

Séance technique du 15 mars 2007

États de contraintes dans les massifs : retours d'expérience

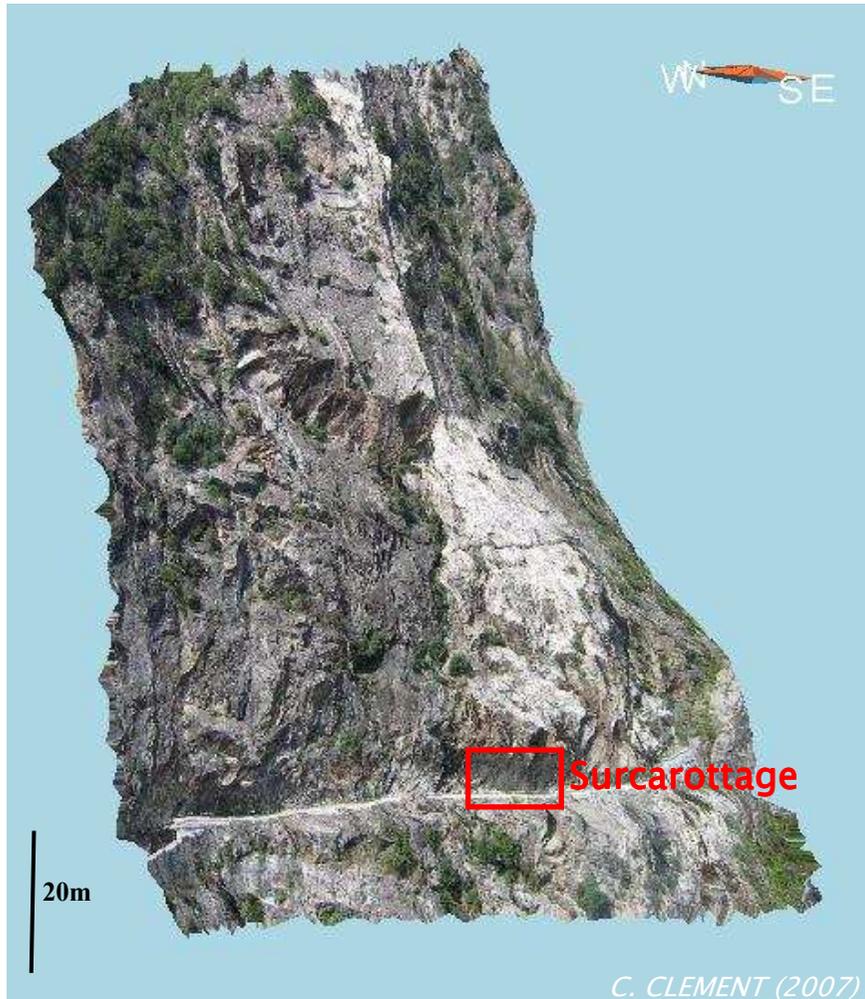
VAL-STRESS3D : Essai en grand de caractérisation du champ de contraintes naturelles d'un versant rocheux instable

Site Laboratoire Pilote des Rochers de Valabres (06)

Clémence DÜNNER, Cécile CLEMENT, Pascal BIGARRE, Véronique MERRIEN-SOUKATCHOFF

VAL-STRESS3D

Essai in situ de mesures de contraintes naturelles – Site Laboratoire Pilote des Rochers de Valabres



- Foliation très marquée : N110–140°E
- Fort pendage NE entre : 60–80°NE
- Altitude comprise entre : 700 et 900 m
- Activité récente du versant :
 - 13 mai 2000
 - 31 octobre 2004

VAL-STRESS3D

Essai in situ de mesures de contraintes naturelles

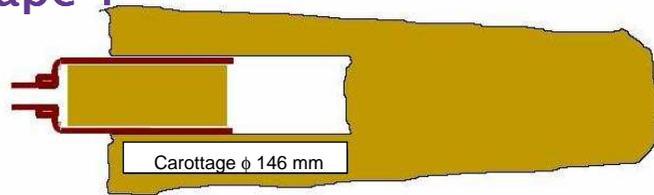
– Objectifs scientifiques

- La technique de mesure de contraintes par surcarottage de cellule CSIRO est-elle applicable, de manière opérationnelle, pour la caractérisation du champ de contraintes d'un versant rocheux instable ?
- Peut-on appréhender, à partir de quelques points de mesure réalisés le long d'un forage, la variabilité et la complexité du champ de contraintes naturelles régnant au sein du versant ?
- Ces mesures permettent-elles d'améliorer la compréhension des mécanismes d'instabilité des versants ? Et par conséquent, la connaissance locale de la variabilité du champ de contraintes ?

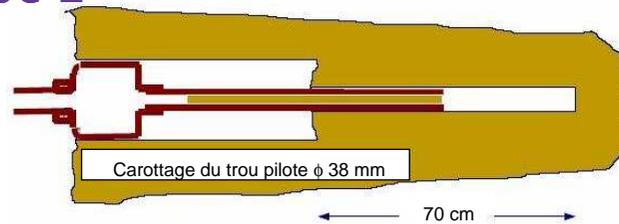
VAL-STRESS3D

Essai in situ de mesures de contraintes naturelles – Principe de l'essai de surcarottage de cellule CSIRO

