La convergence en paroi du puits n'est pas mesurée, mais l'analyse d'autres expériences à Mol a montré que les <u>déformations sont importantes</u>. On note de plus que des <u>traces de fissuration</u> ont été relevées lors d'un examen de la paroi du puits.

<u>Après le rebouchage du puits</u>, les paramètres hydromécaniques du massif évoluent sans qu'il y ait de chargement mécanique ou hydraulique imposé de l'extérieur. Cette phase met donc en jeu la <u>réponse différée</u> du massif après excavation.

Cette évolution des paramètres s'étend sur <u>plusieurs mois</u>. Cette durée est compatible avec le temps caractéristique de diffusion hydraulique entre l'emplacement des capteurs et la paroi du puits, mais également avec les temps caractéristiques de fluage obtenu lors d'essais de laboratoire sur ce matériau. Ainsi, les effets différés résultent vraisemblablement :

- d'un écoulement hydraulique du massif vers le puits

- des propriétés viscoplastiques de l'argile.

Au cours de cette phase les deux contraintes horizontales évoluent dans le sens d'<u>une</u> <u>compression</u>, tandis que la pression d'eau interstitielle revient à son niveau d'origine.

On remarque cependant <u>une stagnation des pressions d'eau</u> au cours du premier mois. Ce palier de pression, présent dans les deux essais ne doit pas être ignoré car il traduit certainement une altération de la zone proche du puits qui provient du forage, qu'il s'agisse <u>d'une fissuration ou encore d'une désaturation</u> dans cette région.

VI.3. Comportement du massif au cours des cycles thermiques.

VI.3.1. Champ de température.

L'analyse thermique peut être faite indépendamment de l'analyse hydro-mécanique, car les transports de chaleur par convection sont pratiquement inexistants dans ces essais.

Les températures moyennes relevées avant chauffage sont de 16,5°C pour l'essai 1 et 15,5°C pour l'essai 2. Après une année de chauffage, la température atteint 150 à 160 °C dans la sonde, elle vaut environ 70 °C à une distance de 70 cm de l'axe de la sonde, 60°C à 90cm. Les températures maximales atteintes dans les forages sont rassemblées dans le tableau 7.

ESSAI		"CACTUS 1"	
Forage	(rayon)	1 ^{er} Chauffage	2 ^{ème} Chauffage
Sonde	(résist.)	142°C	146°C
S1PI-T03	(58cm)	60°C	70°C
S1PT-10	(88cm)	51°C	60°C
S1SMB-T06	(92cm)	50°C	59°C
S1EM-T01	(86cm)	(33°C)	(40°C)
S1SMA-T3	(150cm)	26°C	33°C

ESSAI		"CACTUS 2"
Forage	(rayon)	1 ^{er} Chauffage
Sonde	(résist.)	162°C
S2PI-T03	(68cm)	73°C
S2SMD-T16	(65cm)	73°C
S2SMC-T11	(71cm)	70°C
S2PT-15	(93cm)	62°C
S2EM-01	(91cm)	(42°C)

Tableau 7: Températures maximales atteintes dans les différents forages.



Figure 11 : Evolution de la température dans le massif ("CACTUS 1 et 2").

Comme attendu, les températures mesurées décroissent en fonction du rayon. Les quelques exceptions sont le fait d'une légère imprécision dans les mesures de positionnement des capteurs (forages S2SMD et S2PI) ou encore d'un mauvais fonctionnement des capteurs de température (S1EM et S2EM).

Les évolutions des températures dans le massif présentent trois phases distinctes :

- une phase initiale au cours de laquelle les variations de température sont quasiment nulles (environ 1 jour à une semaine suivant la distance à la sonde).
- une phase transitoire au cours de laquelle les températures augmentent rapidement autour de la sonde. (environ 20 à 50 jours)
- une phase d'évolution quasi-stationnaire, où le champ de température évolue lentement. L'augmentation de température au cours de cette phase est pratiquement identique dans tous les forages autour de la sonde.

Ces trois phases d'évolution sont caractéristiques d'une diffusion de chaleur dans un milieu infini.

