



HAL
open science

Apports quantitatifs, spatialisés, temporels et multi-échelles pour l'étude hydromécanique expérimentale d'une roche argileuse fracturée

Stephen Hedan

► **To cite this version:**

Stephen Hedan. Apports quantitatifs, spatialisés, temporels et multi-échelles pour l'étude hydromécanique expérimentale d'une roche argileuse fracturée. Sciences de la Terre. Université de Poitiers, 2021. tel-03346747

HAL Id: tel-03346747

<https://theses.hal.science/tel-03346747>

Submitted on 16 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Institut de Chimie des Milieux et
Matériaux de Poitiers (IC2MP)
UMR 7285 CNRS/Université de Poitiers

1 rue Marcel Doré, ENSI Poitiers Bât B1
86073 Poitiers Cedex9



Mémoire présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches

Par

Stephen HÉDAN

Maître de conférences à l'Université de Poitiers

Apports quantitatifs, spatialisés, temporels et multi-échelles pour l'étude hydromécanique expérimentale d'une roche argileuse fracturée.

Soutenue publiquement le 21 JUIN 2021

Devant le jury composé de :

Mme., M. HATTAB	Professeure, LM3, Université de Metz	Rapporteur
M., D. GRGIC	MCF HDR, GeoRessources, Université de Lorraine	Rapporteur
M., P. VACHER	Professeur, SYMME, Université de Savoie Mont Blanc	Rapporteur
Mme. I. COUSIN,	DR, Science du sol, INRAe d'Orléans	Examinatrice
M., A. DENIS	Professeur, I2M, Université de Bordeaux	Examinateur
M. P. COSENZA,	Professeur, IC2MP, Université de Poitiers	Examinateur
M. V. VALLE,	Professeur, Pprime, Université de Poitiers	Examinateur

Table des matières

Résumé.....	iii
Avant-propos.....	v
PARTIE A : PRESENTATION SCIENTIFIQUE.....	1
Introduction générale.....	1
1 Etudes, couplages et interprétations du comportement hydromécanique d'une roche argileuse fracturée à différentes échelles.....	4
1.1 Contexte des études.....	4
1.1.1 Etude en galerie (2011-2012) [Act.15].	8
1.1.2 Etude en laboratoire (2011-2015) [Act.11].	10
1.1.3 Synthèse.....	11
1.2 Historique des algorithmes de corrélation d'images numériques utilisés.....	12
1.2.1 Préambule.....	13
1.2.2 CIN classique (2009-2011) [Act.16].	15
1.2.3 CIN Multi-échelle (2011-2015) [Act.15].....	18
1.2.4 Heaviside-based DIC H ^k -DIC (depuis 2015) [Act.14] [Act.2].	25
1.2.5 Conclusions sur les différents algorithmes de CIN.....	41
1.3 Analyses quantitatives aux différentes échelles.....	42
1.3.1 Anisotropie [Act.7].....	42
1.3.2 Fissures sub-horizontales [Act.24].....	53
1.3.3 Fissures sub-verticales [Act.24].	67
1.3.4 Aire fracturée et porosité surfacique des fissures [Act.24].....	73
1.3.5 Exploitation des champs d'ouverture (o).....	80
1.4 Analyse de la microstructure (cartographie minéralogique) et superposition avec les champs H-DIC (déformations, fissuration).....	86
1.4.1 Minéralogie [Act.11].....	87

1.4.2	Surface élémentaire représentative (SER) [Act.4] [Act.6]	92
1.5	Conclusions générales	94
2	Projet de recherche.....	99
2.1	Mesures cinématiques 2D/3D	102
2.1.1	Technique FIB-MEB-DIC à l'échelle nano-micrométrique.....	102
2.1.2	Modèle aux éléments finis [Act.1].....	106
2.2	Développement d'un outil métrologique optique 3D in-situ.	109
	Références.	113
	PARTIE B : INFORMATIONS ADMINISTRATIVES.....	121
1	Curriculum vitae	121
1.1	Résumé des travaux de recherche	122
1.2	Publications et communications	124
1.2.1	Articles publiés dans des revues de rang A :	124
1.2.2	Autres articles publiés :	127
1.2.3	Article soumis(en préparation) dans des revues de rang A :	127
1.2.4	Conférences invitées :.....	127
1.2.5	Communications internationales avec actes :.....	127
1.2.6	Communications internationales sans actes :.....	129
1.2.7	Communications nationales avec actes :	130
1.2.8	Communications nationales sans actes :.....	132
1.2.9	Autres communications :.....	133
1.2.10	Rapports scientifiques :	133
1.3	Activités d'encadrement	133
1.3.1	Encadrements de thèse :	133
1.3.2	Encadrement d'étudiants en master et licence :	134
1.3.3	Autres encadrements :	136
1.4	Responsabilités collectives :	137
1.4.1	Responsabilités pédagogiques	137

1.4.2	Responsabilités administratives	137
1.5	Responsabilité de projets/contrats :	137
1.6	Participations à des jurys de thèse, de comités de sélection et d'expertises diverses	138
1.6.1	Jurys de thèse	138
1.6.2	Comités de sélection.....	139
1.6.3	Expertises d'articles	139
1.6.4	Participations à des comités scientifiques de conférences internationales.	139
1.6.5	Participations à des comités scientifiques de conférences nationales ..	139
1.7	Activités nationales	140
1.7.1	ANR	140
1.7.2	CPER/FEDER	140
1.7.3	Collaborations.....	140
1.8	Activités en enseignements	140
1.9	Informations scientifiques, techniques et vulgarisation	142
	Annexes.	143

Résumé.

L'utilisation des méthodes optiques est omniprésente en mécanique, mécanique de la rupture et depuis quelques années/décennies en géomécanique. Elles sont particulièrement appréciées car relativement faciles d'utilisation (rapide à mettre en œuvre) par rapport à d'autres méthodes plus conventionnelles, sans contact (non-invasives) avec le matériau étudié, mesurant la déformation, localisant des hétérogénéités. Mais aussi elles sont prisées car applicables à différentes échelles et surtout elles spatialisent l'information cinématique. De ce fait, leurs applications sont très variées dès lors que la zone étudiée (structure, échantillon, éprouvette, paroi, sol, etc.) subit une transformation physique, et ceux pour divers matériaux : métaux, polymères, composite, matériaux du vivant (os, squelette), géomatériaux (sol, roche, béton),

Ce manuscrit se concentre sur l'application de la corrélation d'images numériques (CIN), mise en œuvre sur des roches argileuses soumises à des variations d'humidité et à différentes échelles (du micromètre au pluri-centrimétrique). Ces travaux ont permis de localiser finement les fissures de dessiccation et de quantifier les déformations. Si je m'intéresse plus spécifiquement à la fissuration, l'avantage de ces études permet (i) de visualiser différents types de fractures en fonction de l'échelle et (ii) d'étudier localement leur comportement (ouverture, glissement, orientation). Sur ces roches argileuses, ces fractures sont principalement parallèles à la stratification, mais des fissures verticales ont aussi pu être observées. L'amplitude maximale des ouvertures des fissures de dessiccation varie entre 3 micromètres et 0,7-0,9mm, voire 1,2-1,3mm en fonction de l'échelle investiguée.

Mes travaux de recherche se sont aussi concentrés sur l'anisotropie des déformations hydromécaniques et mettent en évidence (i) une relation linéaire et réversible entre les déformations parallèles et perpendiculaires au litage et (ii) une anisotropie des déformations (rapport variant de 2,84 à 5,35) qui semble être indépendamment de l'échelle investiguée.

Les résultats de l'étude hydromécanique à la petite échelle couplée à la spatialisation de la microstructure sur la même zone d'étude montrent une forte variabilité du comportement de la roche. La superposition des déformations 2D et de la microstructure (carbonates, quartz, matrice argileuse, ...) n'a pas permis d'affirmer de liens directs.

Tous ces travaux expérimentaux portent sur la prise en compte du caractère hétérogène (déformations, fracturation, microstructure) d'une roche argileuse et ceux à différentes échelles spatiales. Pour cela, des outils récemment développés pour l'acquisition de mesurables expérimentaux sur des milieux fracturés ont été mis en œuvre pour enrichir la

compréhension du comportement hydromécanique par spatialisation des grandeurs cinématiques (champs de déplacements et déformations).

Mots clés : Corrélation d'images numériques, roche argileuse, comportement (thermo)-hydromécanique, approches multi-échelles, fracturation.

Avant-propos.

Mon parcours professionnel de mon DEA à ce jour, m'a permis d'affiner mes besoins et d'enrichir mes connaissances en particulier sur les méthodes optiques de mesure de champs, la mécanique de la rupture, ainsi que sur les matériaux argileux (principalement les roches argileuses).

Ce terme matériaux argileux fait partie d'un terme plus générique, les « géomatériaux » [1]. Ce terme regroupe les sols, les bétons et les roches car même si ces matériaux présentent des différences de comportement à la petite échelle, des caractéristiques communes (ex : déformations irréversibles, rupture) sont présentes à une échelle où le milieu étudié peut être considéré comme homogène.

Mes travaux de thèse et d'ATER, menés au Laboratoire de Mécanique des Solides (UMR 6610) devenu depuis un département de l'institut Pprime (UPR CNRS 3346), consistaient à mettre en œuvre des méthodes optiques pour la compréhension de phénomènes tridimensionnels en mécanique de la rupture élastique et ceci proche de la pointe de fissure. Ces travaux sont basés sur le développement en amont de méthodes optiques pour la mesure cinématique surfacique ou volumique d'objets fissurés et sollicités mécaniquement. Les fissures étaient stationnaires ou se propageaient (dynamique). Mes applications expérimentales et numériques se sont concentrées sur des polymères (PMMA, polyuréthane). L'ensemble de ces études ont permis d'identifier des phénomènes divergents avec les développements théoriques 2D (ex : série de Williams, intégrale J). Ces recherches m'ont permis de mettre en œuvre certaines méthodes optiques et ainsi de quantifier les limites de ces méthodes sur des structures homogènes ayant une discontinuité géométrique (i.e., une fissure).

Tout naturellement, ces méthodes optiques non invasives trouvent leur place dans l'étude du comportement mécanique de matériaux argileux, ce qui m'a permis d'être recruté au sein du laboratoire HydrASA (UMR6269). Ce laboratoire est reconnu pour sa connaissance et le soin particulier des préparations (imprégnation, lames minces, DRX, microscopie, ...) des matériaux argileux (modèles ou naturels) dans le but de les caractériser ou d'en étudier leurs propriétés avec pour exemples : le gonflement, le transport, la sorption et ceux à différentes échelles spatiales.

Le travail que j'entreprends depuis 2009 au sein du laboratoire HydrASA devenu depuis une équipe de l'institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers (IC2MP-UMR7285), m'a permis de m'ouvrir à une nouvelle communauté, les « géosciences ». La mixité des communautés de mon équipe (CNU 35/36 et 60 des universités) me permet de côtoyer pétrographes, géochimistes, pédologues, et ainsi de coupler mes approches avec des outils

expérimentaux (DRX, MEB), des observations plus naturalistes et des moyens théoriques et numériques. Toutefois, ce(s) « mariage(s) » de communauté permet(tent) d'étudier le(s) même(s) objet(s) avec des techniques et approches différentes, mais complémentaires, ce qui permet d'aborder l'objet dans sa « *globalité* ». De plus, le rapprochement de notre laboratoire avec d'autres laboratoires orientés 'chimie' (CNU 32 des universités) ouvre le champ de mes études vers de nouveaux matériaux (exemple : zéolithes) et ainsi la perspective de nouvelles collaborations.

PARTIE A : PRESENTATION SCIENTIFIQUE.

Introduction générale.

Depuis mon recrutement en 2009 au sein du laboratoire HydrASA (devenu depuis l'équipe Hydrasa de l'IC2MP UMR7285), j'ai travaillé et développé une activité qui pourrait se résumer à la mise en œuvre de méthodes optiques pour la caractérisation expérimentale du comportement (thermo-)hydromécanique de géomatériaux. Parallèlement une collaboration forte avec l'axe PEM de l'institut Pprime de Poitiers a permis le développement de méthodes expérimentales permettant de mieux comprendre les phénomènes mécaniques induits par la désaturation et la saturation de matériaux argileux. Les grandeurs mesurées sont principalement la déformation et la fissuration du milieu. Mes travaux de thèse ont porté sur l'application de méthodes optiques de mesure de champs pour la mesure de champs mécaniques au voisinage d'une discontinuité géométrique (fissure) et proche de sa pointe, et ceux pour des phénomènes statiques et dynamiques. Ces travaux se sont étendus à des mesures volumiques lors de mes travaux d'ATER.

Tout d'abord, je souhaite souligner une implication forte pour la recherche collaborative et interdisciplinaire, c'est aussi un point fort des activités de mon institut de recherche. Ces collaborations m'ont permis de côtoyer des chercheurs et enseignants-chercheurs de différentes communautés scientifiques. Je peux citer les domaines de la catalyse (et plus particulièrement : la régénération de zéolithes par plasma non thermique), de la pétrographie/minéralogie et de la géomécanique. Cela se caractérise par des publications dans des revues internationales orientées sur des sections CNU 60, 35 et 32. Dans ce mémoire, j'ai choisi de dresser dans la première partie, une synthèse de mes activités de recherches focalisées sur le comportement (thermo-)hydromécanique d'une roche argileuse par des mesures expérimentales à différentes échelles. Pour plus de clarté et de cohérence, je ne présenterai pas les résultats obtenus sur des carottes de roches argileuses sollicitées thermiquement [Act.16], ni sur l'étude des propriétés mécaniques de monocristaux de vermiculite [Act.12]. Je n'exposerai pas non plus mes travaux réalisés pendant de ma thèse de doctorat [Act.17] [Act.18] [Act.19] [Act.21] [Act.22] et mon année d'ATER [Act.20].

La première partie de mon manuscrit concerne l'analyse du comportement hydromécanique de roches argileuses. Elle correspond à la thématique que je porte au sein de mon institut. Cette thématique se base sur des algorithmes de CIN développés par un collègue de l'institut Pprime et avec lequel j'ai une collaboration forte. J'introduirai succinctement la CIN classique et son extension au milieu discontinu (H-DIC) en passant par la

CIN multi-échelle. La H-DIC a marqué un tournant dans ma recherche, car elle permet une description du comportement mécanique du milieu et de sa fracturation. Je montrerai ces avantages sur la localisation fine des fissures ayant un mouvement subpixel et sur la quantification des ouvertures et du glissement. J'introduirai aussi une nouvelle méthode de calcul des déformations par CIN induit par l'enrichissement de la H-DIC. Pour illustrer mes propos, une application sera menée sur une série d'images simulées pour évaluer ses performances métrologiques (précision, erreurs de mesure). Puis, je décrirai les essais expérimentaux, que j'ai entrepris. Ces essais, appliqués sur une roche argileuse, permettront d'aborder différentes échelles variant de quelques millimètres à plusieurs décimètres et différentes sollicitations : humidité relative contrôlée aux échelles mésoscopique et macroscopique et hygrométrie naturelle à l'échelle de la galerie. Ces travaux réalisés parallèlement ou antérieurement aux développements de la H-DIC et donc analysés avec des versions modifiées de la CIN classique (exemple : CIN multi-échelles) permettaient déjà de visualiser certaines « grandes » fissures et de mesurer leur ouverture par soustraction des champs de déplacements [Act.15].

A l'échelle de la galerie, les résultats obtenus sur les « grandes » fissures ainsi que les nombreuses discussions que j'ai eues avec un *photomécanicien* de l'institut Pprime (Valéry VALLE) ont confirmé que l'hypothèse de milieu continu de la CIN classique ne pouvait plus être utilisée dès lors que nous nous focalisons sur la fissuration et la description fine du comportement de cette roche. Dans ce contexte, on peut considérer que mes travaux de recherche n'ont pas fait qu'initier et propager des fissures, mais ils ont aussi permis d'initier et de propager un nouvel algorithme de CIN adapté au milieu fracturé (H-DIC).

En plus des champs « incontournables » de déplacements et de déformations par différences finies (DF), « l'aboutissement » de la H-DIC a permis d'ajouter des nouveaux champs avec comme objectifs :

- La description fine de la fracturation du milieu,
- Des mesures locales et automatisées de l'ouverture et du cisaillement, et
- Une nouvelle méthode de mesure des déformations.

Toutefois, la H-DIC a entraîné une augmentation significative du temps de calcul, du nombre de paramètres quantifiés, du nombre de champs qui atteint 17 champs contre 6 pour la CIN classique et donc de la quantité de données à stocker (5,1Mo par champ de 1280x1024 pixels et par état). Sur de longues périodes (>1 an) ou pour des phénomènes mécaniques rapides, la ou les informations pertinentes et intéressantes deviennent plus difficiles à localiser et donc une analyse temporelle fine est indispensable. Une fois localisées, ceci enrichit la compréhension du comportement mécanique local du milieu étudié.

A l'échelle mésoscopique, ce travail collaboratif a été prolongé par la quantification de la microstructure de la roche argileuse couplée à des mesures des déformations hydriques et l'estimation de la surface élémentaire représentative (SER) par différentes approches mathématiques. Ce travail de cartographie grand champ de la microstructure a été initié grâce une collaboration avec un *pétrographe* de l'institut (Dimitri PRET).