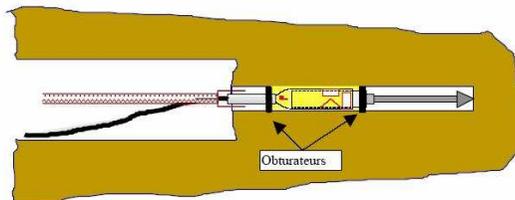
Étape 1



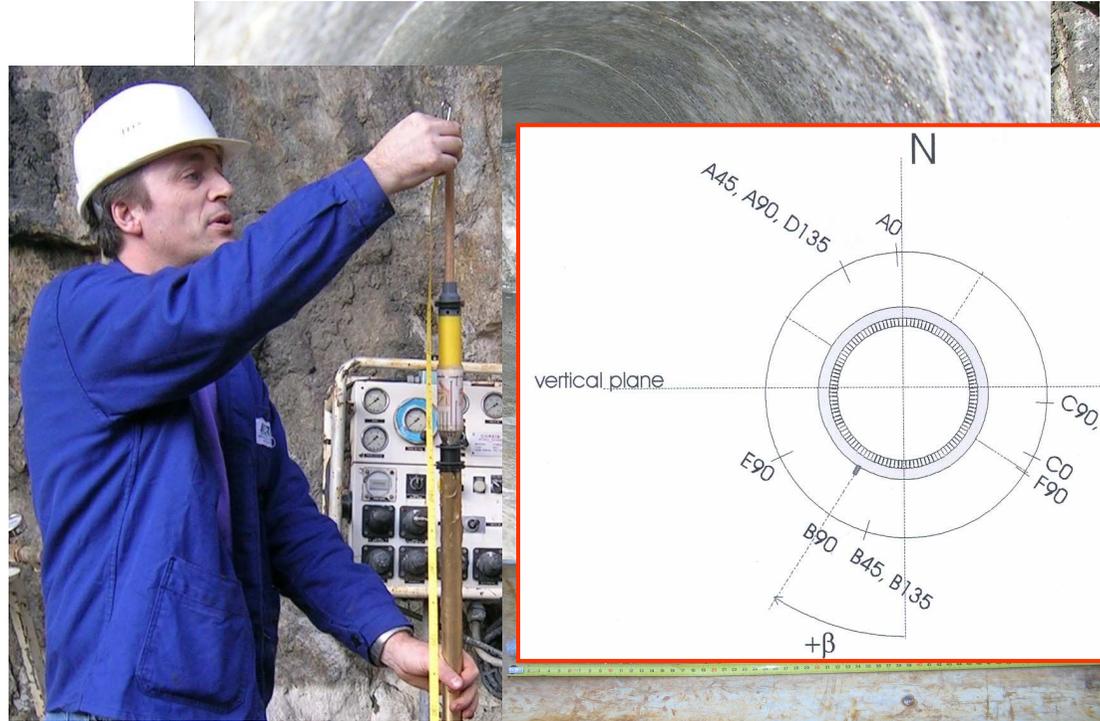
Étape 2



Étape 3



Étape 3

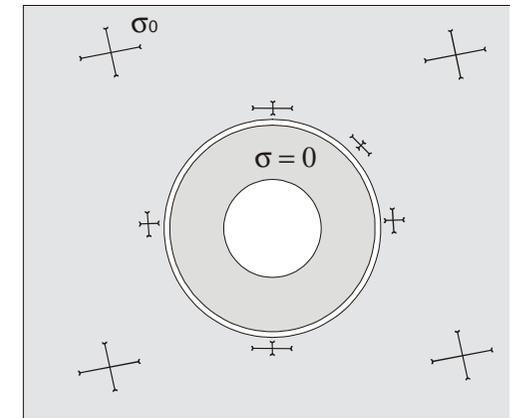
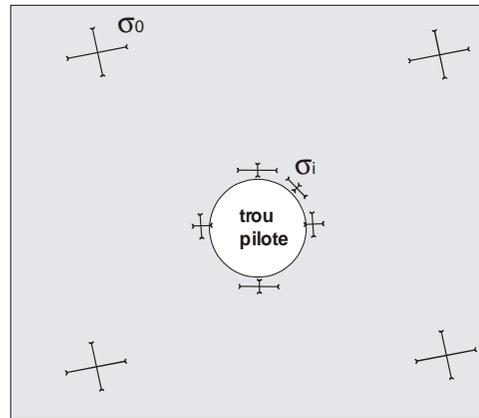
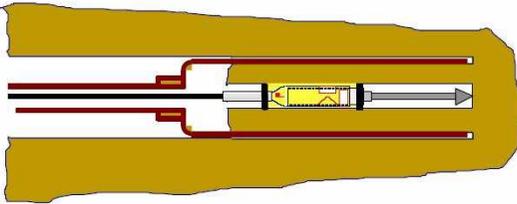


VAL-STRESS3D

Essai in situ de mesures de contraintes naturelles

– Principe de l'essai de surcarottage de cellule CSIRO

Étape 4



Hypothèse :

Comportement élastique de la carotte lors de l'essai de surcarottage

>> L'hypothèse est confirmée lors de l'essai biaxial



VAL-STRESS3D

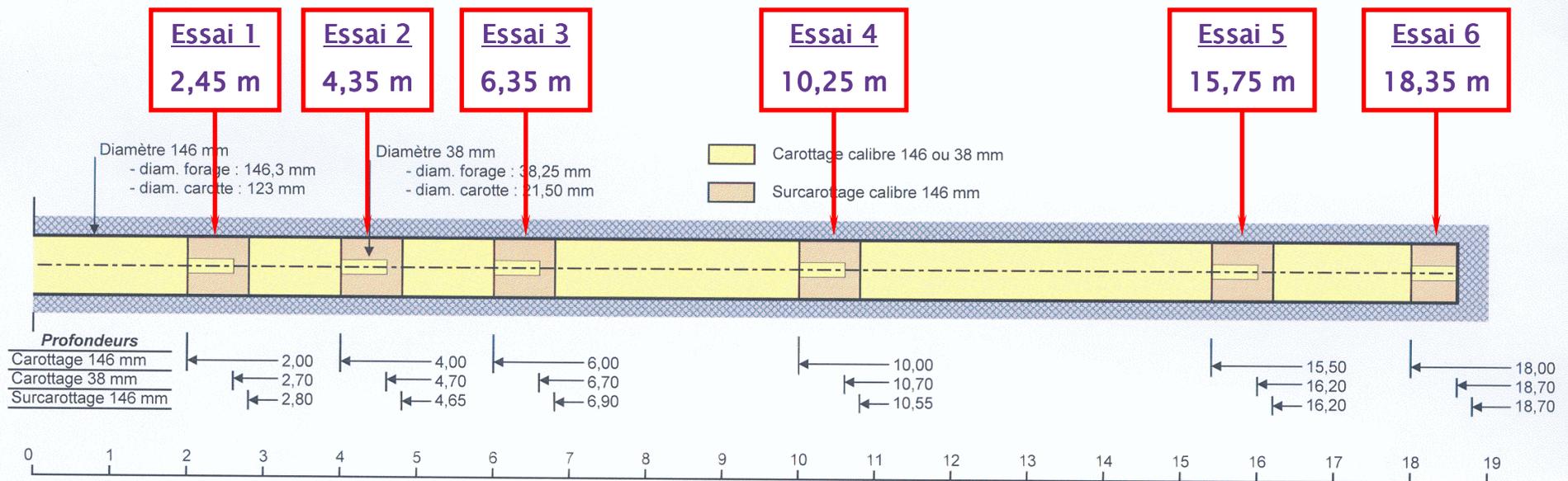
Essai in situ de mesures de contraintes naturelles – 6 essais successifs de surcarottage



SURCAROTTAGES SUR LE SITE DU VERSANT ROCHEUX DE VALABRES - ROURE (06)