Le nombre élevé de capteurs de température répartis dans le massif permet d'affirmer que le champ de température est connu avec précision. On a globalement une grande cohérence entre les diverses mesures dans le massif. Le chargement thermique auquel est soumis le massif est donc connu avec précision. Celà est indispensable pour la bonne marche de ces essais.

VI.3.2. Evolution de la pression interstitielle.

L'argile de Boom est une argile très peu perméable, qui possède une diffusivité hydraulique très faible, inférieure à la diffusivité thermique. Dans ces conditions, la mise en route du chauffage provoque des augmentations de pressions importantes.

- La pression d'eau interstitielle dans le massif présente l'évolution suivante:
- la mise en chauffe de la sonde provoque une brusque montée de pression.
- après 10 jours environ, la pression atteint un pic.
- ensuite, la pression diminue progressivement, vers un état d'équilibre.



Figure 12 : Evolution des pressions interstitielles ("CACTUS 1 et 2").

Le tableau 8 donne les valeurs extrémales des pressions interstitielles. Les valeurs sujettes à caution sont indiquées entre parenthèses.

ESSAI	"CACTUS 1"		ESSAI	"CACTUS 2"
Capteur S1Pl03 (r≈60cm)	1 ^{er} Chauffage	2 ^{ème} Chauffage	Capteur S2Pi03 (r≈70cm)	1 ^{er} Chauffage
Valeur initiale	0,80 MPa	0,70 MPa	Valeur initiale	0,65 MPa
Valeur lors du pic	2,20 MPa	2,00 MPa	Valeur lors du pic	2,10 MPa
Valeur finale	(1,50 MPa)	1,15 MPa	Valeur finale	(0,90 MPa)

Tableau 8 : Variation des pressions interstitielles au cours des phases de chauffage.

Il est intéressant de porter sur un même graphe les évolutions de la pression et de la température au même point en fonction du logarithme du temps (figure 13). On montre ainsi certaines particularités des couplages thermo-hydro-mécaniques au sein du massif :

l'augmentation de pression est légèrement antérieure à l'augmentation de température.
(On peut s'en convaincre en prolongeant par une droite les parties "linéaires" des courbes de la figure 13.)

• le pic de pression est atteint au cours de la phase thermique transitoire.

Ces observations s'interprètent de la façon suivante :

- 1/ La phase initiale de la montée de la pression est due principalement aux <u>modifications</u> <u>de l'équilibre mécanique</u> dans le massif au cours des premiers jours du chauffage. La hausse de pression est ainsi antérieure à la hausse de température, puisque les modifications de l'équilibre mécanique au niveau de la sonde se transmettent <u>instantanément</u> à l'ensemble du massif.
- 2/ ensuite, la <u>hausse simultanée</u> de la pression et de la température provient de la <u>différence de dilatation thermique</u> entre l'eau interstitielle et le squelette argileux,
- 3/ après une dizaine de jours, l'<u>écoulement hydraulique</u> devient important. et les surpressions diminuent.



Figure 13 : A gauche, évolution comparée de la pression et de la température. A droite, comparaison des variations de pression lors du chauffage et lors du refroidissement. ("CACTUS 1", 2^{ème} Chauffage)

Un autre point important à noter sur ces mesures de pression d'eau est la ressemblance entre les évolutions de la pression lors du chauffage et lors du refroidissement. Celle-ci est particulièrement nette sur le deuxième graphe de la figure 13. Mis à part la valeur au pic, <u>les</u> <u>variations de pression lors du chauffage et lors du refroidissement sont, au signe près</u>, <u>quasiment identiques</u>.

Une évolution symétrique entre chauffage et refroidissement est remarquable, elle survient lorsque les couplages thermo-hydrauliques sont linéaires. Le cycle thermique peut formellement être décomposé en la somme de deux histoires de chargement thermique :

- un flux de chaleur constant Q à partir de l'instant 0,

- un flux de chaleur constant - Q^{*}à partir de l'instant τ .

Chauffage et refroidissement sont ainsi des chargements thermiques de signe opposé, décalés dans le temps, qui induisent des variations de température et de pression identiques (au signe près). On conçoit l'intérêt d'un modèle linéaire.

VI.3.3. Evolution des autres paramètres.