Pour mettre en avant les résultats expérimentaux obtenus aux différentes échelles, j'ai choisi d'organiser cette première partie en quatre sections :

- Le contexte des études,
- Un historique des algorithmes de corrélation d'images numériques (CIN) mis en œuvre en commençant par la CIN classique, puis la CIN multi-échelle avec les premières exploitations des champs cinétiques, et pour finir par la présentation d'une extension de la CIN au milieu fracturé (H-DIC) avec la présentation des nouveaux champs mesurés,
- Une analyse par échelle d'investigation en se focalisant sur l'anisotropie des déformations hydromécaniques, le comportement des fissures sub-horizontales et sub-verticales, l'aire fracturée et la porosité de surface des fissures,
- Des couplages entre les champs cinétiques et d'autres données (ex : minéralogie).

Les résultats et les observations faites dans ces quatre sections orienteront la conclusion de cette première partie qui résumera mes projets de recherche à court terme.

Dans une seconde partie, j'exposerai mes perspectives de recherche à moyen terme. Cette dernière partie synthétisera trois actions/opérations que je porte/contribue/développe, centrées sur ma thématique de recherche actuelle et sur un nouvel outil de mesure des déplacements 3D 'non invasif' in-situ que je développe. Les applications potentielles de ce nouvel outil applicable à l'échelle de l'ingénieur pourraient être l'étude des mouvements de terrain (retrait/gonflement, stabilité de pentes ou de digues, faille) ou ceux d'un bâtiment.

1 Etudes, couplages et interprétations du comportement hydromécanique d'une roche argileuse fracturée à différentes échelles.

1.1 Contexte des études.

Ce chapitre résume certaines activités de recherche que je porte depuis mon recrutement en tant que maître de conférences à l'institut IC2MP (UMR7285) de l'Université de Poitiers et présente une partie de mes études réalisées sur des roches argileuses, et en me focalisant sur des chargements hydriques. Ce matériau fait référence aux recherches nationales et internationales menées sur l'étude des comportements (mécanique, thermique, chimique, hydrique, transport...) de la roche hôte dans le cadre de stockage en géologie profonde. En effet, « *L'examen par l'IRSN des capacités de confinement du stockage porte, sur l'évolution des différentes propriétés des différentes barrières qui le constituent (i) la barrière géologique (formation hôte du Callovo-oxfordien (Cox)), (ii) les barrières argileuses ouvragées (Bouchons d'alvéoles HA, scellements des galeries d'accès aux alvéoles MAVL, des galeries de liaison et des liaisons jour-fond), et (iii) les colis et conteneurs de stockages. Cet examen prend en compte les principales perturbations (mécaniques, chimiques, hydriques et thermiques) susceptibles d'affecter les composantes du stockage et leurs conséquences sur la sûreté du stockage* » [2]. Dans ce contexte, l'IRSN et l'ANDRA mènent leur propre programme de recherche.

Ce grand projet dans le domaine de la géomécanique, tel qu'un site de stockage en géologie profonde nécessitent la prédiction du comportement des ouvrages à différentes échelles spatiales et temporelles, depuis les phases de conception, réalisation, exploitation (≈ 100 ans) et après sa fermeture (≈ 100.000 ans). Une telle prévision requiert entre autres l'utilisation de la modélisation numérique utilisant des lois de comportement *ad-oc* et une description « réaliste » du massif rocheux (exemples : massif 3D fissuré, minéralogie, ...). L'évolution permanente des moyens informatiques permet de complexifier ces modèles numériques (3D, XFEM, THM-C, comportement isotrope transverse, partiellement saturé, etc.). Pour cela, la connaissance et l'acquisition du comportement de la roche, par des essais de laboratoire et in-situ, sont indispensables. Par exemple, le comportement hydromécanique expérimental et/ou les paramètres géométriques, comme la distance entre les fissures, pourraient être imposées dans ces modèles numériques ayant pour but une meilleure prévision du comportement de l'ouvrage sur le long terme. Les approches expérimentales développées et mise en œuvre dans ce manuscrit permettront d'améliorer la compréhension du comportement hydromécanique d'une roche argileuse à différentes échelles. De plus, ces

outils métrologiques, que j'utilise, sont non invasifs, simple d'utilisation et de mise en œuvre, permettent un « monitoring » temporel et spatialisé de l'ouvrage ou au moins d'une partie de celui-ci. A mon sens, ce monitoring aura une place très importante dans le suivi tout au long de sa phase d'exploitation et permettra « d'alimenter » ou de comparer des modèles numériques associés.

Pour les études à l'échelle de la galerie (ou de la formation géologique), l'IRSN et l'ANDRA disposent d'un laboratoire souterrain chacun. Pour l'IRSN, ce dernier a été créé par le creusement de plusieurs galeries depuis un ancien tunnel ferroviaire (Station expérimentale de Tournemire, Aveyron). Depuis 2000, l'ANDRA a réalisé son laboratoire souterrain (site de Bure) depuis la surface et compte plus de 1,4 km de galeries cumulées situées à des profondeurs de -445m (haut de la couche du Cox ; USC) et de -490m (milieu de la couche du Cox ; UA). Ces deux laboratoires ont été réalisés dans des roches argileuses, appelées aussi argilites et connues entre autres pour leur faible perméabilité.

La création de différentes galeries dans ces laboratoires induit l'apparition d'une zone endommagée (EDZ : Excavation Damage Zone) entourant les galeries dont la pénétration (i.e., profondeur) dans le massif rocheux varie en fonction du site (Bure ou Tournemire), mais aussi de l'orientation de ces galeries par rapport aux contraintes horizontales majeures (σ_H) et mineures (σ_h) [3,4]. Sa création et son extension sont dues à un changement de l'état de contrainte du massif induit par le creusement, la géométrie des galeries, mais aussi par des modifications des propriétés de la roche (perméabilité, porosité, état hydrique...) et par l'initiation et la propagation de discontinuités (exemples : fissures hydriques).

Cette zone perturbée est néfaste par rapport aux propriétés hydrauliques (faible perméabilité à l'eau 10^{-18} - 10^{-21} m² (fissures) et mécaniques (diminution des propriétés mécaniques (contrainte de compression, module d'élasticité,...) [5] de la roche saine et une étude mécanique approfondie, ainsi qu'une compréhension de cette fracturation induite est donc nécessaire, dans le cadre d'un stockage en géologie profonde. Sur le site de Tournemire, les travaux de Cabrera et al., 2001 [6] concluaient sur la présence de fissures parallèles à la stratification de la roche, avec une pénétration dans le massif rocheux de l'ordre de 35-40cm et des distances entre elles de l'ordre d'une vingtaine de centimètres. La présence et l'orientation privilégiée des fissures de dessiccation poussent à se poser les questions suivantes :

Existe-il d'autres fissures que celles observées à l'œil nu par Cabrera et al., 2001 [6] ?

L'ouverture de ces fissures est-elle réversible sur un cycle annuel ?

La minéralogie de cette roche argileuse ne joue-t-elle pas un rôle prépondérant ?

La genèse et l'histoire de cette roche sédimentaire ne favorise-t-elle pas l'orientation de ces fissures ?

La déformation hydromécanique mesurée est-elle corrélée à la fracturation observée ?

...

Pour tenter de répondre partiellement, voire totalement à ces questions, différents essais expérimentaux doivent être menés à différentes échelles.

En effet, pour la question minéralogie/déformations, seuls des essais en laboratoire à la petite échelle (<mm), permettront de coupler, de superposer et de comparer des données mécaniques (déformations) et minéralogiques (matrice argileuse, carbonates, quartz, pyrite, feldspath) [7]. En ce qui concerne la fracturation à l'échelle de la galerie, des outils non invasifs, basés sur de la métrologie optique, permettent d'obtenir des informations spatialisées à une précision inférieure que celle de notre œil qui est au mieux de 0,16mm à 1 mètre de distance [8].

Il me paraît nécessaire de rappeler qu'en métrologie optique, et plus particulièrement pour la corrélation d'images numériques (CIN) en excluant la qualité du motif/mouchetis, la résolution (i.e., précision + incertitudes de mesures) est très importante et influence la quantification des phénomènes mécaniques locaux (déformations, fissuration, ...), c'est-à-dire le plus petit phénomène mécanique mesurable. Pour augmenter la résolution de la méthode, il faut augmenter la résolution spatiale en étant moins local, on parle aussi du compromis entre résolution et résolution spatiale, mais ces aspects ne sont pas développés dans ce mémoire. Dans une moindre mesure, la résolution influence les dimensions de la surface étudiée (ou ROI pour région d'intérêt), qui peuvent être gérées par exemple en augmentant la taille du capteur des caméras.

Pour illustrer la synthèse de mes travaux de recherche et apporter des éléments de réponses aux questions précédemment exposées, j'ai choisi de mettre en avant deux actions marquantes de mes travaux de recherche. Pour mener à bien ces travaux, des développements de moyens expérimentaux (algorithme, banc d'essai, montages expérimentaux, ...) ont été nécessaires via des collaborations et des développements internes que je porte. Ces actions, effectuées sur la même roche argileuse et avec le même outil métrologique, permettront de mesurer les mêmes grandeurs mécaniques à différentes échelles spatiales. Des similitudes, des différences de comportement seront observées. Des comparaisons et une discussion « d'effets d'échelle » sera entreprise. Parallèlement, des outils métrologiques adaptés aux observations faites permettront d'étendre et d'innover dans le domaine de la mécanique expérimentale des milieux fracturés. En effet, dans la littérature, de nombreux travaux ont mis en œuvre la corrélation d'images numériques (CIN) sur des sols

[9–11], des matériaux granulaires [12] ou des roches [13–16], mais leurs travaux et résultats ont été obtenus avec des algorithmes de CIN classique considérant le milieu comme continu. En conséquence, les fissures observées ne correspondent qu'à celles dont l'ouverture est « grande ». Certains d'entre eux ont post-traité les champs cinématiques pour étudier la cinématique des fissures [13].

La première action concerne une étude à l'échelle d'une galerie. L'enjeu était donc de mettre en œuvre une méthode optique non invasive sur une partie d'un front de galerie et d'étudier le comportement hydromécanique sur une région d'intérêt de $34,4 \times 27,5 \text{ cm}^2$ soumise à une variation naturelle d'hygrométrie (T et RH). Ceci permet de répondre à la question sur la présence d'autres fissures de dessiccation que celle déjà observées, et d'étudier leurs comportements (ouverture, glissement, orientation) sur une longue période (≈ 1 an). Ces fissures délimitent des surfaces dites 'continues', c'est-à-dire sans fissures apparentes. Le comportement de ces surfaces, appelées aussi phase solide, a été étudié pour quantifier leurs déformations, confirmer leurs réversibilités sur la période d'étude, et évaluer le rapport des déformations hydromécaniques selon les directions perpendiculaires et parallèles à la stratification. Cette étude s'est réalisée dans le cadre d'un projet du GNR TRASSE (IRSN, CNRS) du programme interdisciplinaire du CNRS (PACEN, programme sur l'aval du cycle et de l'énergie nucléaire), dont j'étais le porteur.

La seconde action, effectuée en laboratoire, concerne l'analyse du comportement hydromécanique d'un échantillon de roche ($2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$) soumis à des variations d'humidité contrôlée et du couplage entre ces données mécaniques et la microstructure (minéralogie) sur une grande surface ($5,5 \times 4,1 \text{ mm}^2$). Ce travail à l'échelle mésoscopique a été mené conjointement à une étude hydromécanique à l'échelle de l'échantillon (échelle macroscopique). Pour ces deux échelles d'investigation, la même approche que celle de la galerie a été menée et donc les mêmes grandeurs (anisotropie, comportement des fissures, porosité de surface des fissures) seront révélées. Cette étude s'est réalisée à travers les travaux d'une doctorante Anne-Laure FAUCHILLE (financement de la thèse par la région Poitou-Charentes) que j'ai co-encadrés. De plus, cette action a été financée via deux projets du défi NEEDS (CNRS, CEA, EDF, ANDRA, AREVA, IRSN, BRGM) projet fédérateur MIPOR (comportement à différentes échelles des matériaux pour le stockage), dont j'étais le porteur.

Ces essais ont été effectués à trois échelles spatiales différentes allant du mm et dm, et pour des conditions aux limites (chargement et déplacements) des zones d'étude extrêmement différentes avec :

- Essai en galerie (**échelle de la galerie**) :
 - variations naturelles d'hygrométrie (RH et T) appliquée sur les parois et le front de la galerie,
 - déplacements libres dans la direction orthogonale au front de galerie,
 - chargement mécanique induit par un champ de contraintes (σ_v , σ_H et σ_h),
 - circulation d'eau dans le massif (34,4 x 27,5cm²),
- Essais en laboratoire (**échelles macroscopique et mésoscopique**) :
 - déplacements libres des faces extérieures de l'échantillon (2x2x2cm³), et
 - chargement hydrique sur ces mêmes faces.

1.1.1 Etude en galerie (2011-2012) [Act.15].

Ce projet, soutenu financièrement via un projet du GNR TRASSE intégré au programme PACEN, et dont j'étais le porteur comportait deux volets dont le premier portait sur l'étude thermomécanique de carottes soumis à des sollicitations thermiques (25-180°C) [Act.16]. Ce travail a montré deux fracturations dont l'une était parallèle à la stratification. Le second volet a été mené dans la station expérimentale de Tournemire (IRSN, France) et consistait à la spatialisation des déformations d'une paroi de galerie. Plus précisément, les objectifs portaient sur :

- **un suivi temporel** (période >1 an) d'une partie d'un front de galerie,
- **une localisation des fissures** de dessiccation,
- **une quantification de l'ouverture** des mêmes fissures, et
- **une quantification des déformations** de la phase solide.

Les dimensions de la région d'intérêt (ROI) ont été choisies suite aux observations visuelles de Cabrera et al., 2001 [6] définissant une distance de l'ordre d'une vingtaine de centimètres entre les fissures de dessiccation. Notre étude a été menée sur une zone d'investigation pluri-centimétriques d'un front de galerie où la zone endommagée (EDZ) était déjà présente et avec comme mouchetis la topographie naturelle (induite par le creusement de la galerie par attaque ponctuelle) couplée à un éclairage *ad oc*. L'étude avait débuté en mars 2011 et a duré environ deux ans. L'EDZ était présent car la galerie Est1996 (figure 1-1) a été excavée en 1996, soit 15 ans avant le début de l'étude. La galerie n'a jamais été recouverte (béton projeté, voussoir), et sa forme est dite en forme de 'fer à cheval' (figure 1-1.b) [17]. Le soutènement de la galerie se compose de cintres métalliques et dont l'un se situe au fond de la galerie.

Selon Rejeb et al.,2003 [3] et Rejeb et al.,2006 [4], l'état de contraintes est $\sigma_v=3.8\pm 0,4$ MPa, $\sigma_H=4\pm 2$ MPa et $\sigma_h=2,1\pm 1$ MPa, et l'orientation de la galerie est de l'ordre de

70,8° par rapport à la contrainte horizontale majeure σ_H (figure 1-1.a). Ce contact air/roche, la géométrie de la galerie, ainsi que son creusement tendent à modifier les propriétés de la roche et à générer la fracturation observée. Une partie de cette fracturation est sensible au phénomène de saturation/désaturation due aux variations saisonnières dans les galeries ($7 < T < 22^\circ\text{C}$; $19,3 < RH < 99,3\%$). Les résultats portent sur la mesure des déplacements plans (u, v), sur une région d'intérêt de $34,4 \times 27,5 \text{ cm}^2$ (figure 1-1.c) et dont le grandissement est de $0,269 \text{ mm} \cdot \text{pixel}^{-1}$.