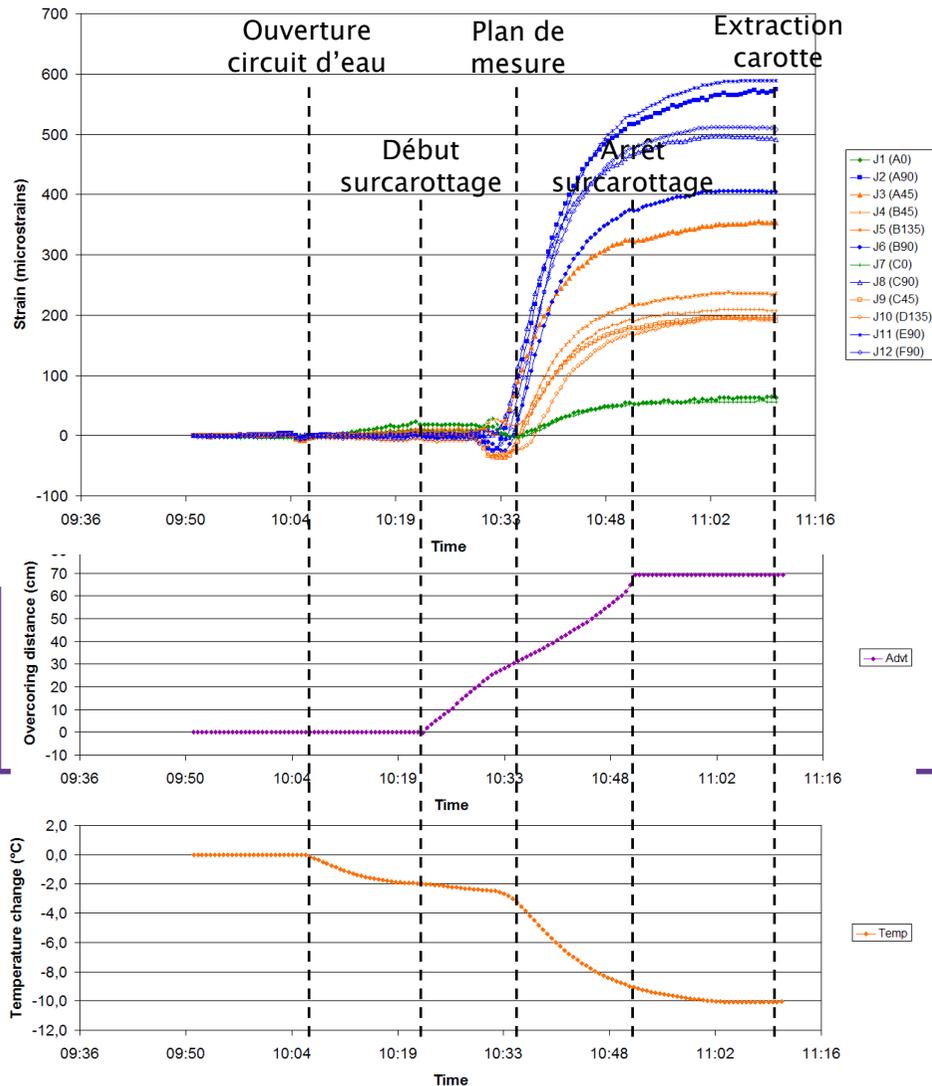
SCHEMA DE FORAGE



Sondage A - Sub-horizontal 4° montant

VAL-STRESS3D

Essai in situ de mesures de contraintes naturelles – Données brutes de déformations



Essai de surcarottage n°5
réalisé le 24 novembre 2005, à la cote 15,75 m

- Discrimination claire des jauges en fonction de leur orientation
- Diminution importante de la température, de 13°C à 3°C
- Stabilisation complète des courbes à l'arrêt de l'acquisition

CENARIS

INERIS

VAL-STRESS3D

Essai in situ de mesures de contraintes naturelles – Détermination des paramètres élastiques

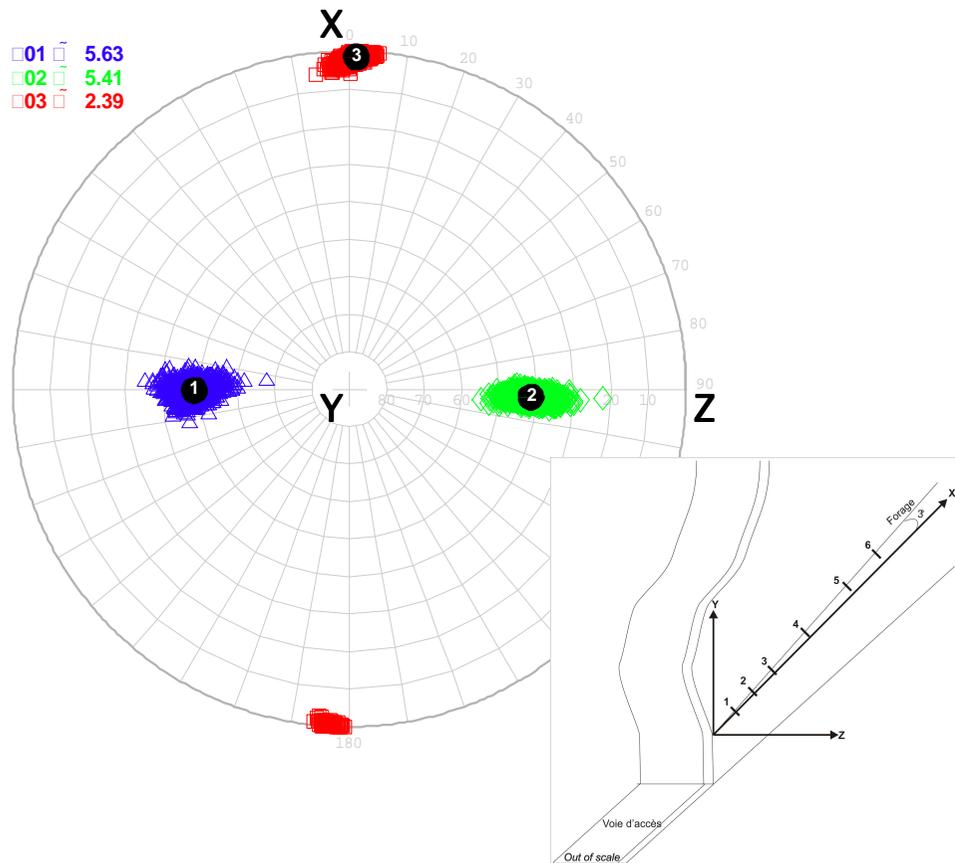


- Essais biaxiaux
Détermination des paramètres élastiques de la roche (E et ν)
- Essais géomécaniques uniaxiaux
Détermination des paramètres élastiques de la roche (E_1 , E_2 , ν_{12} , ν_{23} , G_{12} , G_{23} , etc.)
Caractérisation fine de l'anisotropie
- Examen des carottes de forage
En termes d'homogénéité apparente et de foliation

Essais	Isotropie transverse	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} (GPa)	G_{23} (GPa)
1 à 4 6	Marquée	25,2	35,9	0,14	0,15	12,4	15,7
5	-	28,6	28,6	0,06	0,06	13,5	13,5

VAL-STRESS3D

Essai in situ de mesures de contraintes naturelles – Inversion des mesures de déformation