1. Mesures de contraintes

On s'intéresse uniquement aux variations de contraintes obtenues dans l'essai 1, les mesures de contraintes de l'essai 2 sont en effet plus difficiles à interpréter en raison d'une anomalie survenue peu après la mise en route du chauffage.

Au cours des phases de chauffage, on note l'évolution suivante :

- une montée (compression) rapide des contraintes au cours des 20 premiers jours,
- une stabilisation progressive ensuite (lente croissance ou décroissance suivant les capteurs).

Lors du chauffage, la compression dans le sens radial est de :

- 1,0 MPa à une distance de 70cm
- 0,8 MPa à 1 m
- 0,25 MPa à 1,5 m.

Comme pour les pressions d'eau , l'évolution des contraintes est symétrique entre chauffage et refroidissement.



Figure 14 : Evolution des contraintes radiales dans le massif (essais 1 et 2).



Figure 15 : Evolution des contraintes orthoradiales dans le massif (essais 1 et 2).

ESSAI	"CACTUS 1"	
Variation au pic (r)	1 ^{er} Chauffage	2 ^{ème} Chauffage
S1SMB radial 95cm	+0,70 MPa	+0,80 MPa
S1SMA radial 150cm	+0,25 MPa	(+0,30 MPa)
S1SMB ortho 95cm	+0.40 MPa	(+0,60 MPa)
S1SMA ortho 150cm	(+0.40 MPa)	(+0,70 MPa)
	1 ^{er} Refroidiss.	2 ^{ème} Refroidiss.
S1SMB radial 95cm	-0,65 MPa	-0,75 MPa
S1SMA radial 150cm	-0,20 MPa	(-0,40 MPa)
S1SMB ortho 95cm	-0,40 MPa	(-0,75 MPa)
S1SMA ortho 150cm	-0,30 MPa	(-065 MPa)

ESSAI	"CACTUS 2"
Variation au pic (r)	1 ^{er} Chauffage
S1SMD radial 65cm	+1,10 MPa
S1SMC radial 70cm	+1,00 MPa
S1SMD ortho 65cm	(+0,75 MPa)
S1SMC ortho 70cm	+0,80 MPa

Tableau 9: Moyenne des variations de contraintes lors des cycles de chauffage et refroidissement.

2. Mesures de déplacement.

L'extensomètre mesure les déplacements entre des ancrages placés dans un forage faiblement incliné par rapport à la verticale. L'ancrage inférieur est placé au niveau du plan médian de la sonde, à une distance de 82 cm de l'axe du puits central. L'ancrage suivant est situé un mètre au-dessus.

Le déplacement entre les ancrages inférieurs (au niveau de la sonde) présente les tendances suivantes :

- Montée brusque lors du chauffage, puis un pic suivi d'une lente décroissance,

- Evolution symétrique lors du refroidissement.

Ces déplacements mesurés sont inférieurs au millimètre, les déformations verticales sont donc inférieures à 0,1%. Le massif se déforme très peu pendant les phases thermiques.



Figure 16 : A gauche, mesure de déplacement lors du chauffage et lors du refroidissement. On note la symétrie entre ces deux courbes. A droite, comparaison des variations de pression interstitielle près de la sonde (boue de colmatage) et dans le massif. L'influence de la perméabilité de la boue de colmatage est nette : la variation de pression est moins élevée que dans le massif, bien que la boue soit au contact de la sonde chauffante.

3. Mesures de pression dans la boue de colmatage

Dans les deux essais, la sonde chauffante est munie de dispositifs permettant d'apprécier ses propres déformations et la pression d'eau dans la boue de colmatage. La période d'observation est courte, car un à deux mois après la mise en route du chauffage, ces dispositifs ont connu des défaillances.

La pression dans la boue de colmatage a une évolution similaire à celle des pressions d'eau dans le massif. On relève cependant des différences importantes par rapport aux pressions dans le massif (figure 16) :

- le pic de pression est atteint plus tôt,

- l'élévation de pression est deux fois plus faible.

Ce résultat est apparemment paradoxal puisque la boue de colmatage est au contact de la sonde chauffante. Il se comprend si l'on examine la configuration des essais.