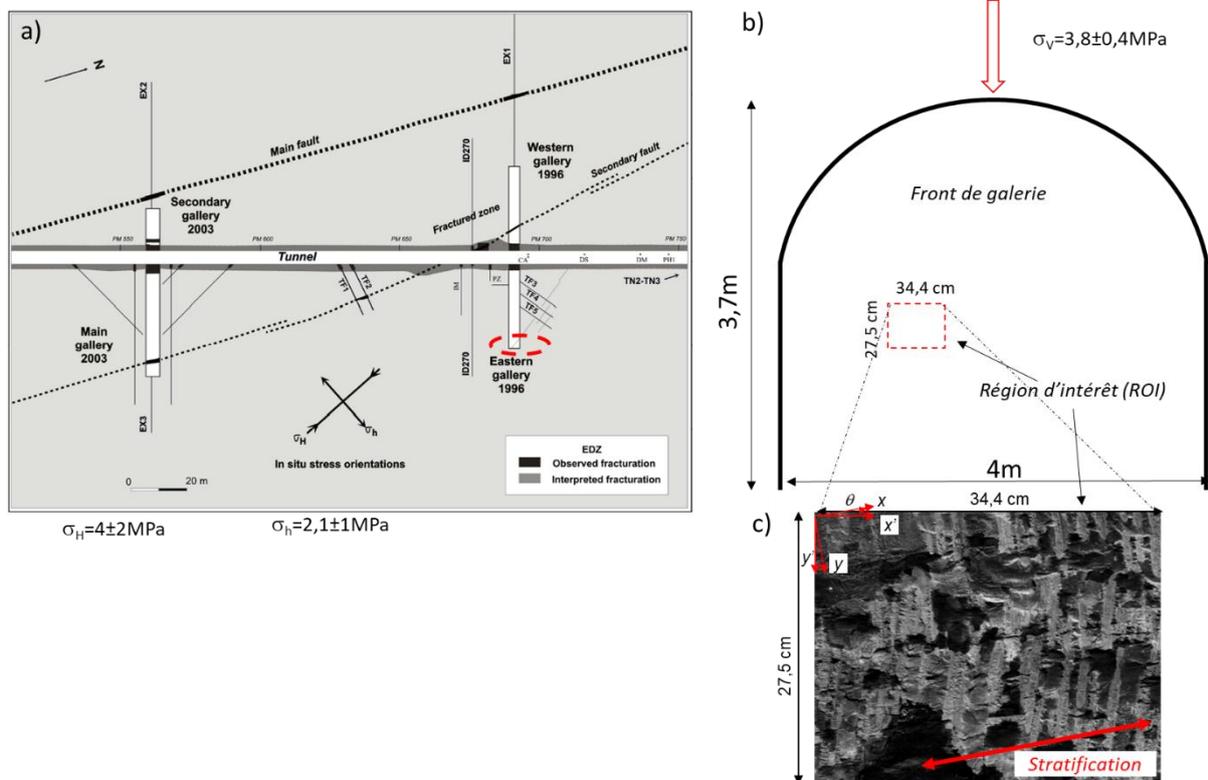


figure 1-1 : (a) représentation de la station expérimentale de Tournemire extraite Rejeb et al.,2006 [4]. Les pointillées rouges matérialisent le front de galerie de la galerie Est1996.,(b) forme de la galerie Est1996 et localisation de la ROI, (c) image CIN de la ROI. Les valeurs des contraintes ($\sigma_v, \sigma_H, \sigma_h$) sont extraites de Rejeb et al.,2003 [3].

A la vue des premières analyses, les phénomènes hydromécaniques observés sont lents et donc une image toutes les 2 heures a été analysée pour le suivi temporel, soit 4380 états déformés par an. Comme la perméabilité de cette roche est très faible, et les variations journalières d'humidité relative significatives (ex : ΔRH maxi $\approx 22\%$ entre le 24/11/2011 et le 25/11/2011), le massif rocheux n'est donc jamais à l'état d'équilibre et l'humidité relative mesurée proche de la zone d'intérêt correspond à l'humidité relative de la galerie. Aucune autre donnée (ex : teneur en eau, minéralogie) en surface ou au sein du massif rocheux n'a

été acquise lors de notre campagne d'essai ou à postériori proche de la zone d'étude permettant de les coupler/comparer à nos mesures expérimentales.

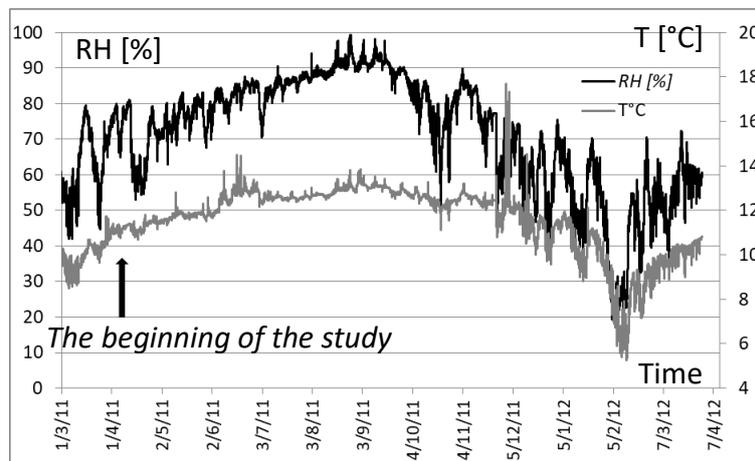


figure 1-2 : Variations sur un an de la température (T) et de l'humidité relative (RH) dans la galerie EST1996 de la station expérimental de Tournemire.

1.1.2 Etude en laboratoire (2011-2015) [Act.11].

Cette étude a été soutenue financièrement par deux projets du projet fédérateur NEEDS milieux poreux dont j'étais le porteur et par l'ex région Poitou-Charentes finançant la thèse de doctorat d'Anne-Laure FAUCHILLE que j'ai co-encadrée avec Philippe COSENZA et dont le cadre général consistait à :

- étudier le comportement hydromécanique en laboratoire et aux échelles mésoscopique et macroscopique,
- superposer spatialement des données mécaniques à la microstructure d'une roche argileuse (cartographie minéralogique sur $5,5 \times 4,1 \text{ mm}^2$),
- localiser les fissures hydriques et quantifier leur ouverture, et
- confronter la minéralogie avec les déformations et la fissuration.

Les aspects méthodologiques, les développements expérimentaux et d'autres résultats que ceux présentés ici sont exposés dans le manuscrit de thèse d'Anne-Laure FAUCHILLE [7] et dans deux publications scientifiques à comité de lecture [Act.5] [Act.11]. Un soin particulier a été apporté à la conception du dessiccateur car nous souhaitons suivre simultanément et par mesures optiques les déformations aux échelles mésoscopique (grandissement de la caméra de $2,2 \mu\text{m}/\text{pixel}$) et macroscopique (grandissement de $10 \mu\text{m}/\text{pixel}$) et nous voulions quantifier la masse de l'échantillon (i.e. la perte en eau) in-situ.

L'échantillon a été initialement saturé par solution saline $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (humidité relative (RH) de 98%). L'acquisition des images est effectuée lors d'une sollicitation de type

« choc hydrique » par utilisation d'une solution saline (MgCl_2 -33%), sur un échantillon ($2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$) d'argilite de Tournemire. Comme pour l'essai en galerie, les valeurs d'humidité relative enregistrées par le capteur d'humidité ne correspondent pas à un état d'équilibre de l'échantillon de roche argileuse, mais à l'humidité relative dans le dessiccateur. Ce choix de ce type de chargement visait à solliciter fortement l'échantillon et à stimuler les fissures préexistantes et/ou à en générer des nouvelles. Un autre essai a été effectué pour une sollicitation par paliers humidité et dont les résultats sont présentés dans le manuscrit de thèse d'Anne-Laure FAUCHILLE [7].

Au préalable, un protocole de polissage à sec sans imprégnation (phase 1 de la figure 1-3) a permis d'obtenir une surface permettant l'analyse des déformations par CIN, et une cartographie minéralogique grand champ en haute résolution (8806×6606 pixels avec $1 \text{ pixel} = 0,625 \mu\text{m}$) issue d'images MEB en mode électrons rétrodiffusés (phase 2 de la figure 1-3).

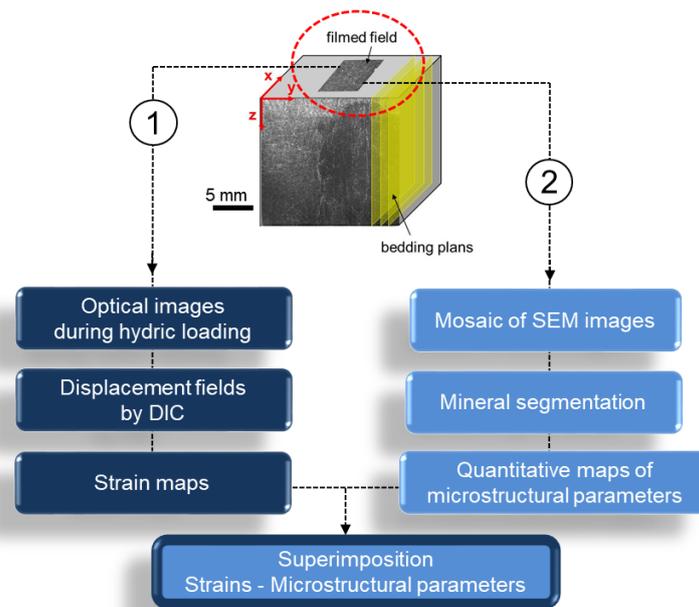


figure 1-3 : Procédure expérimentale (2 phases) pour comparer les déformations et la microstructure (extrait de [7]).

1.1.3 Synthèse.

Pour mener à bien ces deux actions, j'ai collaboré étroitement avec l'axe PEM de l'Institut Pprime de Poitiers pour l'adaptation de la corrélation d'images numériques (CIN) au milieu fissuré, dont le chapitre suivant résume les avancées temporelles. Ce travail de développement est lié aux nombreuses discussions que nous avons eues et aux limites qu'offraient la CIN classique vis-à-vis de ma recherche scientifique lorsque nous nous intéressions précisément aux fissures. Je présenterai aussi les matrices S.W.O.T permettant

de synthétiser les forces et les faiblesses, ainsi que les opportunités et les menaces des trois algorithmes utilisés. Les développements numériques des algorithmes ont été effectués par un collègue de cet institut (§1.2).

Pour la partie minéralogie, j'ai collaboré avec un collègue de mon institut et Anne-Laure FAUCHILLE pour l'obtention de la cartographie minéralogique grand champ en haute résolution et dont les principaux résultats d'exploitation de cette carte seront présentés dans la section §1.4. Ce travail permettra de superposer spatialement et de quantifier la répartition des déformations en fonction de la minéralogie. Cette cartographie est une formidable donnée spatialisée pour estimer les dimensions de la surface élémentaire représentative (SER) et dont son analyse sera exposée dans la section §1.4.

1.2 Historique des algorithmes de corrélation d'images numériques utilisés.

La corrélation d'images numériques (CIN ou DIC en anglais) est une méthode qui permet la mesure de champs cinématiques à partir d'un codage aléatoire (mouchetis) de la surface étudiée et en utilisant un principe de reconnaissance d'image entre un domaine à l'état initial et son homologue à l'état déformé. Celle-ci, développée dans les années 1980 [18,19], est une technique optique largement utilisée en mécanique en raison de sa capacité à déterminer les champs de déplacements, et à accéder aux champs de déformations.

La procédure consiste donc à enregistrer séparément l'état initial (t_0) et l'état déformé (t) par l'acquisition d'images. Les algorithmes de corrélation ont généralement pour objectif de trouver la valeur minimale du coefficient de corrélation et de manière à obtenir sa localisation la plus précise possible. Pour cela, ils sont composés de deux parties distinctes permettant une approche de la solution au pixel près, suivi d'une phase d'optimisation permettant l'obtention de résultats sub-pixels. La première approche peut être réalisée à l'aide d'une recherche systématique de la valeur minimale de CF (phase très coûteuse en temps de calcul ; équation 1-1), ou par FFT (moins coûteuse). La seconde est généralement basée sur une méthode numérique d'optimisation à gradients descendants comme les méthodes de Newton (phase peu coûteuse en temps de calcul car peu d'itérations).

Pour cette seconde étape, il est nécessaire de disposer d'une interpolation des niveaux de gris. Le choix de cette interpolation reste à priori libre. Souvent les plus utilisées sont les interpolations bilinéaires et bicubiques [20]. Le domaine contenant les motifs de niveaux de gris doit être suffisamment riche en grain et bien contrasté pour pouvoir assurer une solution de corrélation.

Les domaines sont généralement carrés avec des dimensions définies par l'utilisateur. Cette dernière influence directement la résolution spatiale et l'incertitude de mesure de la méthode [21].

$$CF\left(u, v, \frac{du}{dx}, \frac{du}{dy}, \frac{dv}{dx}, \frac{dv}{dy}\right) = 1 - \frac{\int_S f(x, y) \cdot g(x^*, y^*) dx dy}{\sqrt{\int_S (f(x, y) - \bar{f}_s)^2 dx dy \int_S (g(x^*, y^*) - \bar{g}_s)^2 dx dy}} \quad \text{équation 1-1}$$

où u et v sont les composantes horizontales et verticales du vecteur déplacement (\bar{U})
 $x^* = u + x + \frac{du}{dx}x + \frac{du}{dy}y$ et $y^* = v + y + \frac{dv}{dx}x + \frac{dv}{dy}y$. f_s, g_s sont les intensités des niveaux de gris du domaine aux états initial et déformé. \bar{f}_s et \bar{g}_s sont les intensités moyennes des niveaux de gris du domaine dans les états initial et déformé.

La transformation cinématique est caractérisée par une translation plane (u, v) et des premiers gradients $\left(\frac{du}{dx}, \frac{du}{dy}, \frac{dv}{dx}, \frac{dv}{dy}\right)$.

Après optimisation, nous avons accès au vecteur déplacement plan (u, v) ainsi qu'au tenseur gradient de déplacement. Le tenseur des petites déformations ($\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$) est calculé par dérivation des champs de déplacements (i.e. différences finies (DF)) [22,23].

1.2.1 Préambule

Cette partie a pour objectif d'exposer les limites, apports et la montée en puissance des algorithmes de CIN que j'ai pu utiliser au cours de ces années passées et leurs apports avec comme objectifs de recherche :

- **une description réaliste et évoluée du milieu, et**
- **une compréhension locale du comportement mécanique (fissuration et déformations).**

Pour cela, j'ai besoin d'accéder aux champs de déplacement et de déformations hydromécaniques, et au comportement local des fissures, avec quelquefois deux fissures s'intersectant.

Dans la littérature, la prise en compte d'une discontinuité dans les algorithmes de CIN a déjà été développée auparavant. Pour les méthodes locales, on peut citer les méthodes Pointwise DIC [24], le subset splitting [25], et la méthode extended digital image correlation (X-DIC) [26] pour les méthodes globales. On peut aussi citer les travaux mettant en œuvre la extended DIC [13] pour exploiter les champs de déplacements de la CIN classique et quantifier

la cinématique locale des discontinuités. Ces nombreux algorithmes ont inspiré le développement d'un nouvel algorithme de corrélation adapté au milieu fracturé et, l'axe PEM de l'institut Pprime est reconnu et porte une activité de recherche sur le développement d'outils métrologiques adaptés. Cela conduit cette équipe de recherche à disposer de nombreux logiciels de mesure (ex : suivi de marqueurs, CIN, DVC, photoélasticimétrie, analyse de franges, de grilles,... [23]).

C'est dans cet optique, que le travail collaboratif que je porte au sein de mon laboratoire avec l'axe PEM de l'institut Pprime a permis d'améliorer la description des phénomènes locaux proches des discontinuités au moyen de deux outils qui ont été développés et améliorés, et ceci parallèlement aux deux études citées précédemment :

- CIN multi-échelle → basée sur la CIN classique avec diminution successive de la taille du domaine,
- H-DIC → enrichissement de la CIN classique par l'ajout des fonctions d'Heaviside (adaptées en 2D) [Act.14] [27–29] permettant d'appréhender l'étude du comportement mécanique de milieux discontinus. Pour tenir compte des fissures dans les domaines, ce nouvel algorithme de CIN a été initialement développé pour nos applications [27] et appliqué aussi dans d'autres communautés scientifiques et champs disciplinaires [28] [Act.3].

La rapidité du développement des logiciels et les constats faits avec les logiciels antérieurs sur mes études expérimentales ont permis d'amender perpétuellement le code et d'aboutir aujourd'hui à un outil de métrologie performant et améliorant la compréhension du comportement hydromécanique de la roche (ex : mesure des ouvertures/glislements des fissures). A travers cette collaboration, des extensions à la stéréo-corrélation d'images numériques (H-SDIC, [Act.8]) et à la corrélation d'images volumiques (H-DVC, [Act.9]) ont été développées et validées par des essais mécaniques de traction ou de compression uniaxiale. Ces algorithmes et les résultats sont détaillés dans des publications scientifiques de Valle et al., 2018 [Act.8] et Valle et al., 2019 [Act.9]. D'autres travaux scientifiques ont mis en œuvre la H-SDIC [30] et H-DVC [31]. Ces extensions me permettront d'orienter mes perspectives de recherche dans le domaine de la géomécanique que je développerai ultérieurement (§.2).

H-SDIC a aussi été mis en œuvre dans le cadre d'un contrat avec l'ANDRA (dont j'étais le porteur), sur une paroi de galerie souterraine située à -445 mètres de profondeur dans l'unité silto-carbonatée (USC) du laboratoire souterrain de Bure [R.S.4]. L'objectif était d'étudier l'influence de la dépose du soutènement (cintres) sur la déformation du massif rocheux et de quantifier la convergence de la galerie [C.I.A.7]. Pour des raisons de

confidentialité, ces travaux n'ont pas encore été publiés dans une revue scientifique à comité de lecture.

Pour la H-DVC, d'autres résultats sont présents dans la thèse de doctorat de Mohand Berdjane soutenue en 2017 [32], que j'ai co-encadré avec Valéry VALLE et Arnaud GERMANEAU.