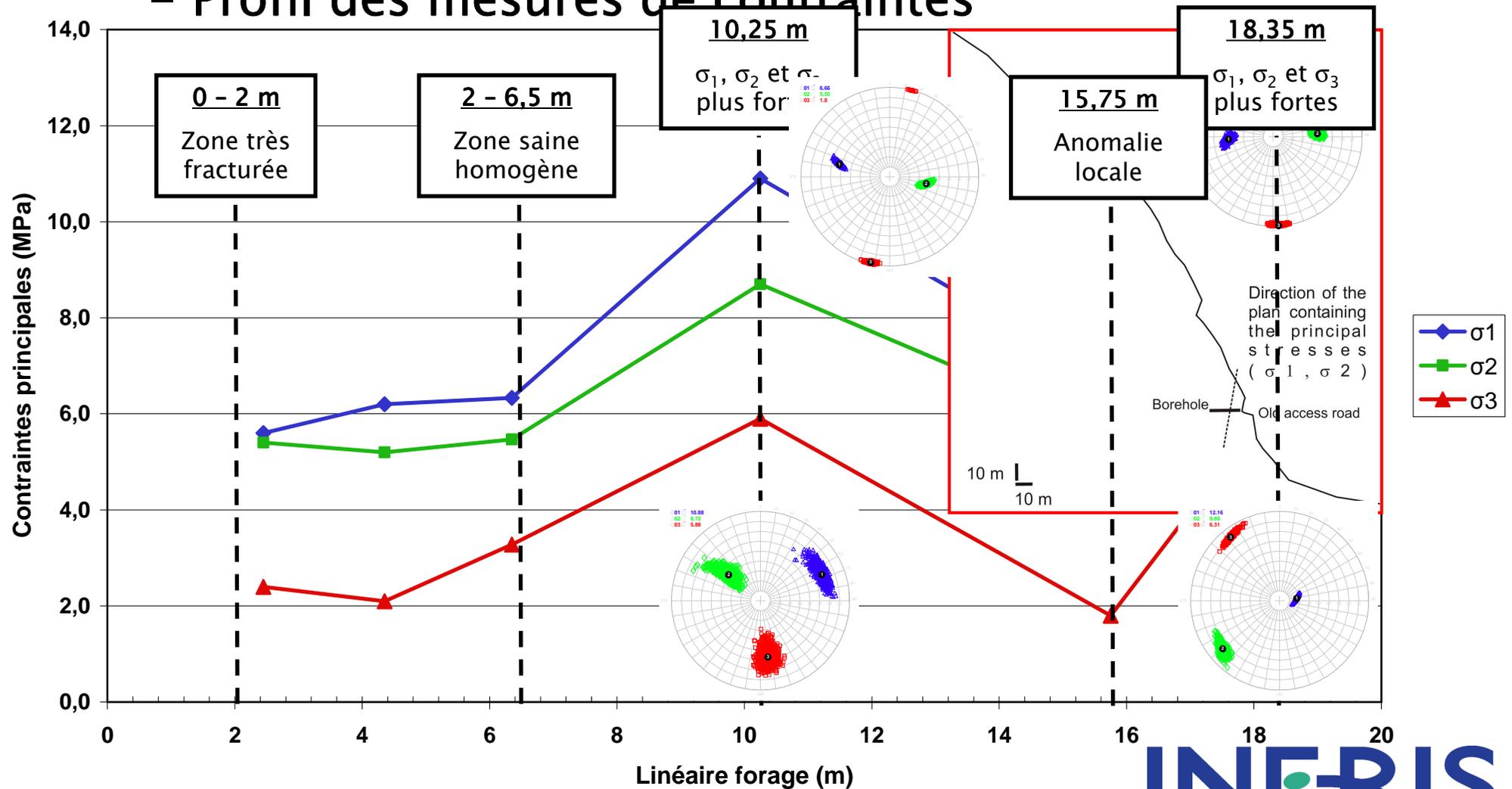


Essai de surcarottage n°1
réalisé le 17 novembre 2005, à la cote 2,45 m

- Hypothèse de comportement élastique de la carotte lors du surcarottage
Hypothèse confirmée lors de l'essai biaxial
- Problème surdéterminé
12 déformations → 6 contraintes
- Logiciel SYTGEOStress®
Résolution par moindres carrés
- Résultat obtenu après inversion
Estimation des 6 composantes du tenseur de contraintes

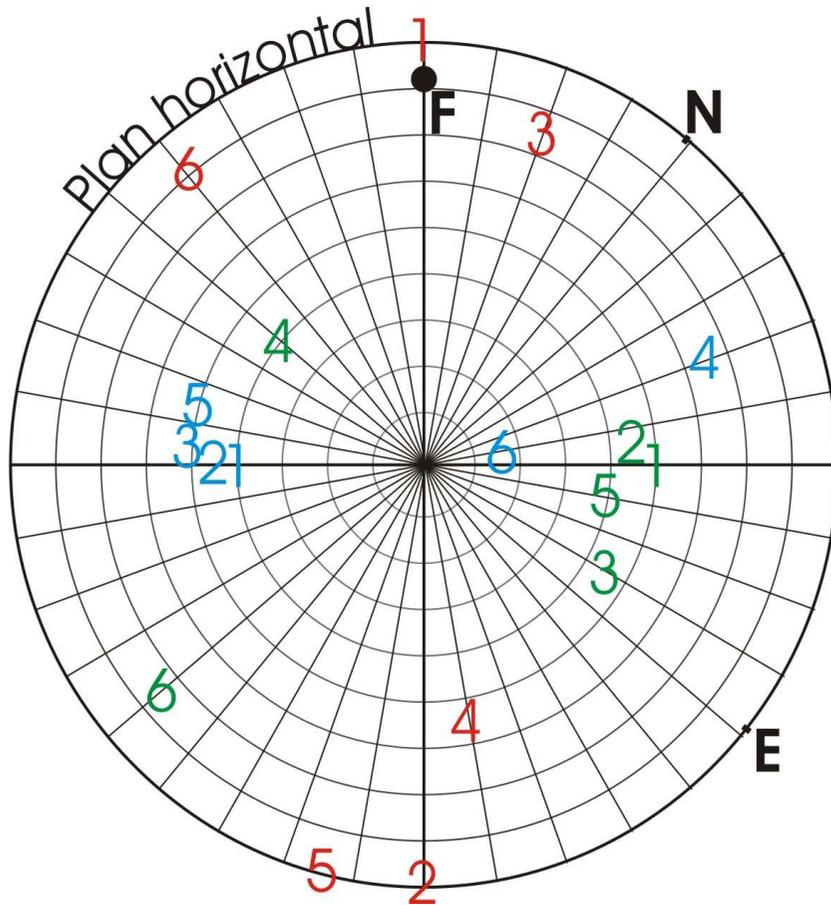
VAL-STRESS3D

Essai in situ de mesures de contraintes naturelles – Profil des mesures de contraintes



VAL-STRESS3D

Essai in situ de mesures de contraintes naturelles – Résultats des mesures de contraintes



➤ Excepté pour les zones de mesure situées à 10 et 18 m, les contraintes principales majeure et intermédiaire (σ_1 , σ_2) sont situées dans un plan sub-vertical.

>> Cette orientation, qui ne correspond pas en affleurement à celle de la géométrie de la pente moyenne du versant, est vraisemblablement influencée par la topographie locale, les discontinuités et les hétérogénéités

➤ Une anomalie localisée à 15 m avec des contraintes dans la continuité des modules estimés à 6 m.

>> Des données complémentaires relatives à la fracturation présente et à la morphologie du versant sont nécessaires pour essayer de comprendre l'origine de cette anomalie locale



VAL-STRESS3D

Essai in situ de mesures de contraintes naturelles – Conclusions et perspectives

- Les mesures de contraintes par surcarottage ont très bien fonctionné dans le faciès : mesures brutes de grande qualité et cohérence globale avec les ordres de grandeur attendus
- Le champ de contraintes local dans un tel volume ausculté est affecté d'une **variabilité très significative** (discontinuités, morphologie locale, anisotropie, etc.)
- Les contraintes élevées en zone de mesure 6 soulèvent l'intérêt d'une reprise des mesures en profil sur le même forage, dans la zone de 20 à 30 m
- Diagraphie ultrasonique du forage est envisagée pour apporter des éléments de réponse

VAL-STRESS3D

Intégration d'un Plan d'Expérience dans l'inversion et l'interprétation des mesures de contraintes

Contexte

- Malgré des mesures brutes de déformations de très bonne qualité, l'opération d'inversion s'est avérée délicate
- **Milieu anisotrope**, i.e. susceptible de produire une erreur importante dans l'estimation des contraintes (30% selon Amadéi, 96 et Hakala, 06)
- **Seuls 2 essais biaxiaux ont pu être réalisés**, à savoir l'essai 1 (2,45 m en isotrope transverse) et l'essai 5 (10,75 m en isotrope)
- **Des essais uniaxiaux complémentaires** menés à des points environnants
- Carottes extraites fortement hétérogènes et des plans de foliation avec une orientation irrégulière

→ La réalisation d'un Plan d'Expérience s'est donc avérée nécessaire

Objectif

Quantifier l'impact des incertitudes d'entrée (modules mécaniques et paramètres géométriques) sur le résultat de l'inversion, notamment en termes d'amplitude et d'orientation des contraintes.