L'annulaire de boue autour de la sonde a une hauteur de quatre mètres environ, alors que dans la sonde, la longueur de la partie chauffée est de deux mètres. Le système de chauffage assure une température homogène sur 2m de longueur, la variation de température atteint 130°C dans la partie centrale de la sonde, mais seulement 40 à 50°C à ses extrémités. Si la boue était imperméable, les surpressions provoquées par ce champ de température varieraient dans le même rapport. La boue de colmatage autour de la sonde est un matériau fluide et la pression reste homogène sur toute la longueur de l'annulaire de boue. Ainsi la surpression interstitielle résulte de la variation <u>de température moyenne</u> sur toute la longueur de l'annulaire de boue. Malgré une température élevée dans la partie centrale de l'annulaire de boue, cette pression de la boue est plus faible que dans le massif.

Dans la boue, le sens des écoulements hydrauliques va de la partie centrale fortement chauffée vers les zones inférieures et supérieures plus froides.

Cette configuration particulière des essais devra être soigneusement reproduite dans une modélisation, car elle a manifestement une influence sur les résultats.

4. Mesures de teneur en eau et densité.

Des mesures de teneur en eau et de densité sont effectuées périodiquement dans le forage prévu à cet effet. Ces mesures sont faites à une profondeur de 13m à 16m, c'est-à-dire à une profondeur voisine de la sonde.

Les mesures de densité font état de peu de variations, elles se situent pour l'essentiel entre 1,95 et 2,05. La tendance généralement constatée est une légère augmentation lors du chauffage, d'environ 0,03 sur l'essai 1 et du double sur l'essai 2.

Une baisse du même ordre de grandeur se produit au cours des refroidissements de l'essai 1.

Concernant la teneur en eau, les tendances relevées sont les suivantes :

- une baisse de teneur en eau a lieu au cours des premières semaines de chauffage,
- après avoir atteint un minimum, la teneur en eau remonte légèrement,
- au cours du refroidissement, la tendance s'inverse, la teneur en eau atteint un maximum puis décroît.

Les valeurs présentées dans le tableau 10 sont des valeurs moyennes à partir de neuf points de mesure situés à la profondeur de la sonde (de 13m à 15 m).

Ces valeurs doivent être considérées avec précaution, car l'on ne dispose pas toujours de mesures aux instants clefs concernant ces essais. La fréquence des mesures est de une à deux mesures par mois, avec quelques interruptions.

ESSAI	"CACTUS 1"		
Teneur en eau moyenne (r≈120cm)	1 ^{er} Chauffage	2 ^{ème} Chauffage	
Valeur initiale	(26,8 %)	22,8 %	
Valeur minimale	22,1 %	21,2 %	
Valeur finale	22,8 %	22,1 %	
	1 ^{er} Refroidiss.	2 ^{ème} Refroidiss.	
Valeur initiale	22,8 %	22,1 %	
Valeur maximale	23,8 %	22,9 %	
Valeur finale	22,8 %	(24-25 %)	

ESSAI		"CACTUS 2"
Teneur en eau moyenne (r≈60cm)		1 ^{er} Chauffage
Valeur initiale		≈24 %
Valeur minimale		19,8 %
Valeur finale		(21-22 %)

Tableau 10 : Variations des teneurs en eau moyennes au cours des phases thermiques.

Globalement, ces résultats montrent que le premier cycle de chauffage et refroidissement provoque une baisse irréversible de la teneur en eau, alors que le deuxième cycle thermique modifie peu ce paramètre.

On peut interpréter ces résultats par un écrouissage thermique de l'argile du massif au cours de la première phase de chauffage. La contraction irréversible du matériau lors du premier chauffage se traduit par une diminution de la teneur en eau.

Il faut cependant rester extrêmement prudent dans cette interprétation :

- le chauffage ayant débuté peu après l'excavation du puits central, il est difficile de déterminer les effets propres à la "reconsolidation" du massif et de ceux résultant du premier chauffage.
- ces mesures de teneur en eau sont espacées dans le temps, l'évolution de ce paramètre n'est pas connue de façon précise.
- ces mesures sont complexes, elles nécessitent un étalonnage précis des appareils de mesure qui utilisent une source radioactive. Malgré le soin apporté à la réalisation de ces mesures, un écart de réglage de ces appareils entre deux mesures n'est pas à exclure.