Avant de présenter l'exploitation de ces champs, et les apports de mes recherches scientifiques, il me paraît nécessaire de faire un historique des différents algorithmes de CIN que j'ai eu à utiliser en mettant en avant leurs limites et leurs avantages. Ceci permet d'affirmer que mes travaux de recherche expérimentaux ont grandement contribué aux développements d'algorithmes de CIN et à la remise en question de ces outils pour aboutir, aujourd'hui, à des logiciels démontrant leurs apports dans la compréhension de phénomènes mécaniques locaux. Pour cette comparaison, j'ai choisi deux images de l'étude en galerie correspondant à un état où les fissures sont fermées et à un état où elles sont visibles (figure 1-4.a,c).

1.2.2 CIN classique (2009-2011) [Act.16].

Lorsque, j'ai débuté ces études, nous ne disposions que la CIN classique [18], avec accès aux champs de déformations par différences finies (DF) (i.e. dérivation des champs de déplacement) [22]. Rapidement, nous nous sommes aperçus que la CIN classique ne pouvait pas répondre favorablement aux recherches scientifiques que je souhaitais porter, car pour rappel, la CIN classique est basée sur une approche locale de milieu continu ne permettant pas d'utiliser cet algorithme lorsque les domaines interceptent une fissure et surtout lorsque l'on cherche à étudier spécifiquement le comportement local de ces discontinuités. Comme le montre la figure 1-4.b et la figure 1-4.d, des discontinuités de niveaux de gris sur le champ de déplacement vertical sont observées et elles correspondent aux fissures visibles sur l'image déformées (figure 1-4.a et figure 1-4.c). Le profil du déplacement vertical ((figure 1-4.e) montre un changement de pente autour de la position réelle de la fissure et sa largeur correspond à la taille du domaine de corrélation.

En géosciences, de nombreux travaux ont utilisé cet algorithme pour localiser des fissures à différentes échelles. Je peux citer, pour les argilites les travaux de Lenoir et al. 2007 [16], de Bornert et al., 2010 [33] ou encore de El Hajjar et al., 2020 [11] pour des sols mais les champs obtenus permettent seulement de localiser de 'grandes fissures' (i.e. ouverture de la fissure importante). D'autres travaux ont choisi de post-traiter les champs de déplacements obtenus par CIN classique, par interpolation parabolique, pour quantifier les sauts de déplacements le long des fissures [13].

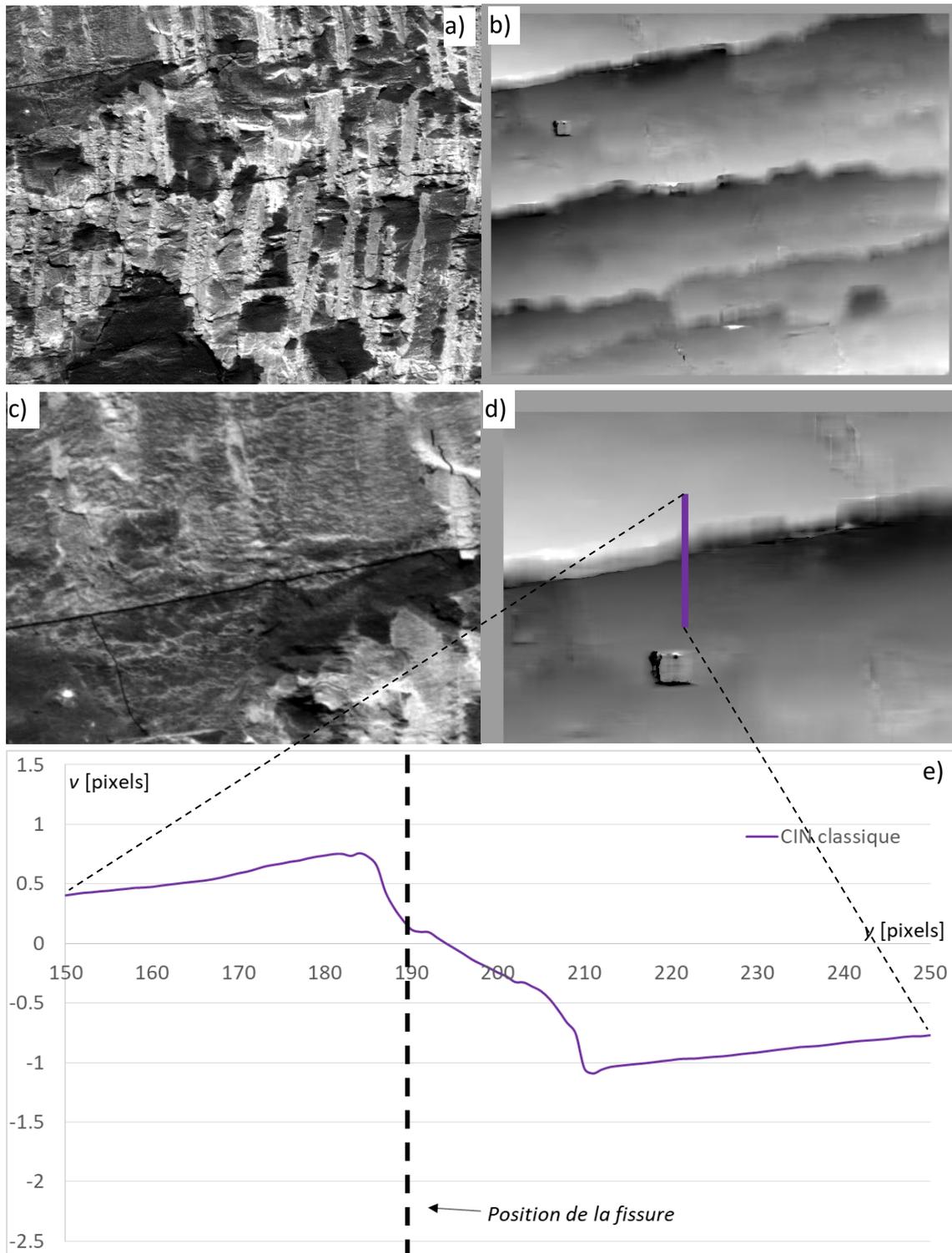


figure 1-4 : (a) image déformée (8-bits), (b) champ de déplacement vertical, (c) zoom sur l'image déformée montrant la fissure, (d) zoom sur le champ de déplacement vertical et (e) profil du déplacement vertical pour les coordonnées $x=200$ pixels et $150 < y < 250$ pixels. Le trait en pointillé noir correspond à la position réelle de la fissure.

Avantages et limitations de la CIN classique.

Les inconvénients/limitations de cette méthode sont (i) la résolution spatiale est égale à la taille du domaine et (ii) la solution optimale (recherche au pixel puis optimisation de type Newton-Raphson) qui tient compte de six inconnus :

- deux inconnues de translation (u, v), et
- quatre inconnues de déformations (i.e. premiers gradients) $\left(\frac{du}{dx}, \frac{du}{dy}, \frac{dv}{dx}, \frac{dv}{dy}\right)$ (équation 1-1).

La présence de discontinuités géométriques comme les fissures n'est pas explicitement prise en compte dans le calcul, ce qui dans le cas de milieux fissurés, ne permet pas de garantir l'unicité de la solution dès qu'une discontinuité est présente dans un domaine.

Le profil de la figure 1-4.e montre le changement de pente du déplacement sur une largeur de 15 pixels de part et d'autre de la position réelle de la fissure. Cette largeur totale d'environ 30 pixels est proche de la largeur du domaine de corrélation imposée à 40 pixels. Cette largeur serait plus grande si la largeur du domaine de corrélation imposée l'avait été. A contrario, si je souhaite réduire la largeur du changement de pente, il faut réduire la taille du domaine du domaine, mais cela entraîne une diminution de la résolution (i.e. précision + incertitudes de mesure). Pour synthétiser les forces, faiblesses, opportunités et menaces de la CIN classique, la matrice S.W.O.T du tableau 1-1 est présentée.

POSITIF	NEGATIF
Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - Disponible - Champs de déplacement et de déformation (DF) - localisation des 'grandes' fissures 	<ul style="list-style-type: none"> - Milieu continu - Si fissure : non unicité de la solution
Opportunités	Menaces
	<ul style="list-style-type: none"> - Cinématique des fissures - Détection des petites fissures.

tableau 1-1 : matrice S.W.O.T de la CIN classique.

L'orientation choisie pour augmenter la résolution spatiale (i.e. diminution de la taille du domaine de corrélation) sans détériorer significativement la résolution a été le développement de la CIN multi-échelle.

1.2.3 CIN Multi-échelle (2011-2015) [Act.15].

La CIN multi-échelle est basée sur les mêmes hypothèses (milieu continu) que la CIN classique mais au cours de la phase d'optimisation, une diminution progressive (4 au total) de la taille du domaine est imposée pour finir à des domaines de 8x8 pixels. Pour maintenir une résolution satisfaisante, les paramètres initiaux à minimiser correspondent aux valeurs finales obtenues à l'étape précédente. Les avantages de cette approche sont : (i) une facilité et une rapidité de programmation, (ii) une diminution peu significative de la résolution comparativement à la CIN classique avec un domaine de 8x8 pixels et (iii) une augmentation de la résolution spatiale (plus local). Les inconvénients sont une augmentation du temps de calcul et l'hypothèse de milieu continu qui perdure.

Sur le même jeu d'images, le champ de déplacement vertical obtenu par CIN multi-échelle (figure 1-5.b) montre clairement une image plus nette mais légèrement plus bruitée (hautes fréquences), comparée au champ obtenu par CIN classique qui paraît plus flou et moins bruité (figure 1-5.a).

La figure 1-5.b montre de nouvelles discontinuités des niveaux de gris (horizontales et verticales) qui n'avaient pas été observées avec la CIN classique et donc une fracturation supérieure au regard du champ de déplacement obtenu avec la CIN classique, alors que les états de référence et déformés sont identiques. Comparativement, la largeur du changement de pente au voisinage de la fissure est plus étroite et elle est liée à la diminution de la taille du domaine de corrélation.

Il est bien de rappeler que cet algorithme a été utilisé sur les images issues de l'étude en galerie car à cette époque, c'était le seul outil de mesure disponible, répondant à certaines questions scientifiques et montrant une amélioration significative par rapport à la CIN classique.

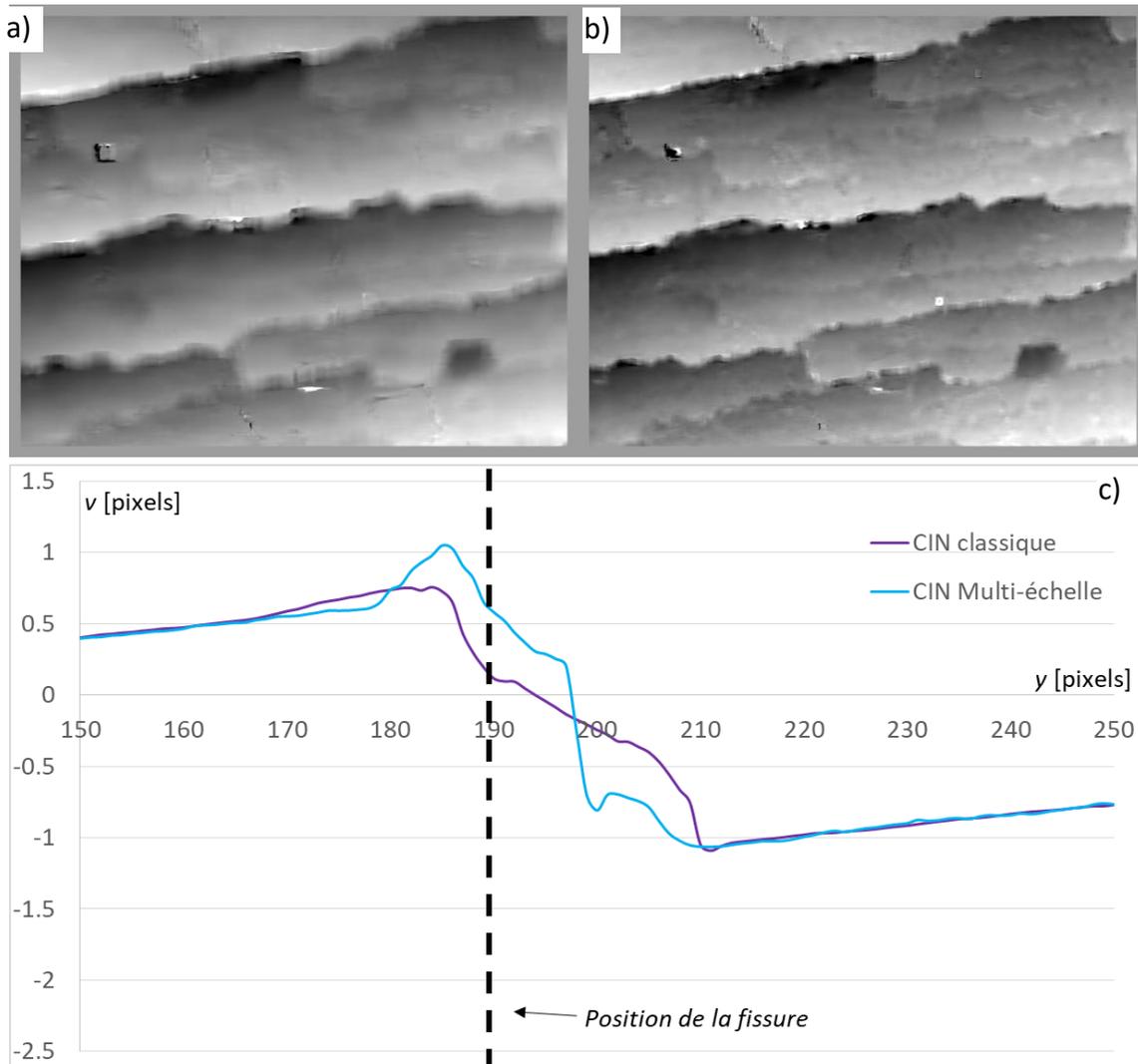


figure 1-5 : champs de déplacement vertical obtenu par CIN classique(a) et CIN multi-échelle (b), et (c) profils du déplacement vertical obtenus par CIN classique et CIN multi-échelle pour les coordonnées $x=200$ pixels et $150 < y < 250$ pixels. Le trait en pointillé noir correspond à la position réelle de la fissure.

Echelle de la galerie.

L'analyse des états déformés répartie sur une période d'un an a permis de visualiser des fissures (figure 1-6-a et figure 1-7-a) à partir des champs de déplacements obtenus par CIN multi-échelle. Ces fissures hydriques sont facilement localisables car elles se trouvent à chaque discontinuité de couleurs (figure 1-6 et figure 1-7). La mesure des ouvertures de fissures se fait par le développement interne d'un programme de traitement des données. Les principales difficultés, que j'ai rencontré, étaient la quantité de données due au nombre d'états déformés (4380 états par an) et les critères choisis pour différencier les fissures de

dessiccation et plus particulièrement les ‘petites’ fissures (i.e. faible ouverture) du bruit de mesure. Comme critères, je peux citer les pentes locales des trois champs de déformations (ε_{xx} , ε_{xy} , ε_{yy}), mais aussi une analyse visuelle pour les fissures de faible ouverture. Cette étape, longue et fastidieuse car non automatisée et résultant des analyses quantitatives et qualitatives des champs, a permis de différencier deux types de fissures de dessiccation :

- **Les fissures sub-horizontales** car proche d’une orientation parallèle à la stratification de la roche (figure 1-7.a),
- **Les fissures sub-verticales** car proche d’une orientation perpendiculaire à la stratification (figure 1-6.a).

La mesure des ouvertures moyennes a été calculée par soustraction des extrema du déplacement perpendiculaire aux fissures. Pour cela, les champs de déplacement ont été calculés dans un repère lié aux fissures sub-horizontales (x,y). L’angle entre ces deux repères était d’environ 10° (figure 1-1.c et figure 1-7.b).

L’analyse des fissures de la figure 1-8 montre :

- une fermeture des fissures de juillet 2011 à octobre 2011 (RH>80%) et une ouverture plus ou moins importante de novembre 2011 à juillet 2012 (RH<80%),
- des ouvertures maximales des fissures sub-horizontales et sub-verticales sont du même ordre de grandeur ($\approx 0,55\text{mm}$) et que leurs évolutions sont semblables,
- sur une période de deux ans, aucune ouverture résiduelle n’a été observée en période estivale, comme celle observé dans les travaux de Möri et al., 2010 [34] sur les argiles de Mont terri.