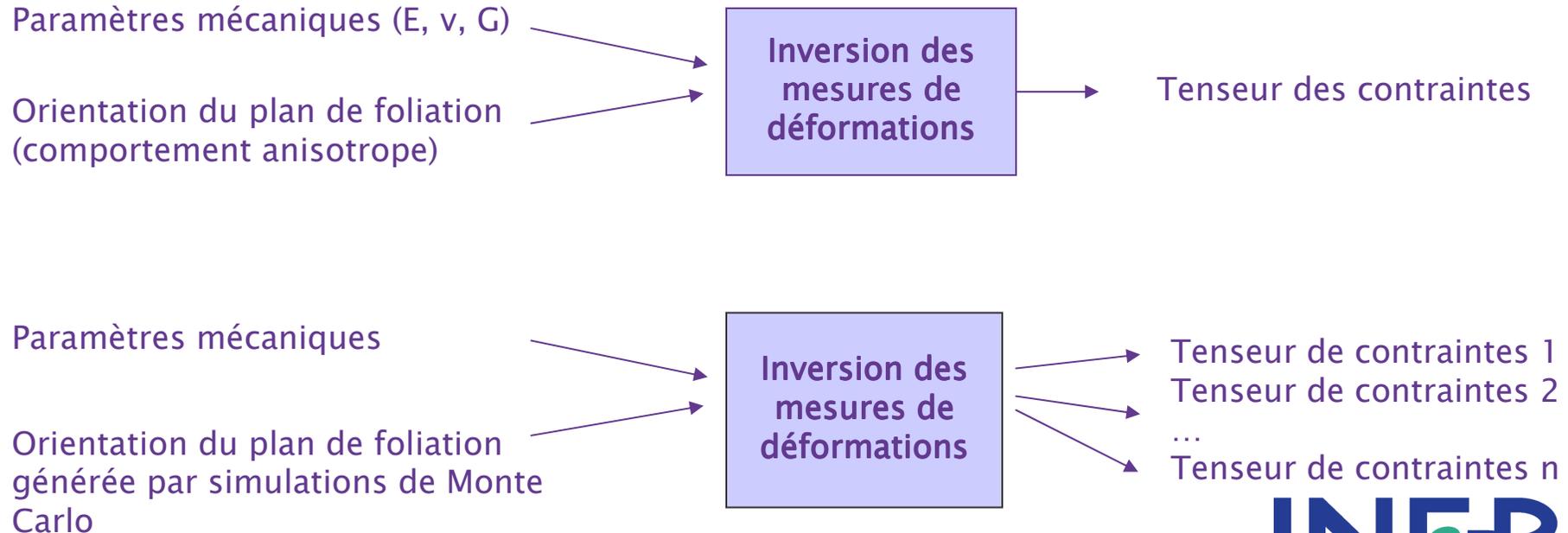
- Quels sont les paramètres d'entrée les plus influents ?
- Quelles sont les variations induites sur le tenseur de contraintes (exemple de l'essai 1) ? Et sur le profil de contraintes ?
- Quelles sont les conséquences sur les modélisations ?

VAL-STRESS3D

Plan d'Expérience

– Démarche

- Réalisation de séries d'inversion, où les paramètres mécaniques et géométriques (azimut et pendage du plan de foliation) sont variables, c.a.d générés par des simulations de type de Monte Carlo
- Les résultats des simulations sont présentés sous forme de régression multiple et de surface de réponse
- Le profil de contraintes est présenté avec ses intervalles de variations



VAL-STRESS3D

Plan d'Expérience

– Choix des paramètres mécaniques variables

Cas isotrope transverse (Essais 1, 2, 3, 4 et 6) – 5 modules sont indépendants ($E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, G_{12}$)

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_1}{E_1} & -\frac{\nu_1}{E_1} & \cdot & \cdot & \cdot \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_2}{E_2} & \cdot & \cdot & \cdot \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} & \frac{1}{E_2} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 2\frac{1+\nu_2}{E_2} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{1}{G_1} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{1}{G_1} \end{bmatrix}$$

mais uniquement 3 modules (R, ν_1, ν_2) seront pris en compte et seront variables, tels que :

- en considérant une formule empirique pour définir G_{12} (Leknitski, 1981, Amadéi, 1996)

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_1} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}$$

- en considérant le rapport d'anisotropie $R = E_1/E_2$, et le module de Young moyen obtenu par essai biaxial (27,5 GPa pour l'essai 1)

Cas isotrope (Essai 5) – 2 modules sont indépendants (E, ν)

VAL-STRESS3D

Plan d'Expérience

– Choix des paramètres mécaniques variables

Paramètres mécaniques variables	Min	Max	Moyenne
R	1,16	1,9	1,4
ν_1	0,06	0,19	0,13
ν_2	0,12	0,17	0,15

Isotrope transverse :
Essais 1, 2, 3, 4 et 6

Paramètres mécaniques variables	Min	Max	Moyenne
E	23,1	42,1	29,7
ν	0,05	0,06	0,05

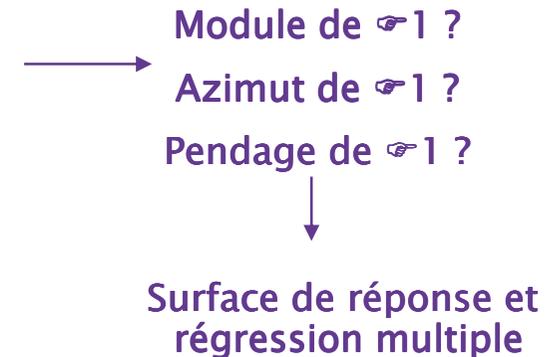
Isotrope : Essai 5

VAL-STRESS3D

Plan d'Expérience

- Quels sont les paramètres d'entrée les plus influents ?
- ### Exemple de l'Essai 1

	Paramètres géométriques (b et g, azimuth et pendage de la foliation)	Paramètres mécaniques (R, v_{12} et v_{23})
Essai 1	Variables $0 < b < 360$ $25 < g < 60$	Variables $1,16 < R < 1,9$ $0,06 < v_{12} < 0,19$ $0,12 < v_{23} < 0,17$



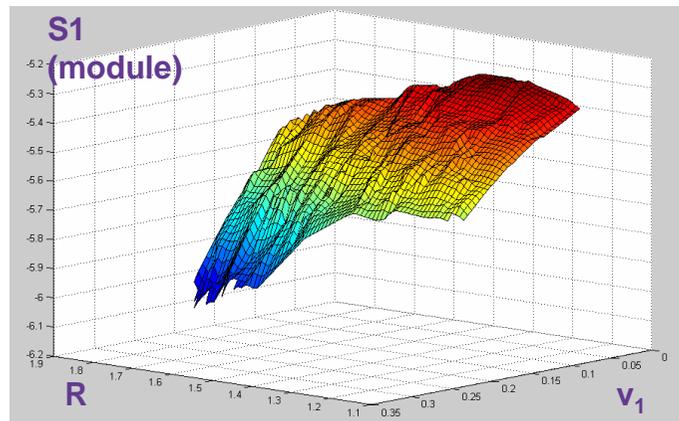
VAL-STRESS3D

Plan d'Expérience

– Quels sont les paramètres d'entrée les plus influents ?