VI.3.4. Synthèse

1. Effets du chauffage

Les mesures de température lors de la phase de chauffage sont cohérentes entre elles. Le champ de température a une configuration axisymétrique autour de la sonde et les températures décroissent rapidement lorsque l'on s'éloigne de la source de chaleur. Après une année de chauffage, l'élévation de température atteint 130 à 140 °C sur la sonde, alors qu'à une distance de 1,5m, elle ne dépasse pas 20 °C.

Lors de l'analyse de l'évolution des paramètres hydro-mécaniques en un point du massif, l'on distingue trois phases :

- (a) Phase initiale : le chauffage est mis en route, mais la température n'a pas encore varié en ce point du massif.
- (b) Phase transitoire : la température croît rapidement.
- (c) Phase quasi stationnaire : la température croît lentement et uniformément dans le massif proche de la sonde.



Figure 17 : Evolution comparée des contraintes et de la température dans le massif (CACTUS 1, 2^{ème} chauffage).

La réponse hydro-mécanique diffère au cours de ces trois phases:

Phase initiale :

La réponse est de faible ampleur. On note cependant :

- une baisse (décompression) de la contrainte orthoradiale
- une hausse (compression) de la contrainte radiale
- une légère augmentation de la pression d'eau.

Dans la phase initiale, l'échauffement du massif est limité à une zone très proche de la sonde (figure 18). La dilatation thermique de cette zone communique une compression radiale à l'ensemble du massif. Sous l'action de la pression mécanique exercée par la région chaude sur le reste du massif, les capteurs placés à l'extérieur de cette région donnent la réponse décrite plus haut (compression radiale et décompression orthoradiale).

La durée de la décompression orthoradiale est donc liée à la diffusion thermique, ce que confirment les mesures puisque le capteur le plus éloigné enregistre une phase de traction de plus longue durée.





Phase transitoire :

Lorsque la température à l'emplacement du capteur s'élève, on note :

- une forte augmentation des pressions d'eau
- une forte augmentation des compressions radiales et orthoradiales.

On note également une diminution de la teneur en eau.

Sous l'effet de la température, la zone chaude tend à se dilater. Mais cette dilatation thermique ne peut se faire librement au sein du massif argileux, car il y aurait une incompatibilité géométrique du champ de déformation. Il se développe ainsi des compressions dans les sens radial et orthoradial au sein de cette zone chaude.

D'autre part, le coefficient de dilatation thermique de l'eau est bien plus important que celui des minéraux constituants du squelette argileux. Lorsque la température augmente en l'absence d'écoulement hydraulique, l'eau interstitielle incluse dans les pores de l'argile est alors en surpression.

Dans la phase de transitoire thermique, l'augmentation de la pression d'eau interstitielle est rapide. Un gradient de pression se développe entre les zones chauffées et les zones froides. Un écoulement hydraulique s'établit entre les zones de hautes pressions (régions chaudes) vers les basses pressions (régions froides, loin de la sonde). Cet écoulement conduit in fine à une dissipation des surpressions interstitielles.

Phase quasi-stationnaire

A présent, le régime thermique est établi dans la zone proche de la sonde et la propagation de la chaleur se poursuit à plus grande distance. L'augmentation de température est très lente.

Cette phase se caractérise par une variation de température uniforme sur l'ensemble des capteurs.

Au cours de cette phase :

- le niveau des contraintes varie peu
- les pressions d'eau diminuent et se stabilisent après environ 200 jours.

La diminution des pressions interstitielles se poursuit jusqu'à un état d'équilibre hydraulique qui théoriquement est le même que l'état initial, puisque la pression est constante plus loin dans le massif.

Les compressions apparues lors de la phase de transitoire thermique se maintiennent. Le niveau des contraintes se stabilise à une valeur plus élevée que celle relevée avant chauffage. Cette augmentation de compression atteint environ 1MPa à 1m de la source de chaleur.

Ainsi, la principale caractéristique de cette phase est le maintien des compressions apparues en première partie du chauffage, tandis que la plupart des paramètres reviennent vers l'état initial. Cet état de compression persiste après dissipation des surpressions interstitielles.