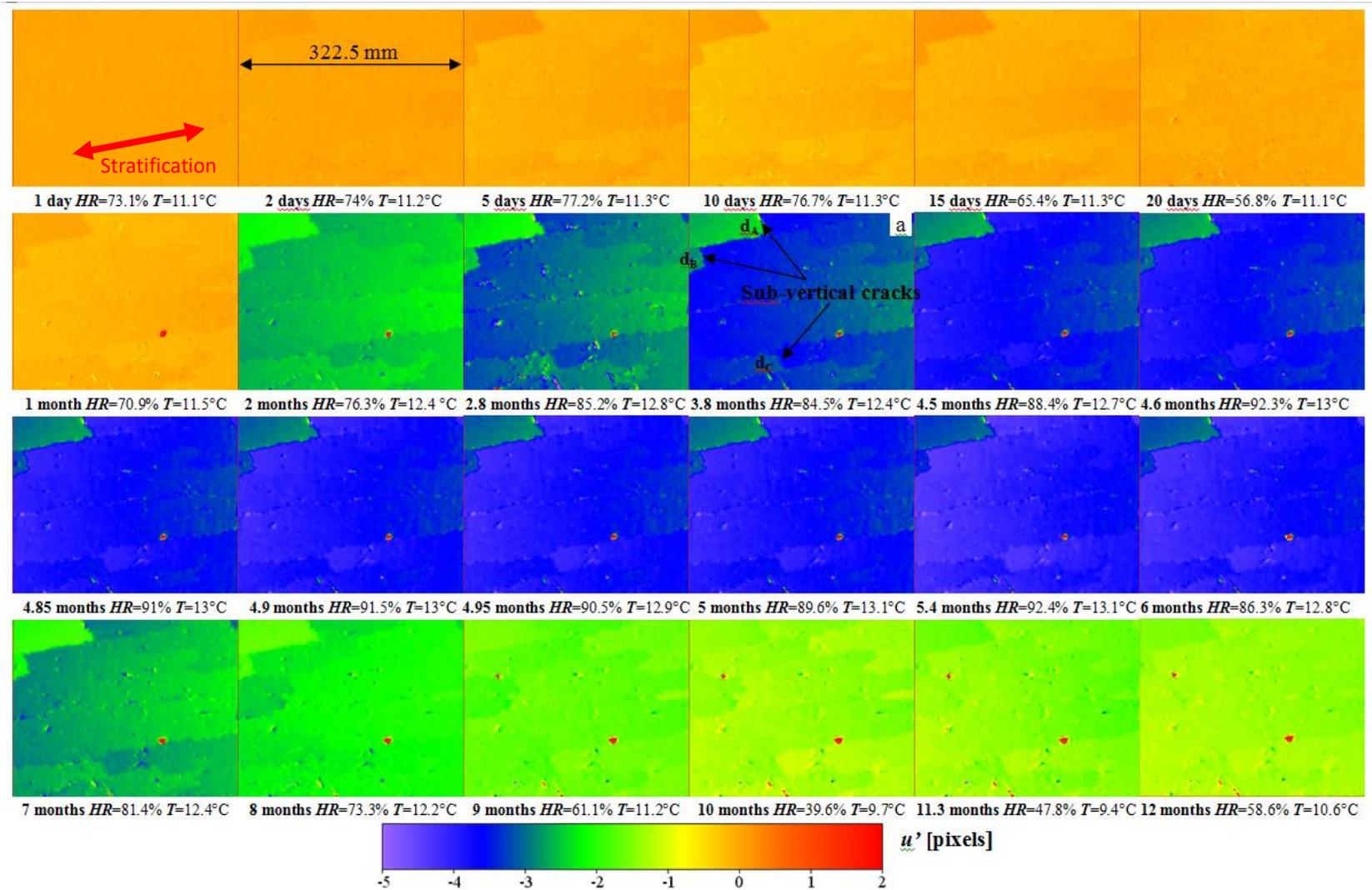


figure 1-6 : Champs u' liés au système de coordonnées de la caméra (x',y') pendant un cycle saisonnier. Le nombre de jours depuis le début de l'acquisition, HR et T sont indiqués sous les champs.

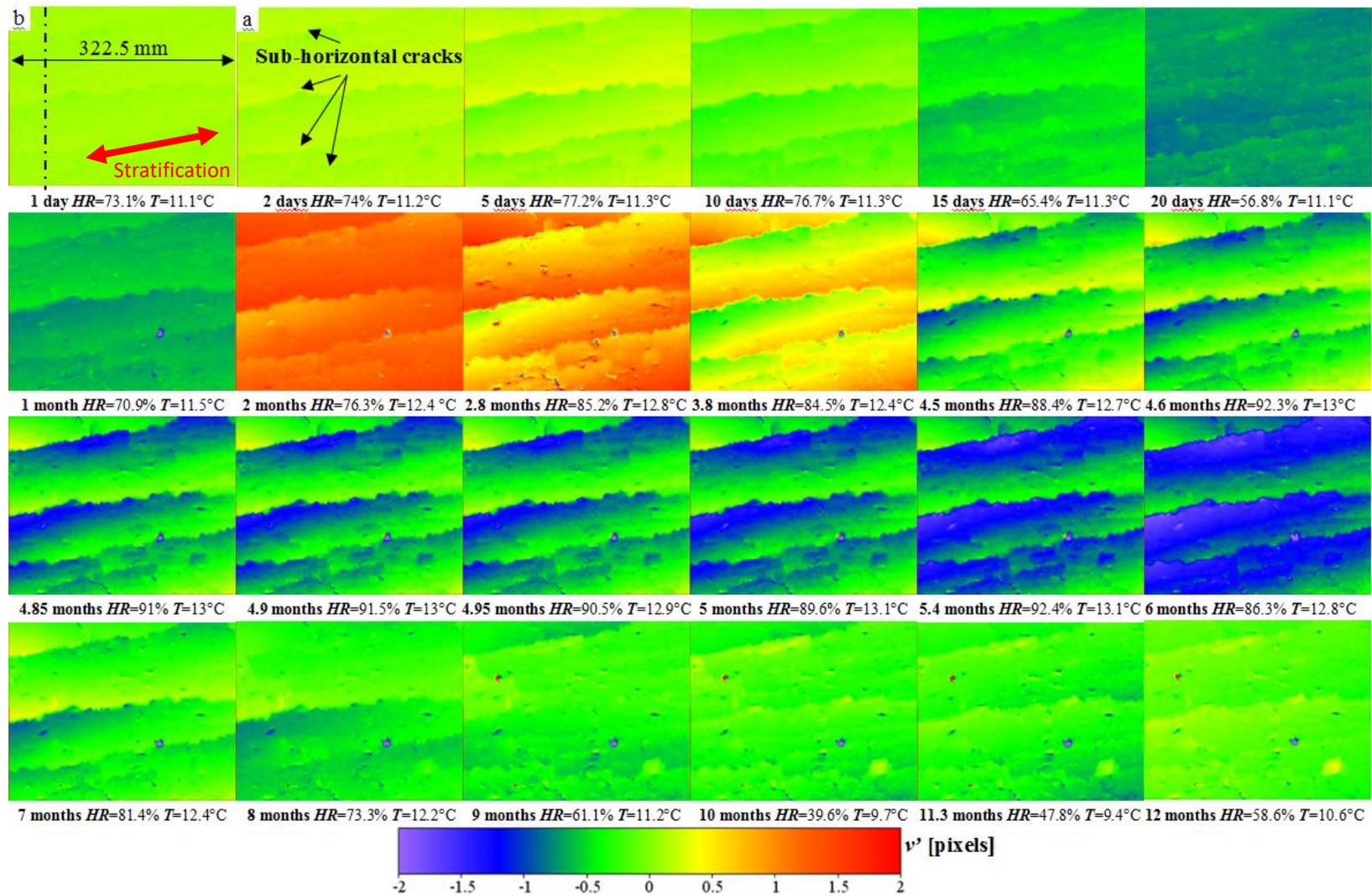


figure 1-7 : Champs v' liés au système de coordonnées de la caméra (x',y') pendant un cycle saisonnier. Le nombre de jours depuis le début de l'acquisition, HR et T sont indiqués sous les champs.

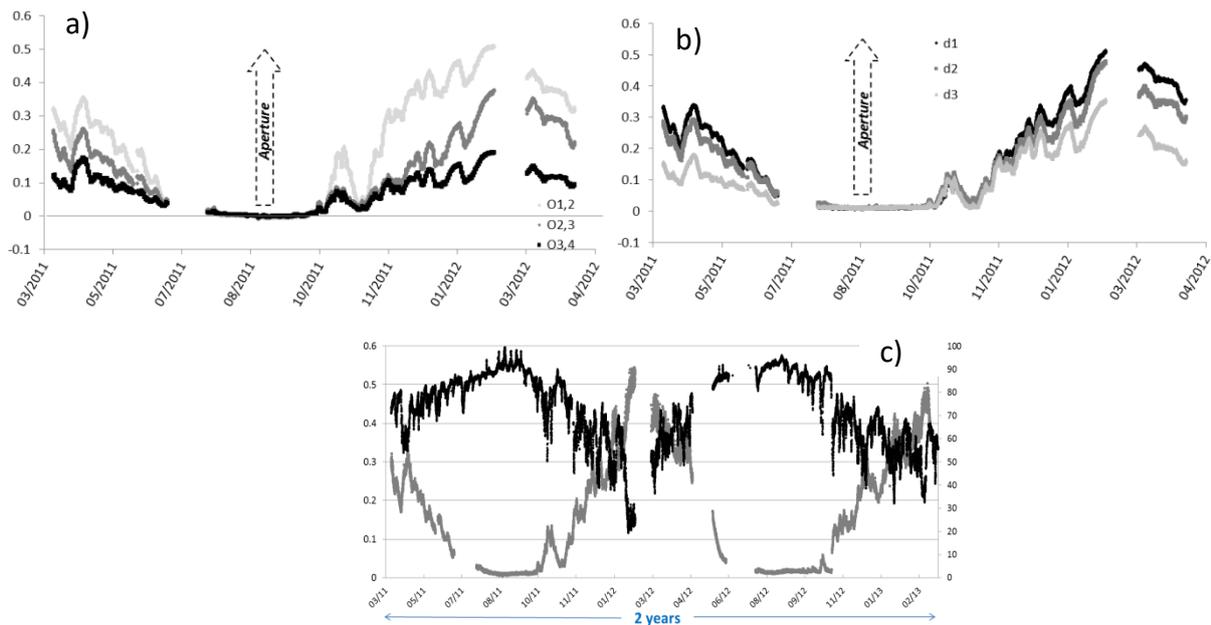


figure 1-8 : Evolutions de l'ouverture de trois fissures sub-horizontales(a) et de trois sub-verticales (b) sur une période d'un an. (c) Evolutions de l'ouverture d'une fissure sub-horizontale et de l'humidité relative (RH) sur une période de deux ans [Act.23].

Avantages et limitations de la CIN multi-échelle.

Les résultats obtenus sur cette période montrent clairement la présence de fissures de dessiccation mais leur nombre et leur position **ne sont pas détectés automatiquement**. Cela nécessite une analyse des champs (déplacements, déformations) par l'utilisateur et une certaine '*expérience*' afin de localiser les fissures. Cette étape a tendance à négliger les fissures de petites ouvertures. Les valeurs d'ouverture sont calculées par **soustraction des déplacements** de part et d'autre des discontinuités. Pour calculer l'ouverture, j'ai imposé une orientation moyenne des fissures sub-horizontales et les fissures sub-verticales par rapport au repère caméra. De plus, la CIN multi-échelle considère le milieu comme **continu** et donc les valeurs des déplacements, pris en compte pour le calcul d'ouverture sont situés à une distance minimale de l'ordre de 10 pixels, soit 2,69mm par rapport à la fissure. Cette distance entraîne une **sous-estimation de l'ouverture** (figure 1-9 et figure 1-5). De plus, si le **glissement** des lèvres des fissures est présent, il **n'est pas mesurable** avec cette version de CIN.

Pour lever l'ensemble de ces limitations et décrire plus précisément le milieu, de nombreuses discussions ont mené à la nécessité de développer un nouvel algorithme de CIN (H^k -DIC). Comme pour la CIN classique, la matrice S.W.O.T du tableau 1-2 synthétise les forces, faiblesses, opportunités et menaces de la CIN multi-échelle.

Avant de présenter l'exploitation des résultats sur mes études expérimentales, il me paraît nécessaire de rappeler l'originalité de cet algorithme de corrélation adapté au milieu discontinu.

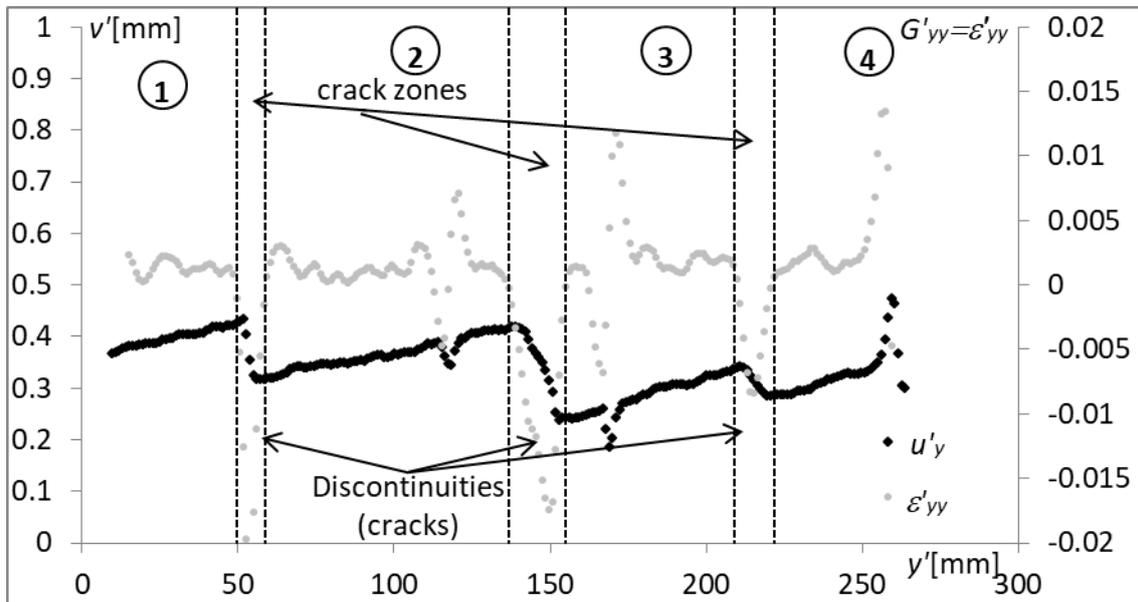


figure 1-9 : Profil du déplacement vertical v' et du gradient de déplacement $G'_{yy}=\epsilon'_{yy}$ à l'instant t (2011/05/31 14h47min17s GMT) obtenu avec la CIN multi-échelle.

POSITIF	NEGATIF
Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> -Facilement programmable - Résolution spatiale ↗ - Champs de déplacement et de déformation (DF) - Visualisation de fissures ↗ 	<ul style="list-style-type: none"> - Milieu continu - Si fissure : non unicité de la solution - Glissement des fissures
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - Ouverture des fissures par soustraction des déplacements 	<ul style="list-style-type: none"> - Résolution ↘

tableau 1-2 : matrice S.W.O.T de la CIN multi-échelle.

1.2.4 Heaviside-based DIC H^k -DIC (depuis 2015) [Act.14] [Act.2].

Les méthodes CIN prenant en compte une discontinuité dans leur formalisme et citées précédemment [24–26] ont inspiré la Heaviside-based DIC (H^k -DIC). Cette dernière correspond à une extension de la CIN classique, enrichie de termes adaptés à la prise en compte de k discontinuités ($k=1,2$).

Le point fort de cette méthode est l'absence de contraintes ou d'hypothèses sur :

- La localisation de la pointe de fissure,
- L'orientation de la fissure, et
- La cinématique (ouverture et glissement) des lèvres de la fissure

La seule hypothèse est finalement le caractère linéaire de la fissure dans le domaine de corrélation.

La transformation cinématique (équation 1-2) est enrichie de $4.k$ variables par rapport à la CIN classique et s'écrit de la façon suivante :

$$\underline{X}^* = \underbrace{\underline{X} + \underline{U} + \frac{\partial U}{\partial X} (\underline{X} - X_0)}_{\text{CIN classique}} + \underbrace{\sum_k \underline{U}'^k \times H^k (\underline{X} - X_0)}_{\text{enrichissement}} \quad \text{équation 1-2}$$

où \underline{X} sont les coordonnées du point de l'image initiale, \underline{U} le vecteur de déplacement, $\frac{\partial U}{\partial X}$ le tenseur gradient, X_0 le centre du domaine, $(\underline{U}'^k = (u_H^k, v_H^k))$ le vecteur de saut de discontinuité et $H^k(x, y)$ les fonctions 2D d'Heaviside (équation 1-3).

Pour déterminer plus précisément les déplacements en présence de fissures, les champs cinématiques sont enrichis des fonctions 2D d'Heaviside ($H^k(x, y) = \{0; 1\}$) et d'un vecteur saut de discontinuité (ou saut de déplacement) (\underline{U}'^k). Ces champs cinématiques sont définis pour tenir compte des sauts de déplacements induits par une discontinuité ($k=1$) ou deux discontinuités ($k=2$) et ceux pour chaque domaine. Les deux discontinuités peuvent être dues à un branchement de fissure ou à l'intersection de deux fissures. Dans la suite du manuscrit, j'utiliserai l'expression de « termes d'Heaviside » pour définir l'enrichissement.