Résultat des régressions multiples (variables centrées réduites)

Paramètre	Module de σ_1 : Estimation du coefficient	Azimut de σ_1 : Estimation du coefficient	Pendage de σ_1 : Estimation du coefficient
Constante			
R			
v_1	$5,2 < \text{Module } \sigma_1 < 7,6 \text{ MPa}$	$30^\circ < \text{Azimut } \sigma_1 < 60^\circ \text{N}$	$20^\circ < \text{Pendage } \sigma_1 < 60^\circ$
v_2			
g (pendage)			
b (azimut)			

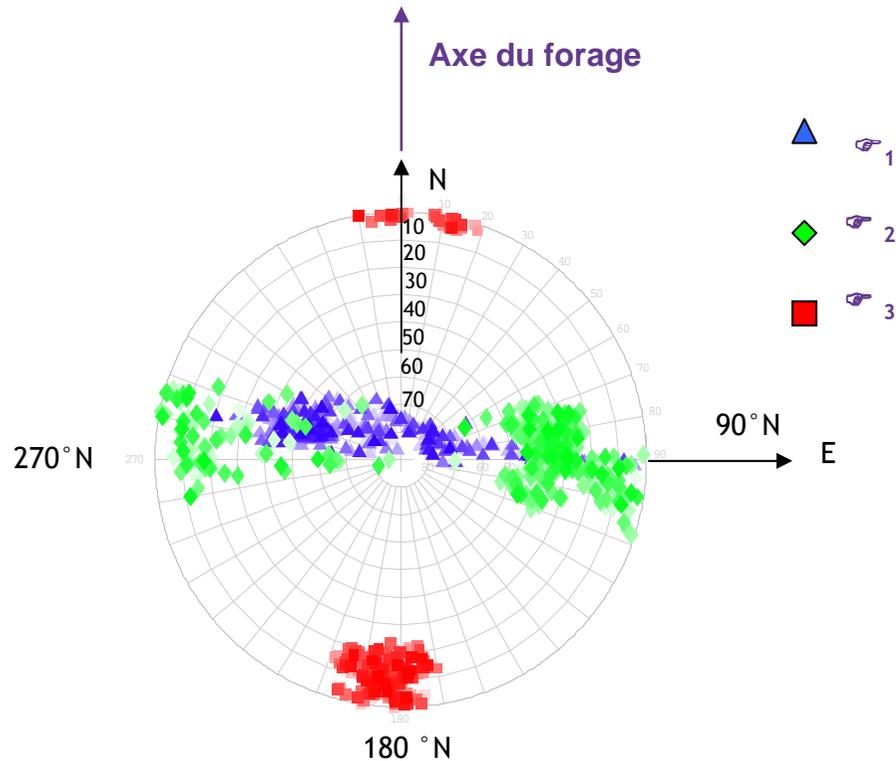


Exemple de surface de réponse du module de σ_1 en fonction des paramètres R et v_1

VAL-STRESS3D

Plan d'Expérience

– Quels sont les variations induites sur le tenseur de contraintes ?



$$5,2 < \sigma_1 < 7,6 \text{ MPa}$$

$$4,09 < \sigma_2 < 6,2$$

$$1,39 < \sigma_3 < 4,54$$

Observations

➤ une faible influence sur l'azimut des contraintes principales σ_1 et σ_2

➤ une forte influence sur le pendage

➤ des modules σ_1 et σ_2 proches

Conséquences

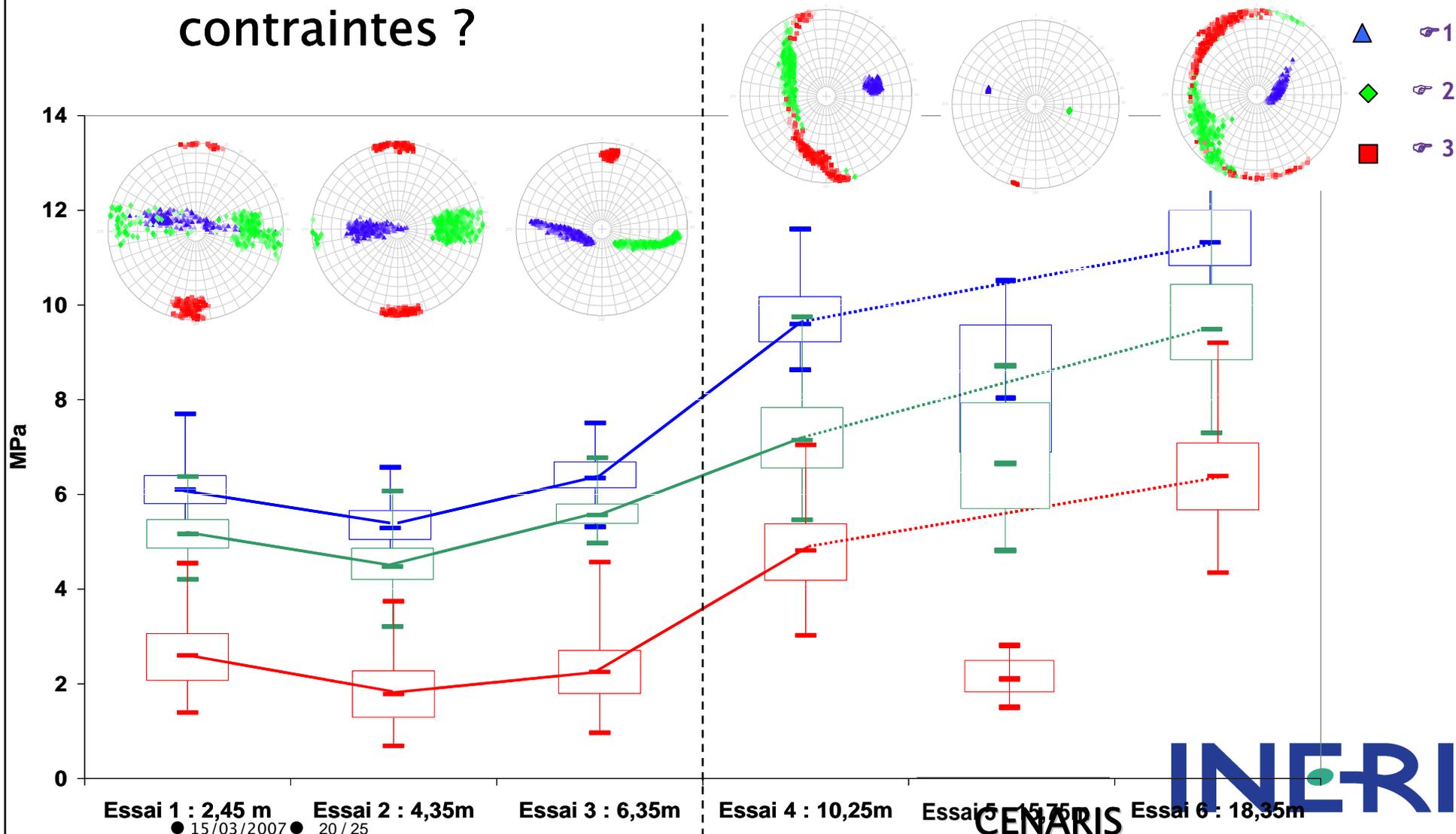
➤ (σ_1, σ_2) sont contenues dans un plan vertical isotrope, orienté N90° - N270°, dans lequel les contraintes sont uniformes

➤ ce plan pourrait correspondre à la surface topographique locale, à l'emplacement du forage