2. Bilan d'un cycle de chauffage et refroidissement

Au cours du refroidissement, tous les paramètres thermo-hydro-mécaniques évoluent en sens inverse de celui observé lors du chauffage. Les vitesses d'évolution des paramètres et les amplitudes sont comparables entre chauffage et refroidissement.

Ces évolutions symétriques sont principalement le fait des variations de pression d'eau et des variations de contraintes. Elles laissent à penser que les <u>couplages thermo-hydro-</u><u>mécaniques mis en jeu par cette expérience sont linéaires et réversibles</u>.

L'état du massif après refroidissement complet présente cependant quelques différences par rapport à l'état initial. On relève notamment :

- une modification de la teneur en eau au cours du premier cycle de chauffage,
- un faible accroissement de la densité,
- des déplacements irréversibles dans le massif, qui sont cependant très faibles.

Cette évolution particulière de la teneur en eau est très intéressante, elle est en accord avec une <u>manifestation in situ d'un écrouissage thermique au sein du massif argileux</u>. Ce comportement particulier de l'argile de Boom a été mis en évidence par des essais de laboratoire, mais jamais encore lors d'essais in situ.

Rappelons cependant les réserves exprimées plus haut quant à cette interprétation, car elle se fonde uniquement sur les mesures de teneur en eau alors que toutes les autres mesures montrent au contraire de nombreuses analogies entre chauffage et refroidissement.

Lors du cycle thermique court de forte puissance accompli récemment, on n'a pas détecté de signes particuliers révélant un écrouissage thermique. Ces résultats d'essais vont au contraire dans le sens d'une réponse proportionnelle au chargement thermique.

VI.4. Conclusion

Le jugement que l'on porte sur un essai in situ se fonde généralement sur l'allure des résultats et sur la cohérence globale des mesures obtenues. De ce point de vue, les résultats des essais "CACTUS" sont remarquables, les mesures effectuées sur ces essais in situ permettent une meilleure prédiction de la réponse hydro-mécanique d'un massif d'argile saturée sous l'effet du chargement thermique.

Les couplages thermo-hydro-mécaniques mis en évidence au cours de ces expériences sont de natures variées :

(1) <u>A court terme</u>, les élévations rapides de température dans le massif se traduisent localement par une surpression interstitielle. Ces surpressions se dissipent peu à peu du fait de la perméabilité du milieu. Les variations de contraintes dans ces essais résultent à la fois des dilatations thermiques de la région chaude au sein du massif et de l'évolution des surpressions interstitielles.

(2) <u>A long terme</u>, lorsque les régimes thermique et hydraulique sont établis, l'état hydraulique a légèrement varié alors que les compressions survenues au début du chauffage subsistent au sein du massif.

L'originalité de ces essais chauffés résident dans l'étendue des points de mesure et la durée des périodes de mesures. L'ensemble des paramètres thermiques, hydrauliques et mécaniques ont fait l'objet de mesures pendant trois années sur deux essais de géométrie semblable, et avec des périodes de chauffage d'une année, le comportement thermo-hydro-mécanique du massif argileux est caractérisé de façon approfondie.

De plus, la maîtrise de l'essai "CACTUS" ne se limite pas à l'obtention des mesures précises, un effort important a porté sur le contrôle des paramètres "d'entrée" définissant l'expérience, qu'il s'agisse des aspects géométriques (géométrie de l'essai, position des capteurs de mesures), du contrôle des chargements (réalisation des forages, puissance d'entrée sur la résistance, vérification de la température de la sonde) ou de la définition des matériaux employés pour réaliser l'essai. En s'appuyant sur deux essais distincts dont la mise en oeuvre est semblable, l'on met à l'épreuve la fiabilité des mesures qui ont été faites.

Dans l'analyse d'un essai de ce type, il est généralement difficile de faire la part des choses entre ce qui est dû aux caractéristiques du milieu étudié, et de ce qui résulte des

procédures de réalisation de l'essai, ou des aléas des mesures. Ces interrogations sont communes à toutes les réalisations in situ.

Il n'en reste pas moins que pour le projet "CACTUS", les concordances relevées entre les deux expériences sont suffisamment nombreuses pour former un atout indéniable pour réussir une modélisation pertinente des essais.