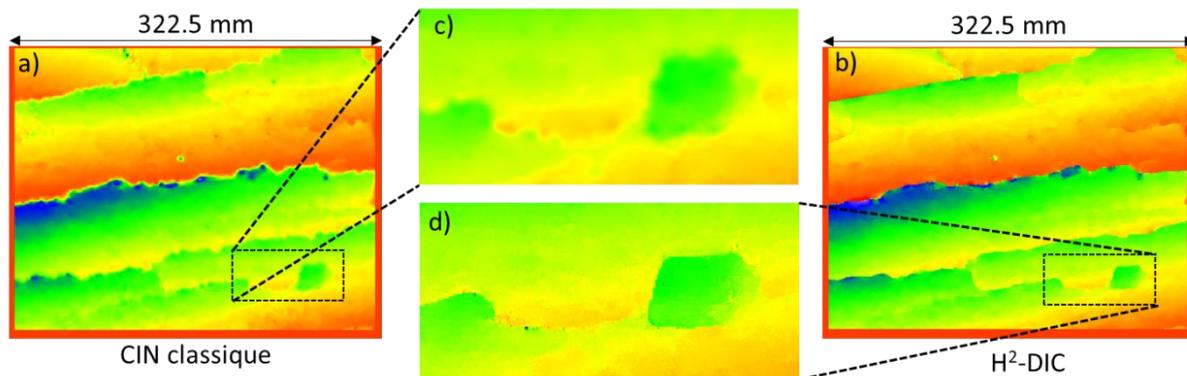


figure 1-10 : Champ de déplacement vertical v obtenu par CIN classique (a), H²-DIC (b) ; (c) et (d) zooms sur une même zone.

Les champs de déplacement vertical v obtenus par CIN classique (figure 1-10.a) et H²-DIC (figure 1-10.b), et pour les mêmes images de référence et déformée montrent clairement le gain (i.e. netteté) (figure 1-10c,d) sur la localisation des fissures avec H²-DIC et sur l'intersection de fissures. Dans la suite du manuscrit, je n'utiliserai que la configuration $k=1$, c'est-à-dire que je considérerai qu'une seule fissure est présente dans chaque domaine.

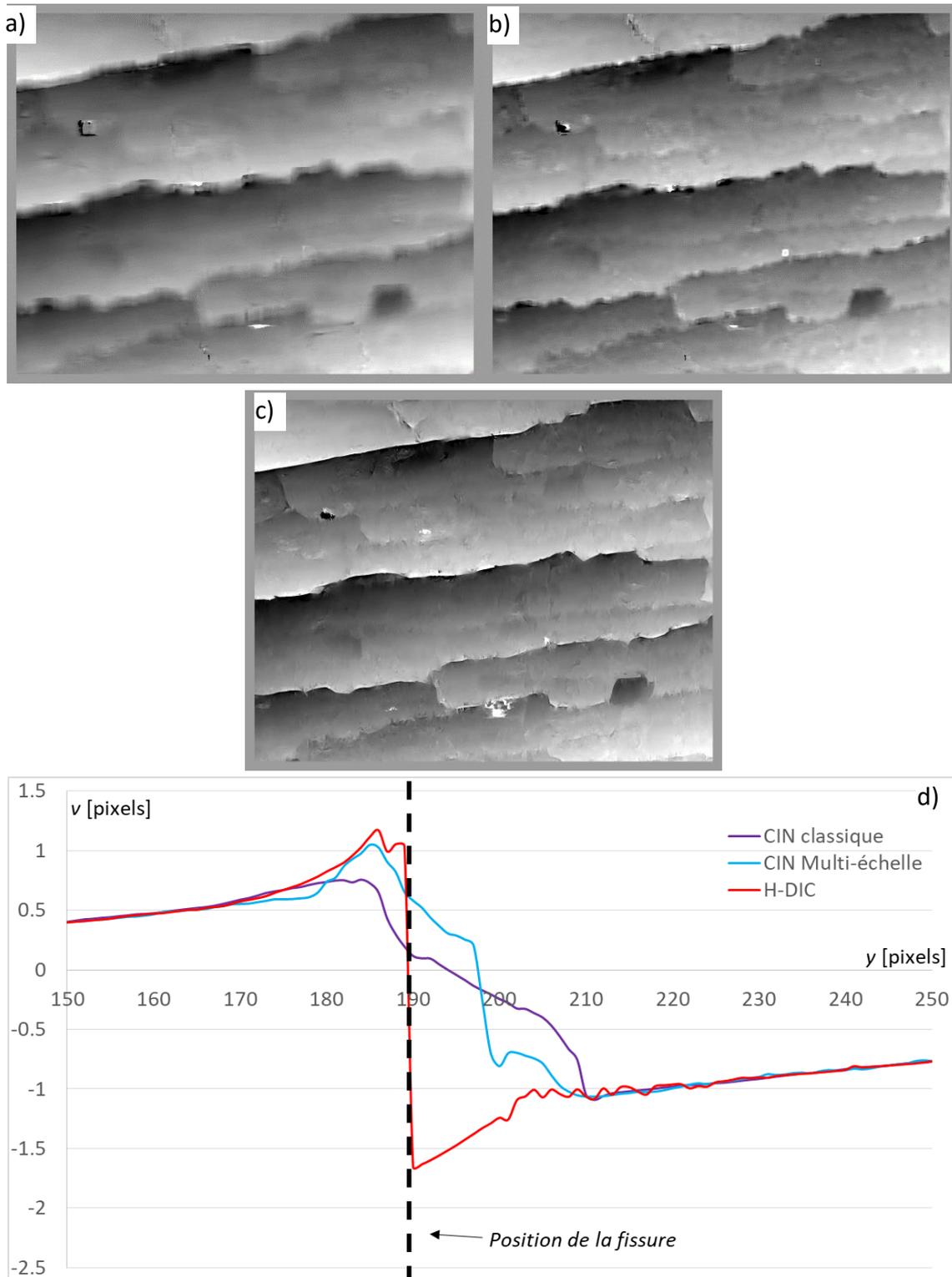


figure 1-11 : champs de déplacement vertical obtenu par CIN classique(a), CIN multi-échelle (b) et (c) H-DIC, profils du déplacement vertical obtenus par CIN classique, CIN multi-échelle et H-DIC pour les coordonnées $x=200$ pixels et $150 < y < 250$ pixels. Le trait en pointillé noir correspond à la position réelle de la fissure.

A titre de comparaison, des profils de déplacement v pour la CIN classique, la CIN multi-échelle et la H-DIC sont superposés sur la figure 1-11.d. Avec la H-DIC, la fissure est localisée au pixel près et l'ouverture est approximativement égale au saut de déplacement en $y=190$ pixels. La largeur du changement de pente est d'un pixel et le saut est supérieur aux deux autres méthodes. Ceci confirme les performances de la H-DIC lorsque l'on cherche à étudier spécifiquement les fissures. Ces mêmes profils confirment aussi que loin des discontinuités, les trois méthodes donnent des résultats identiques montrant que la H-DIC est aussi performante lorsque la zone d'étude n'intercepte pas de fissure.

En plus d'obtenir des champs de déplacements et de déformations, les avantages de ce nouvel algorithme résident dans l'obtention automatique, de données essentielles pour l'étude du comportement des fissures, c'est-à-dire l'ouverture $o(x,y)$ (équation 1-5), le glissement $s(x,y)$ (équation 1-6), ainsi que l'orientation de la fissure $\theta_H(x,y)$ et le mode de fracture $\alpha(x,y)$ (équation 1-7).

Pour illustrer ces avancés, la figure 1-12, l'équation 1-3 et l'équation 1-4 montrent la description de la fonction 2D d'Heaviside pour un domaine. Pour assurer une mesure correcte de l'orientation de la fissure, la droite représentant la fissure a été définie par ses coordonnées polaires et peut être décrite par la figure 1-12.

$$H(x, y) = H(x \cos(\theta_H(x, y)) + y \sin(\theta_H(x, y)) - r_H(x, y)) \quad \text{équation 1-3}$$

$$\text{avec } H(x, y) = 0 \text{ si } r > r_H$$

$$\text{et } H(x, y) = 1 \text{ si } r \leq r_H \quad \text{équation 1-4}$$

où r_H et θ_H définissent la position et l'orientation de la discontinuité dans le domaine (x, y) .

Tous les domaines sont enrichis et u_H et v_H tendent vers zéro lorsqu'aucune discontinuité n'est présente. Contrairement à la CIN classique qui ne peut garantir l'unicité de la solution lorsqu'une discontinuité est présente dans le domaine, cet algorithme donne une solution globale et unique pour chaque domaine. A partir de θ_H , u_H et v_H , les valeurs de o et s correspondant à l'ouverture et au glissement aux bords de la discontinuité sont calculées pour chaque domaine (équations 1-5, 1-6). L'angle α définit l'angle entre la droite matérialisant la discontinuité géométrique dans le domaine et la norme du saut de déplacement (n) (équation 1-7). Cet angle correspond au mode de fracturation dominant entre les modes d'ouverture et de glissement (figure 1-12).

Les erreurs de mesure des déplacements entre la H-DIC et la DIC classique sont très proches de 0,01 pixel lorsque le milieu est continu [Act.14]. Pour un champ discontinu, un gain significatif de l'erreur de mesure des déplacements est observé lorsque les domaines interceptent la discontinuité car la H-DIC conserve une valeur proche de 0,01 pixel, alors que dans le même temps la valeur atteint 0,2 pixel avec la CIN classique [Act.14].

Avantages et limitations de la H^k -DIC.

Nouvelle approche pour mesurer l'ouverture locale et le glissement local des fissures [Act.2].

Cette nouvelle approche consiste à exploiter les champs (u_H, v_H) de la H-DIC. Au préalable, nous avons quantifié les incertitudes de mesure sur l'ouverture et le glissement sur des images simulées mais en se focalisant sur les champs d'ouverture (o) (équation 1-5) et de glissement (s) (équation 1-6). Pour cela, des translations sub-pixels (translations 1 et 2) ont été appliquées pour générer des mouvements au bord des lèvres variant entre 0 et 2 pixels (figure 1-13) [Act.2].

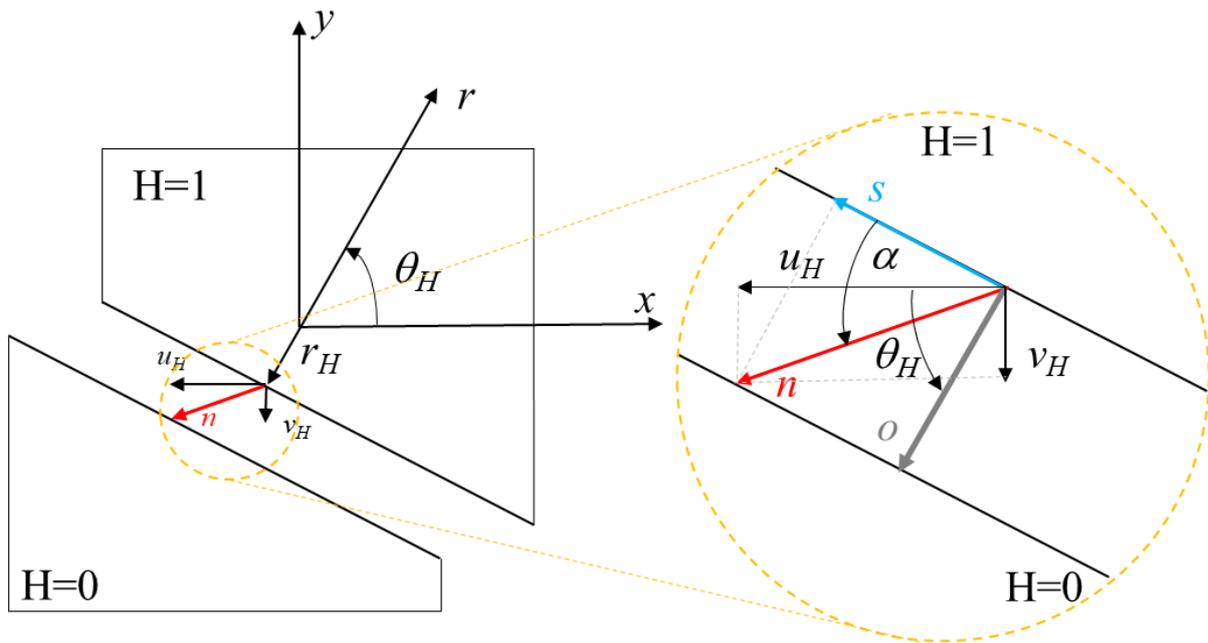


figure 1-12 : Description de la fonction 2D d'Heaviside dans le repère du domaine (adapté de Valle et al, 2015 [Act.14]). Zoom sur les bords de la discontinuité pour visualiser toutes les composantes de déplacement (u_H, v_H, o, s, n) , ainsi que les angles α et θ_H .

$$o = n \cdot \sin(\alpha) \quad \text{équation 1-5}$$

$$s = n \cdot \cos(\alpha) \quad \text{équation 1-6}$$

$$\alpha = \operatorname{atan2}\left(\frac{v_H}{u_H}\right) - \left(\theta_H - \frac{\pi}{2}\right) \quad \text{équation 1-7}$$

avec $n = \sqrt{u_H^2 + v_H^2}$.

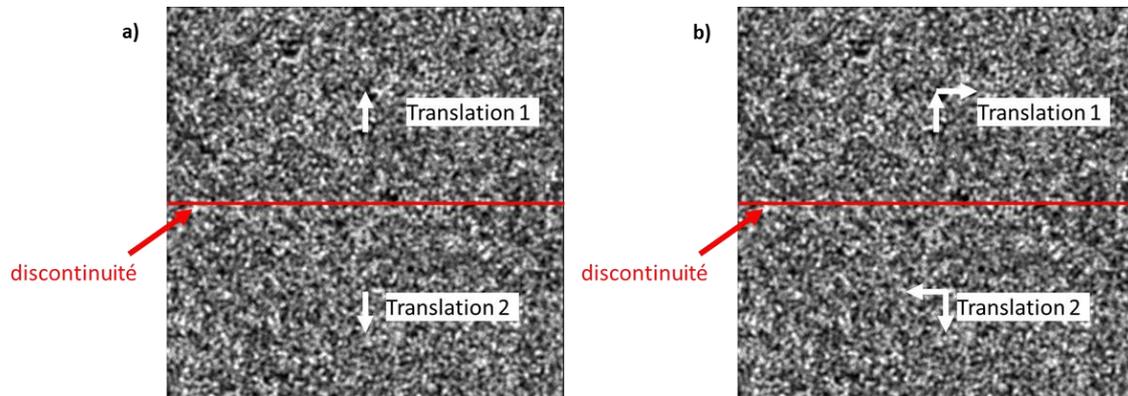


figure 1-13 : Images simulées représentant une discontinuité en mode d'ouverture (a) et en mode mixte (b).

A partir des champs o , s et α , l'erreur moyenne et l'écart-type ont été calculés dans le cas d'un mode d'ouverture, d'un mode de cisaillement et d'un mode mixte. La figure 1-14 confirme que la H-DIC permet de mesurer localement et automatiquement l'ouverture, le glissement d'une discontinuité et ceux malgré des mouvements sub-pixel. La résolution est de l'ordre de 0,14 pixel dans le cas d'une discontinuité soumis à un mode mixte. En mode I, cette incertitude est légèrement inférieure et atteint 0,12 pixel. En mode de glissement la valeur est nettement inférieure et atteint la valeur de 0,051 pixel. Contrairement au mode d'ouverture qui crée une zone 'noire' due à l'écartement des bords de la fissure, en mode de glissement ce phénomène n'apparaît pas et donc les erreurs sont dans ce cas, seulement liées à la qualité du mouchetis, au degré du polynôme pour l'interpolation des niveaux de gris et à l'algorithme d'optimisation. Les erreurs de mesure des composantes (o,s) sont de l'ordre 0,14 pixel et sur les composantes (u,v) de l'ordre de 0,05 pixel.