VAL-STRESS3D

Plan d'Expérience

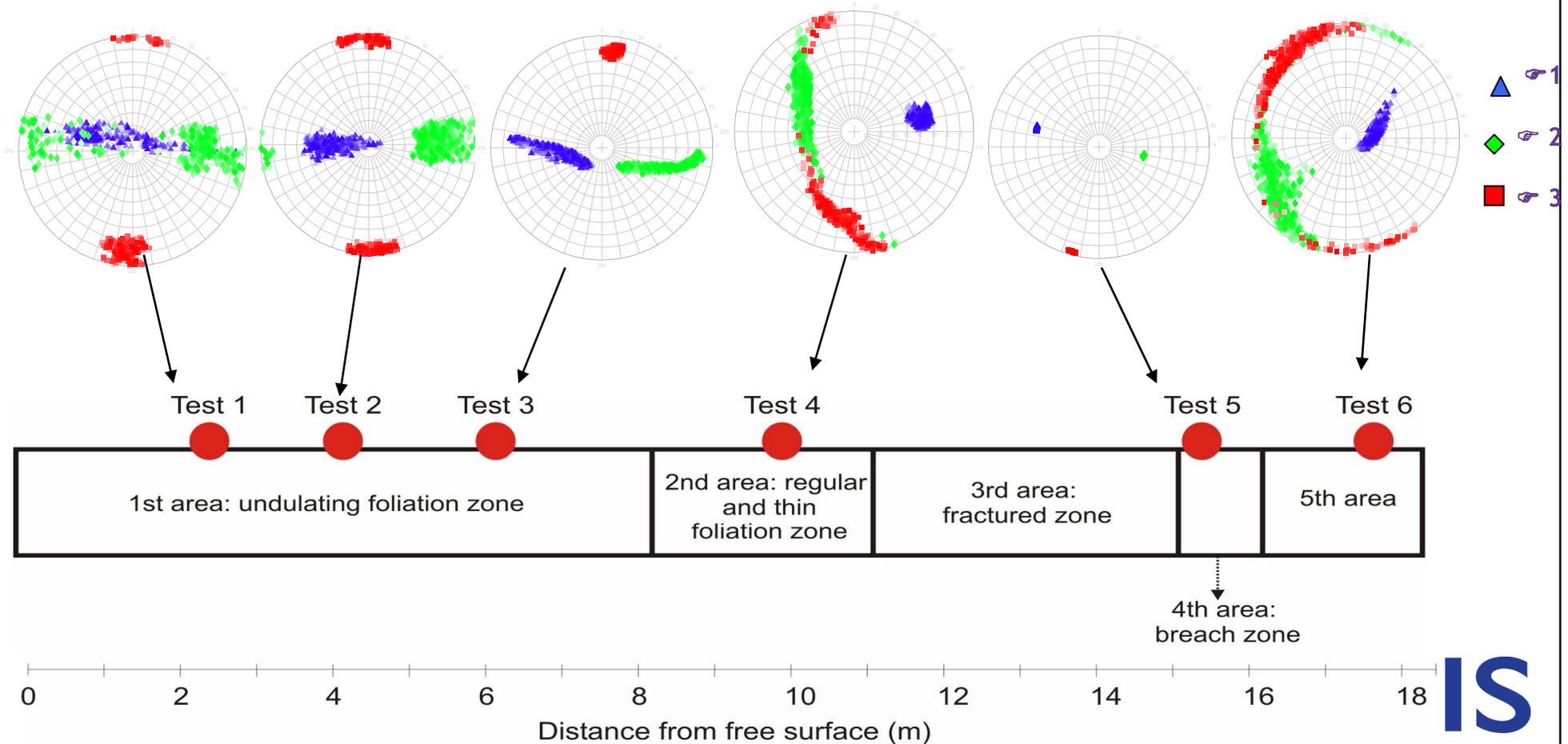
– Quels sont les variations induites sur le profil de contraintes ?



VAL-STRESS3D

Plan d'Expérience

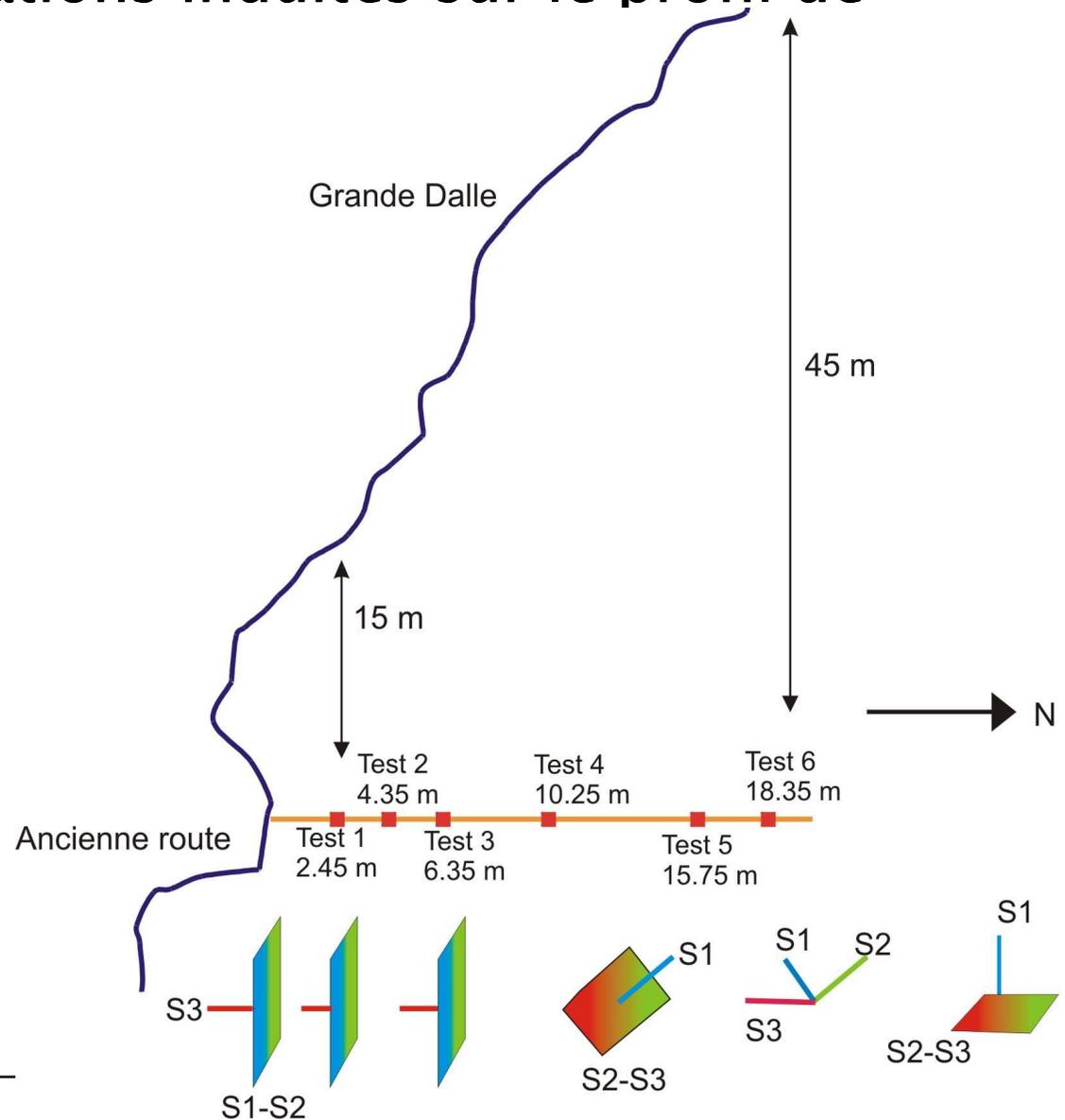
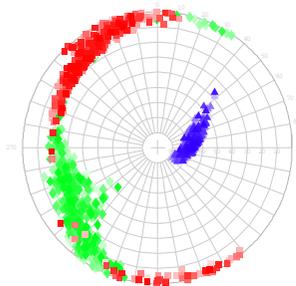
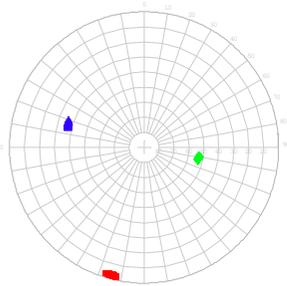
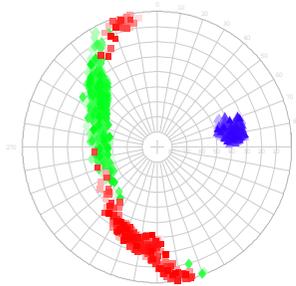
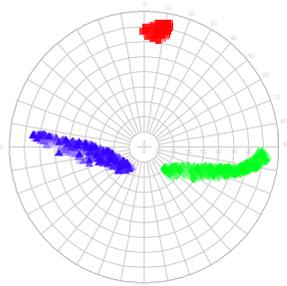
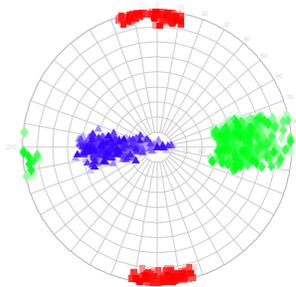
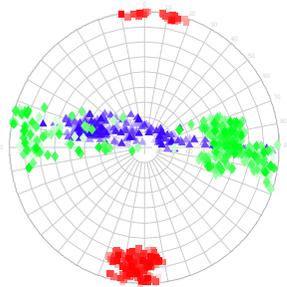
– Quels sont les variations induites sur le profil de contraintes ?