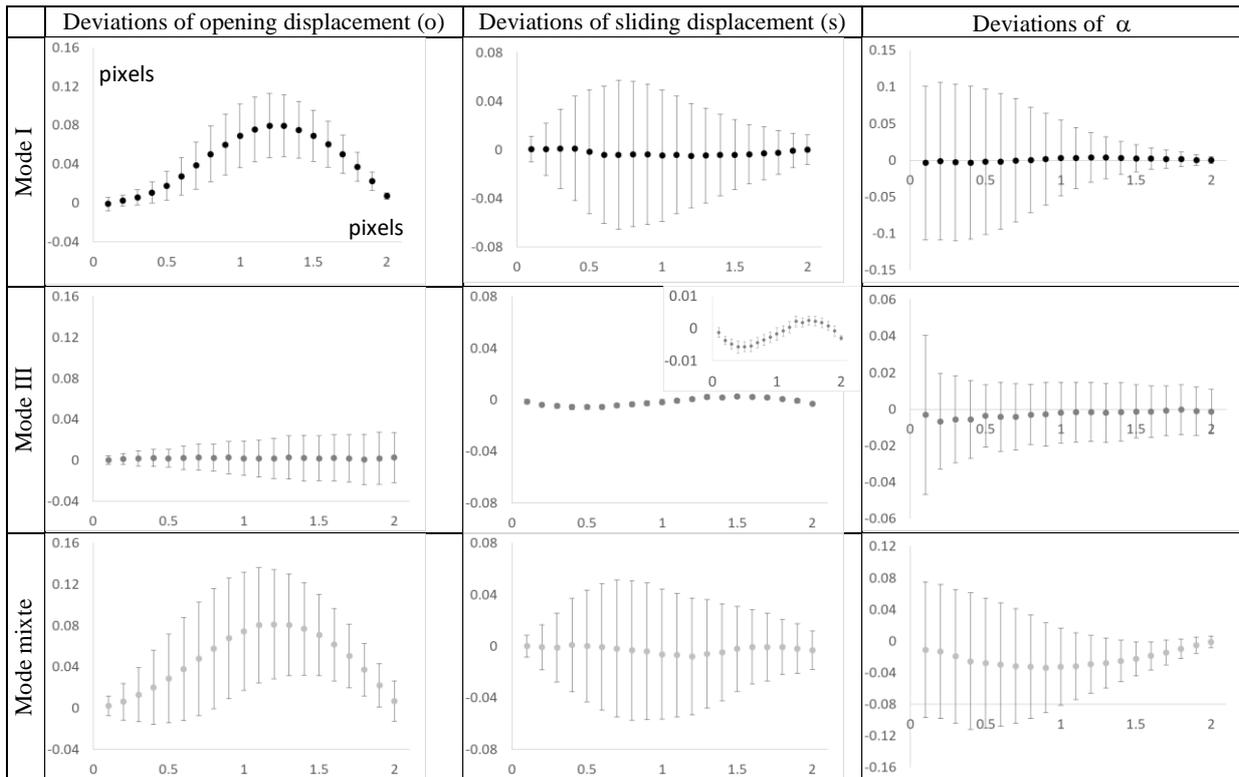


figure 1-14 : Erreurs et écarts-types des composantes o , s et α pour des translations de discontinuité sub-pixels représentant un mode d'ouverture (mode I), un mode de cisaillement (mode III) et un mode mixte.

Contrairement aux travaux de la littérature, les déplacements des lèvres de 1 pixel de la figure 1-14 correspondent à un déplacement 0,5 pixel de chaque bord de la fissure sur l'image finale. En conséquence, pour retrouver des erreurs proches de zéro, il faut que l'ouverture de la fissure soit de 2 pixels.

Outre les avantages cités précédemment et portant sur la localisation au pixel près des fissures et sur une précision sub-pixel de la cinématique des fissures, H-DIC permet d'ajouter aux champs de déplacements (u,v) (figure 1-11.c) et des petites déformations $(\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yy})$ obtenus par différences finies (DF) [22], quatre nouveaux champs appelés (figure 1-15) :

- o exprimant le déplacement local perpendiculaire aux lèvres des fissures, on parlera aussi d'ouverture de fissure ou de mode I,
- s exprimant le déplacement local tangent aux lèvres des fissures, on utilisera le terme de cisaillement ou de glissement (mode II ou III en mécanique de la rupture),
- $\alpha (= \tan^{-1}(o/s))$ exprimant l'angle entre la norme n du déplacement des lèvres et la droite matérialisant la fissure dans le domaine de corrélation,

- θ_H exprimant l'angle de la droite matérialisant la fissure dans le repère (x,y) du domaine.

α est un indicateur du mode principal de fracturation (mode I, II ou mixte) (figure 1-12). En effet si $\alpha=\pi/2$, le mode de fracturation correspond à un mode I ou mode d'ouverture. Si $\alpha=0$ ou π , on parlera de mode de cisaillement pur ou de mode II ou de mode III. Lorsque $0<\alpha<\pi/2$ ou $\pi/2<\alpha<\pi$, le terme de mode mixte est utilisé avec :

- une dominance du mode d'ouverture, si $\frac{\pi}{4} < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ou $\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{3\pi}{4}$,
- une dominance du mode de glissement, si $0 < \alpha < \frac{\pi}{4}$ ou $\frac{3\pi}{4} < \alpha < \pi$.

Pour rappel, l'étude de sensibilité sur des images simulées et pour une cinématique sub-pixel de fissure a permis d'obtenir des erreurs de mesure de 0,14 pixel [Act.2]. Cette valeur est choisie comme le seuil de détection des fissures. L'analyse et l'interprétation de ces nouveaux champs (figure 1-15 et figure 1-16) seront détaillées dans le chapitre §1.3, ainsi que ceux issus des essais en laboratoire.

Echelle de la galerie.

La figure 1-15 montre clairement la présence de fissures de dessiccation sub-horizontales et sub-verticales.

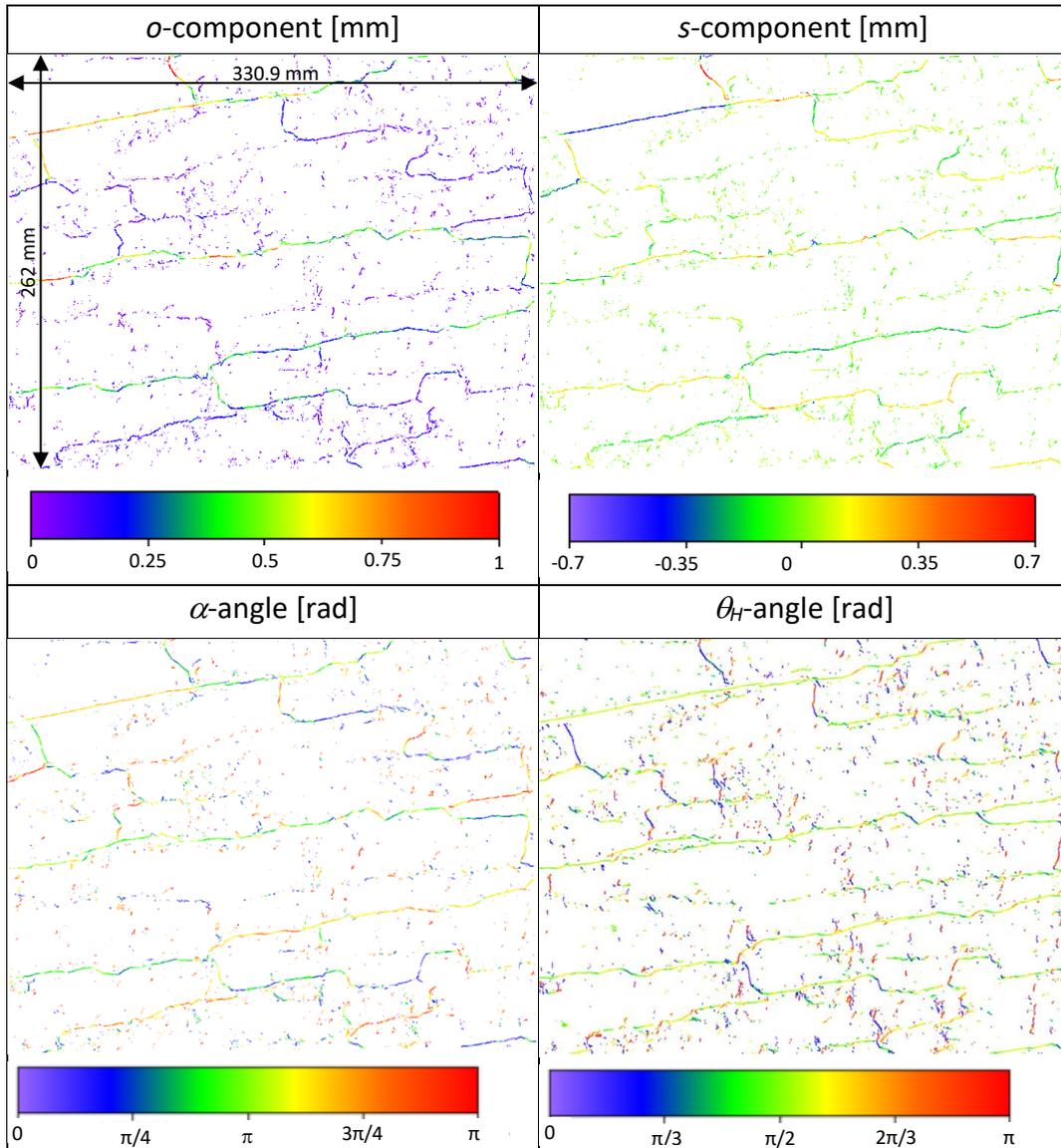


figure 1-15 : champs des composantes o et s et des angles α et θ obtenus sur un front de galerie de la station expérimentale de Tournemire. Etat proche d'un état extrême ($\Delta RH=73.71\%$, $\Delta T=7.22^\circ C$).

Echelles macroscopique et mésoscopique

La figure 1-16 montre clairement la présence de fissures de dessiccation sub-horizontales et sub-verticales. Hormis les dimensions de la région d'intérêt et l'amplitude des déplacements, les champs à l'échelle macroscopique ressemblent qualitativement aux champs obtenus à l'échelle de la galerie (figure 1-6 et figure 1-7) avec la présence de discontinuités de couleurs parallèles et perpendiculaires à la stratification. On peut parler d'« homothétie » des champs. Toutefois, le glissement des fissures (s) de dessiccation (figure

1-17) semble moins présent ici qu'à l'échelle de la galerie. Ceci peut s'expliquer par des conditions aux limites différentes sur les ROIs.

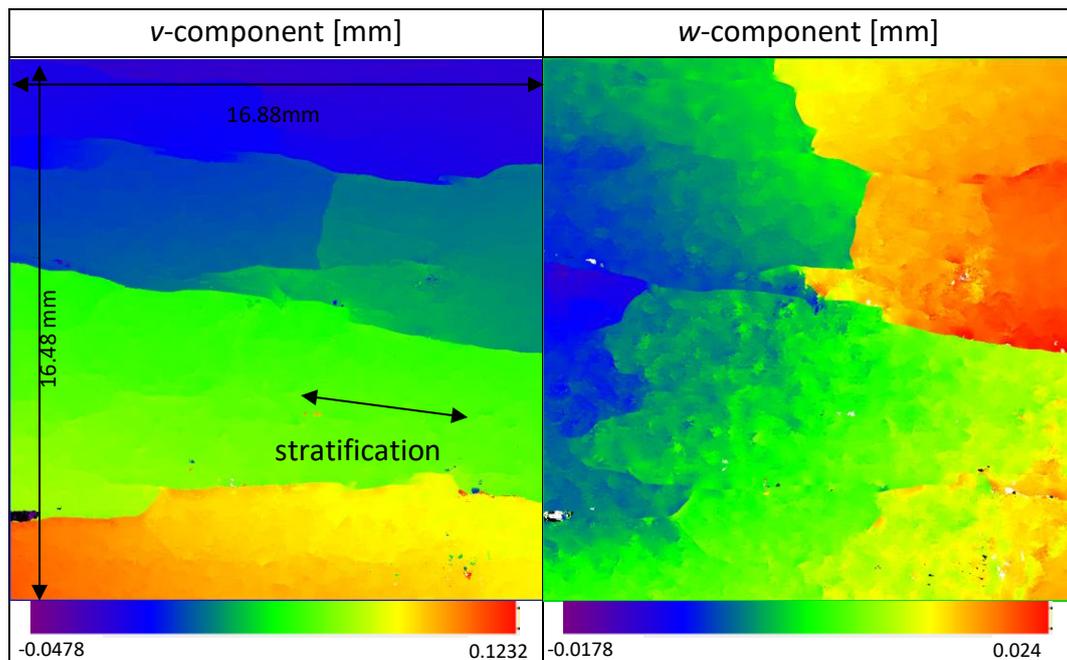


figure 1-16 : champs des déplacements v,w obtenus à l'échelle macroscopique ($\Delta RH=65\%$).

Comme à l'échelle de la galerie, l'analyse des champs (figure 1-17) montre des fissures sub-horizontales traversant la ROI et ayant des longueurs supérieures aux fissures sub-verticales.

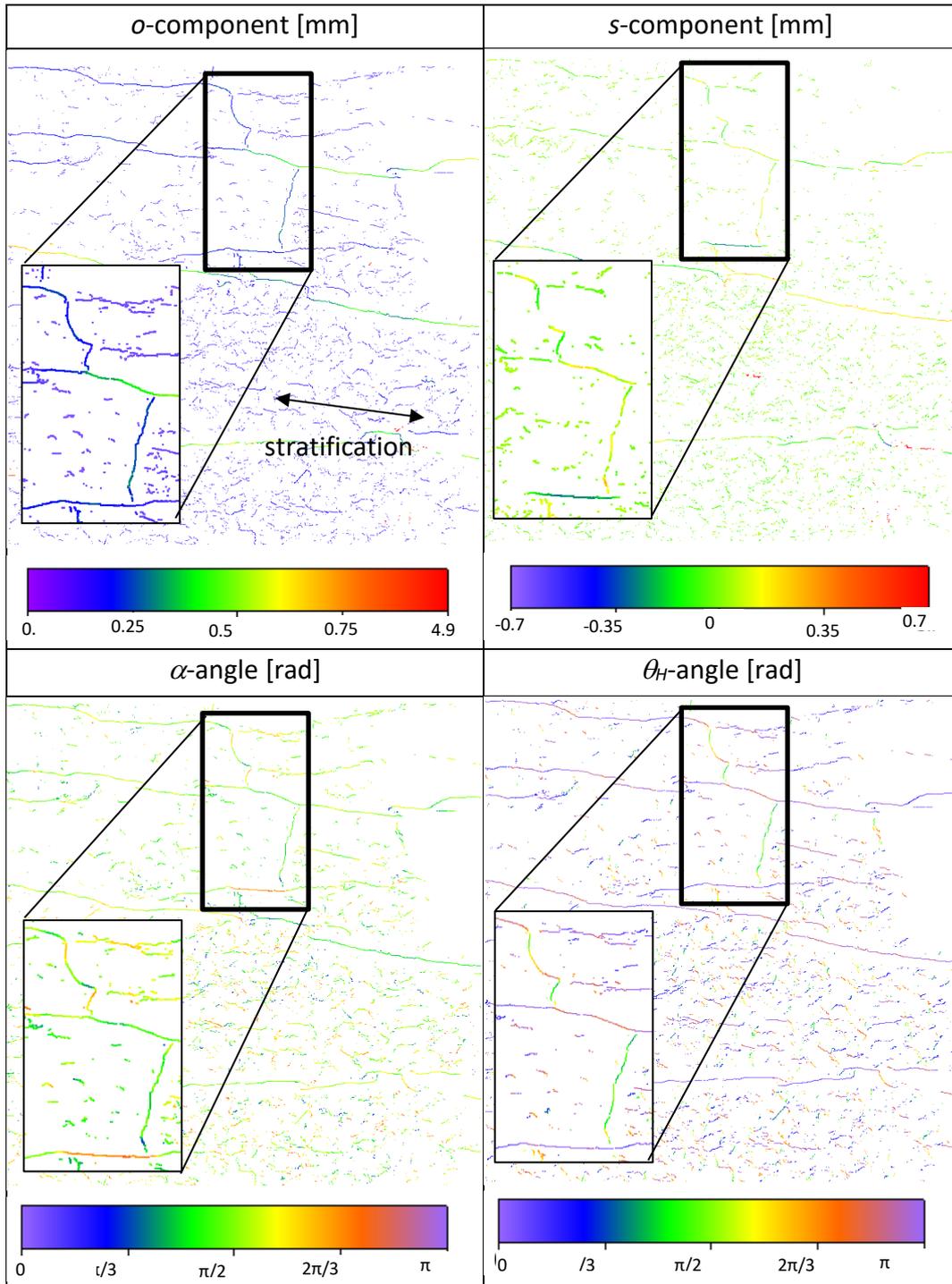


figure 1-17 : champs des composantes o et s et des angles α et θ obtenus à l'échelle macroscopique ($\Delta RH=65\%$)

A l'échelle mésoscopique, les champs de la figure 1-18 et la figure 1-19 semblent montrer la présence de trois fissures sub-horizontales et aucune fissure sub-verticale. Ceci montre clairement un changement de comportement et une densité de fissures moins importante que celle observée aux échelles de la galerie et macroscopique. L'ouverture

maximale de ces fissures est d'environ $6\mu\text{m}$ et le glissement de l'ordre de $3\mu\text{m}$ (figure 1-19). Le bruit de mesure est plus important car la surface d'étude a subi un polissage spécifiquement développé dans le cadre de cette étude et adapté pour la cartographie au microscope électronique à balayage (MEB). Cela se fait au détriment de l'incertitude de mesure des déplacements. Lors de la phase de désaturation, des modifications locales du mouchetis (perte de grains, réarrangement des grains, changement de niveaux de gris de la phase argileuse, ...) sont apparues entraînant aussi une diminution de la précision de mesure. Ceci se traduit par une détection difficile des petites fissures qui apparaissent discontinues et disséminées sur les champs.