VAL-STRESS3D

Plan d'Expérience

– Quels sont les variations induites sur le profil de contraintes ?



VAL-STRESS3D

Plan d'Expérience

– Synthèse des résultats

Bilan

- Malgré les variations induites, la tendance du profil reste perceptible
- Les séries d'inversion ont permis de mettre en évidence l'existence de plans isotropes

Observations

- Une zone à proximité de la surface (essais 1 à 3), fortement influencée par la topographie locale, au niveau du forage. Les trois essais sont homogènes en termes de modules et d'orientations des contraintes
- Des singularités au niveau des essais 4 et 5, difficiles à appréhender : *rôle des d'hétérogénéités ? fracturation ? zone brèchique ?*
- Essai 6 : la contrainte majeure est verticale : *limite d'influence de la topographie ?*

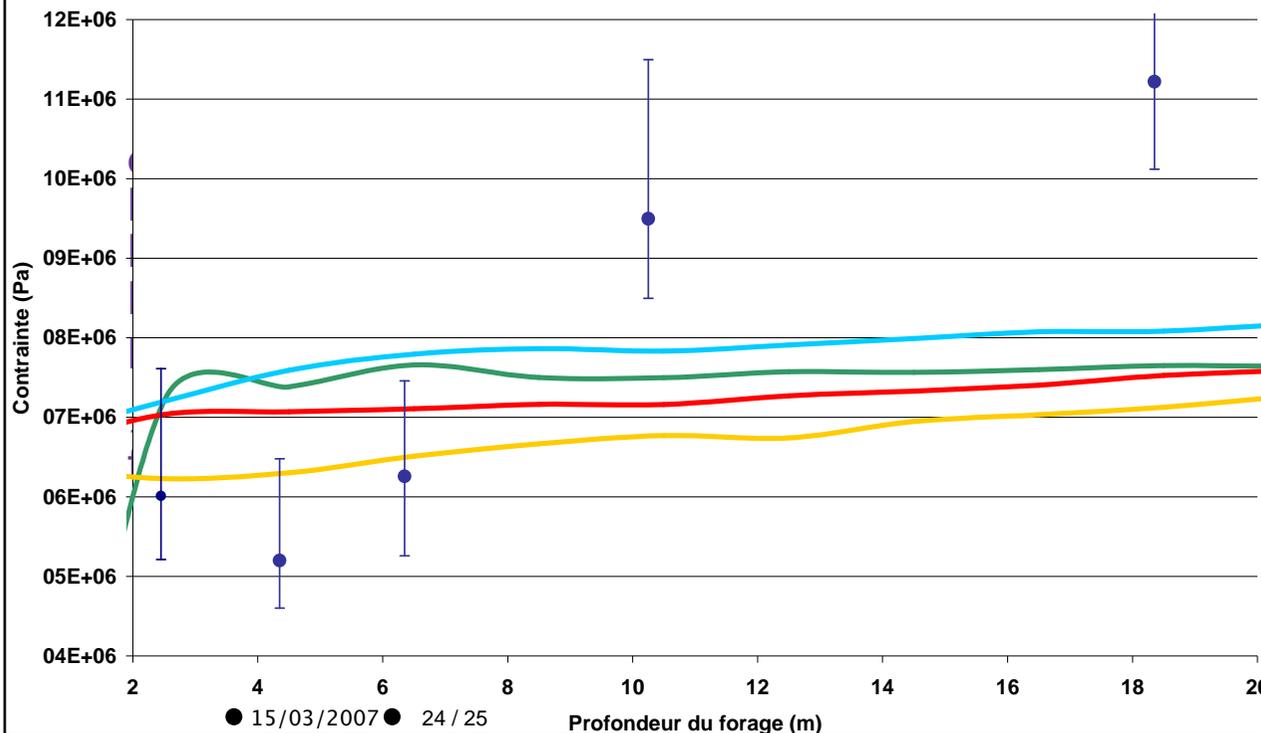
VAL-STRESS3D

Plan d'Expérience

- Quelles sont les conséquences sur les modélisations ?

>> Le Plan d'expérience permet de fournir une gamme de variations du tenseur et donc une résolution pour les modélisations (exemple : $5,2 < \sigma_1 < 7,6$ MPa avec une moyenne de 6 MPa, soit 15% de variations)

>> Les résultats d'inversion des mesures de contraintes peuvent être corrélés avec les modélisations



2. Les résultats des mesures servent de données de calage afin de :

- vérifier que les hypothèses sont justes (taille du modèle, conditions aux limites, etc.)
- réaliser une étude paramétrique (test des différentes lois de comportement, du mode de chargement, de la coupe 2D)

Limit surface below topographic roughness

Mean topographic surface

s2
L2
Str22

CENARIS

INERIS

VAL-STRESS3D

Essai in situ de mesures de contraintes naturelles

– Conclusion

- Les mesures de contraintes ont mis en évidence des modules élevés, ce qui est surprenant pour des mesures à faible profondeur.
- Malgré les intervalles de variation introduits par le plan d'expérience, le profil de contraintes montre une **dispersion importante en termes d'amplitude et d'orientation**, que les modélisations 2D en éléments finis n'expliquent pas.
 - >> *nécessité de réaliser des modèles 3D.*
- L'influence de la topographie locale est bien appréhendée, l'impact des discontinuités et des hétérogénéités l'est moins.