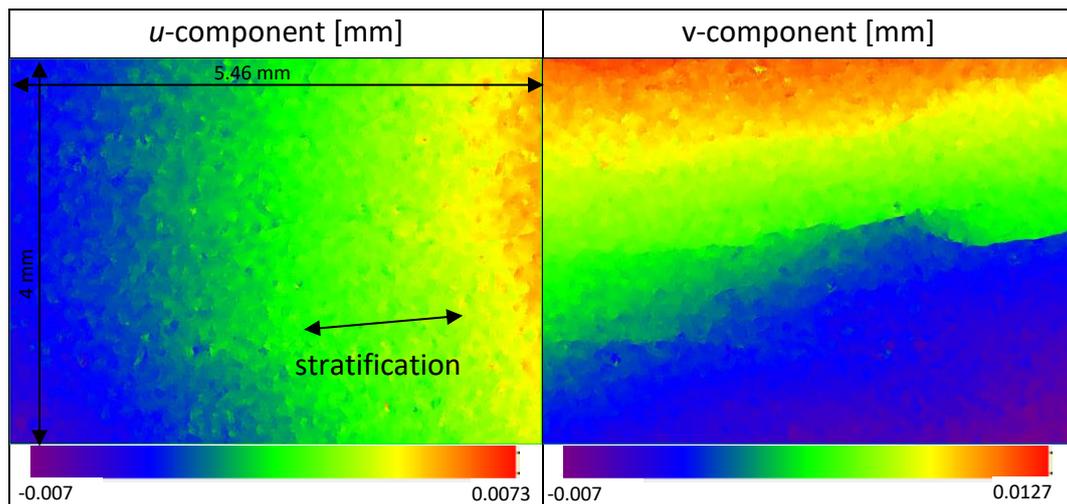


figure 1-18 : champs des déplacements u,v obtenus à l'échelle mésoscopique ($\Delta\text{RH}=65\%$).

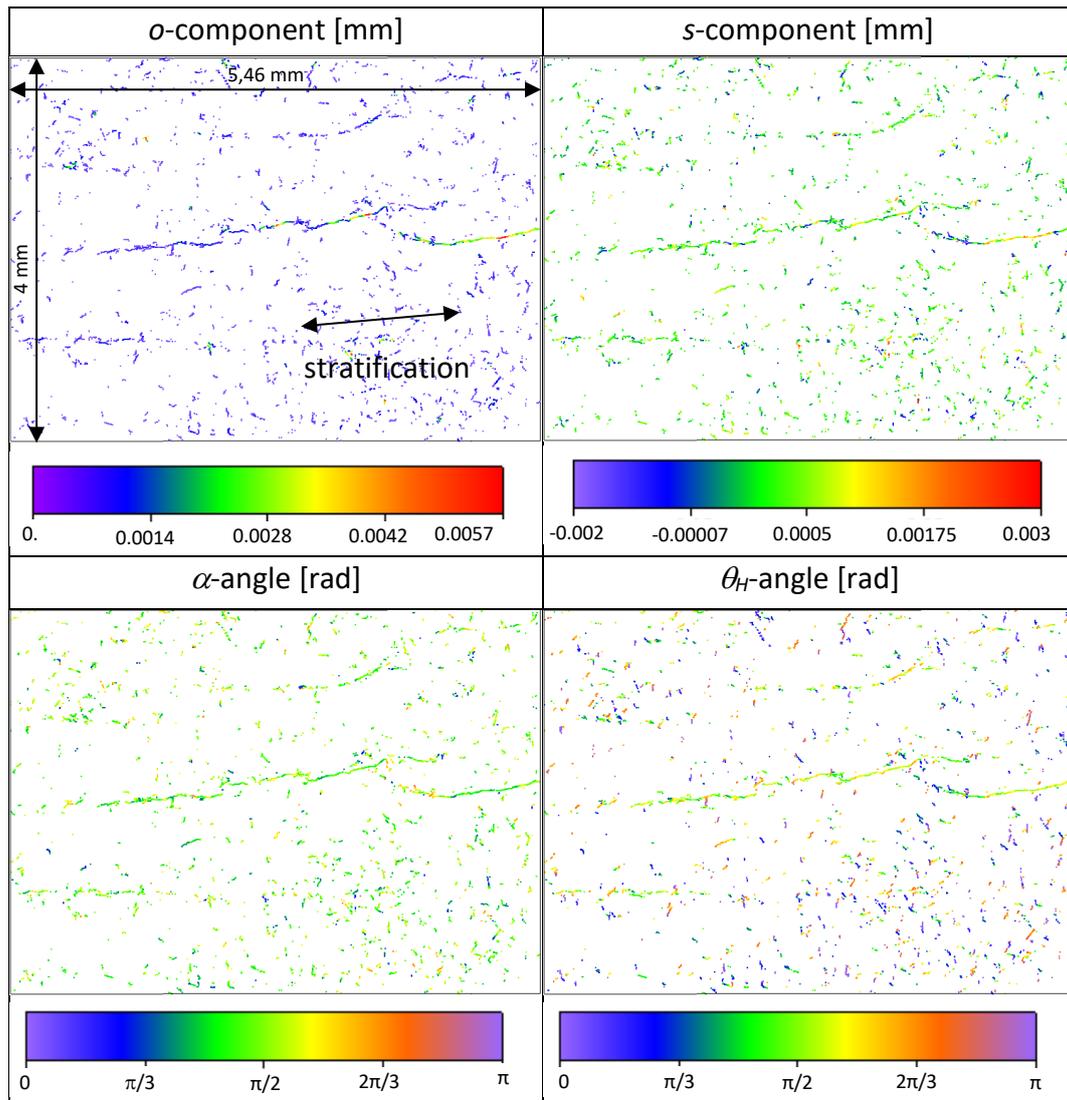


figure 1-19 : champs des composantes o et s et des angles α et θ obtenus à l'échelle mésoscopique ($\Delta RH=65\%$).

Les seuls inconvénients sont le temps de calcul qui auraient pu s'accroître de façon importante du fait de cet enrichissement mais qui ont été maintenus à des temps raisonnables car le code a été parallélisé sous CUDA, et l'ajout de cet enrichissement, correspondant à l'ajout de hautes fréquences, ne permet plus d'utiliser la dérivation des champs de déplacements pour quantifier les déformations. Dans la section suivante et sur un essai simulé, nous avons choisi une nouvelle approche pour mesurer les déformations à partir des champs obtenus par la H-DIC et nous l'avons comparé aux autres méthodes.

Nouvelle approche pour mesurer les déformations [Act.3].

Dans la littérature, peu de travaux se sont intéressés à la véracité des valeurs des déformations calculées proche des fissures par CIN. En effet dans ces zones, le milieu est discontinu et l'utilisation de la CIN classique se trouve mise en défaut. Les valeurs des déplacements sont erronées, ainsi que celles des déformations obtenues par différences finies (FD) [22]. L'approche choisie avec la H-DIC revient à ajouter des sauts (u_H^k, v_H^k) à la mesure des déplacements. Ceci a pour conséquence une bonne localisation de la fissure et une bonne évaluation de l'ouverture et du glissement de la fissure, mais cet ajout correspondant à une haute fréquence se fait au détriment du calcul de déformations par différences finies (DF). Cette partie analyse les résultats des déformations sur un cas simulé. Pour cela, une image déformée (400x400 pixels) caractérise un déplacement horizontal sinusoïdal. Suivant la direction verticale, une ouverture de fissure de 2 pixels a été imposée en $x = 200$ pixels. La figure 1-20 montre l'évolution sinusoïdale du déplacement, ainsi que l'ouverture de 2 pixels suivant un profil horizontal.

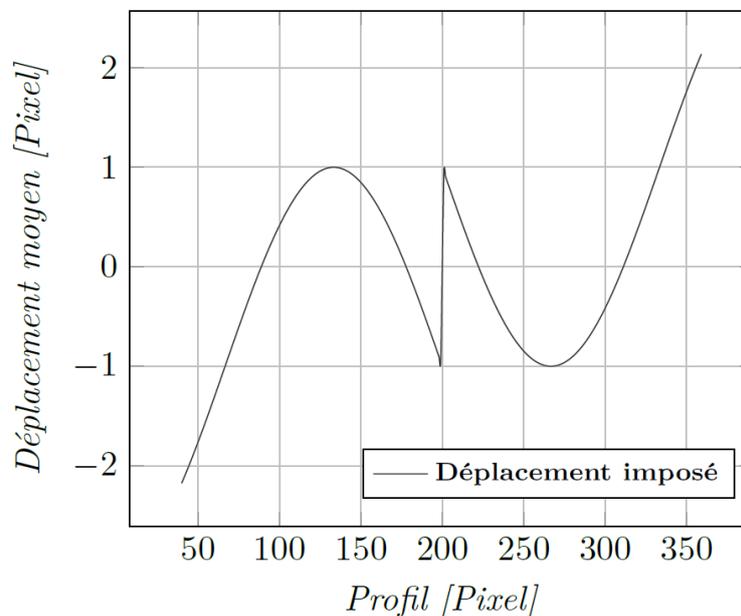


figure 1-20 : Déplacement imposé et ouverture selon un profil horizontal de l'image (400 x 400 pixels). Extrait de [35].

Les différentes méthodes pour mesurer les déformations sont :

- CIN classique par dérivation des champs de déplacements (DF), appelée CIN classique (DF) ou DIC DF,
- H-DIC par dérivation des champs de déplacements (DF), appelée H-DIC DF, et
- H-DIC et utilisation des gradients locaux d'H-DIC ($\frac{\partial U}{\partial X}$), appelée H-DIC($\frac{\partial U}{\partial X}$).

La déformation équivalente (ε_{eq}) a été calculée en utilisant le critère de Tresca [36,37] :

$$\varepsilon_{eq} = \frac{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|}{2} \quad \text{équation 1-8}$$

où ε_1 et ε_2 sont les déformations principales calculées à partir de la dérivation des champs de déplacement (DF) ou des gradients locaux d'H-DIC ($\frac{\partial U}{\partial X}$).

A partir des différentes méthodes (CIN classique (DF), la H-DIC (DF) et la H-DIC ($\frac{\partial U}{\partial X}$)) de déformation équivalente (ε_{eq}), les biais moyens (ou déformation biais) et les écarts-types ont été calculés, selon la direction horizontale, en moyennant les valeurs obtenues suivant la direction parallèle à la discontinuité (figure 1-21).

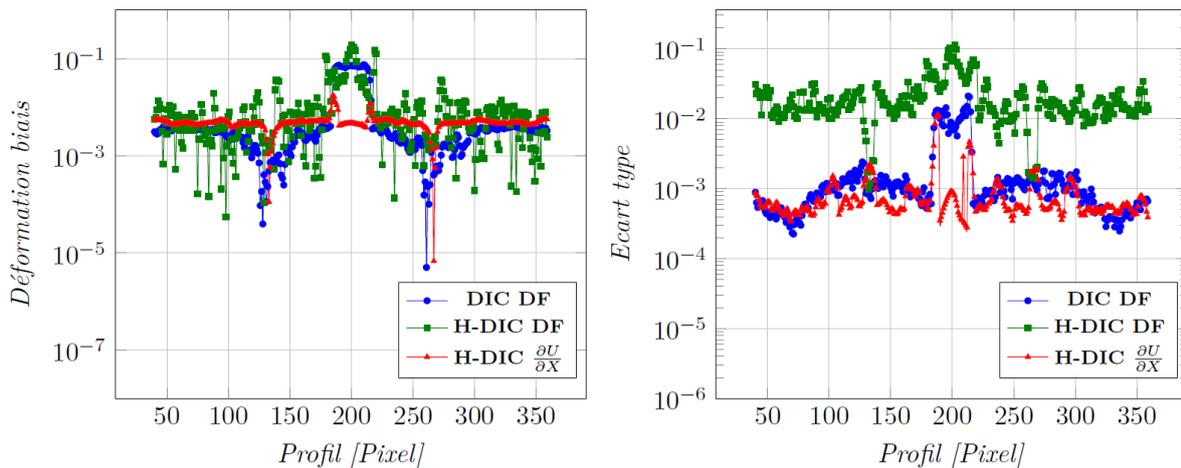


figure 1-21 : Superposition des biais moyens et écarts-types des déformations pour la CIN classique (DF), la H-DIC (DF) et la H-DIC ($\frac{\partial U}{\partial X}$). Extrait de [35].

Sur les différents tracés, on voit très nettement que la nouvelle approche pour calculer les déformations permet de les évaluer correctement. Pour le biais moyen obtenu par méthode H-DIC ($\frac{\partial U}{\partial X}$), les valeurs sont bien moins bruitées, et du même ordre de grandeur que pour la méthode CIN classique (DF) ($2 \cdot 10^{-3}$) avec une amélioration notable dans la zone proche de la fissure. Pour les écarts-types, on peut constater que la nouvelle évaluation des déformations est redescendue au niveau de valeurs obtenues par la CIN DF (10^{-3}). Sur cette nouvelle courbe rouge, on peut noter le même effet (i.e. remontée du niveau de l'erreur) lorsque le domaine contient une discontinuité éloignée de son centre. Cette distance maximale entre la remontée de l'erreur et la position de la discontinuité est égale à la demi-largeur du domaine. Le tableau 1-3 regroupe les valeurs moyennes des erreurs calculées en prenant en compte tout le champ, mais en séparant les domaines contenant des fissures, de ceux qui n'en contiennent pas. En ce qui concerne les erreurs de déformations, les résultats

montrent clairement que dans le cas d'une étude menée sur un matériau fracturé, le meilleur choix pour le calcul des déformations est H-DIC $\left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)$. Toutefois, si l'échantillon ne présente pas de fissures, l'approche CIN classique (DF) reste appropriée.

En conclusion, la méthode H-DIC est parfaitement adaptée pour quantifier la transformation physique entre les différents états et en déduire les composantes locales des déformations lorsque le milieu est continu et/ou discontinu lorsque les gradients locaux sont exploités.

	Biais moyen des déformations (%)		
	CIN classique (DF)	H-DIC (DF)	H-DIC $\left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)$
Zone avec fissure	7,092	9,28	0,457
Zone sans fissure	0,262	0,78	0,466
	Ecart-type moyen des déformations (%)		
	CIN classique (DF)	H-DIC (DF)	H-DIC $\left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)$
Zone avec fissure	0,908	6,340	0,064
Zone sans fissure	0,089	1,812	0,072

tableau 1-3 : Comparaison des différentes valeurs de déformation équivalente. Extrait de [35].

La matrice S.W.O.T (tableau 1-4) confirme les forces de la H-DIC qui permettent maintenant de mieux décrire le milieu étudié. Il faut aussi rappeler que cet enrichissement induit des temps de calcul plus longs et des quantités de données qui peuvent s'avérer limitantes lorsque les transformations physiques sont rapides ou ont lieu sur de longues périodes.

POSITIF	NEGATIF
Forces	Faiblesses
-Pas d'hypothèse sur les fissures -Fissure explicite (haute fréquence) -Champs ouverture/glisement des fissures -Adapté aux milieux discontinu et continu -Programmation sous CUDA -Résolution \nearrow proche des fissures	-Augmentation du nombre de variables -Fissure linéaire dans chaque domaine -Temps de calcul -Champs de déformations par dérivation (DF)
Opportunités	Menaces
-Utilisation des gradients locaux pour la mesure des déformations	-Quantité des données (nombre de champs) -Phénomènes physiques rapides et/ou longs

tableau 1-4 : matrice S.W.O.T de la H-DIC

1.2.5 Conclusions sur les différents algorithmes de CIN.

Il me paraissait nécessaire de rappeler les algorithmes de CIN utilisés dans mes travaux de recherche et montrer le travail mené sur les développements aboutissant à la H-DIC.

Dans ce chapitre, seuls les développements et quelques résultats du comportement hydromécanique ont été présentés. Dans le chapitre suivant, j'expose l'apport de la H-DIC dans l'étude quantitative du comportement de la roche et fais une comparaison des résultats entre les différents essais et donc entre les différentes échelles d'observation. Je l'ai donc découpé en cinq axes portant sur :

- l'anisotropie des déformations,
- les fissures sub-horizontales : analyse de la distance entre les fissures via la mesure de la largeur des blocs et les valeurs d'ouverture (o), de glissement (s) et des angles (α , θ_H),
- les fissures sub-verticales : les valeurs d'ouverture (o), de glissement (s) et des angles (α , θ_H),
- l'aire fracturée et la porosité de surface des fissures : calcul et comparaison avec les variables d'état (RH, T), et
- des couplages entre les grandeurs mesurées.

Cette structuration permet d'identifier les similitudes et les différences en fonction des échelles d'observation, car l'ensemble des essais ont été réalisés sur la même roche argileuse issue de la station expérimentale de Tournemire. Ce travail de comparaison, de synthèse et la discussion associée permettra d'orienter le projet de recherche que je souhaite développer. De plus, nous nous sommes attachés à superposer nos grandeurs mécaniques spatialisées à la microstructure spatialisée de l'argilite de Tournemire, et nous nous sommes intéressés à quantifier la surface élémentaire représentative (SER) de la microstructure dans le but d'apporter des données moyennées du milieu [Act.4] [Act.6].

1.3 Analyses quantitatives aux différentes échelles.

Les principaux résultats obtenus aux différentes échelles, et résumés dans le chapitre précédent, permettent une discussion et une comparaison des observations. Une discussion sur l'effet d'échelle sera entreprise au moyen des données hydromécaniques quantitatives.

Une grande prudence est prise quant aux différences car elles peuvent être dues aux conditions aux limites (contraintes et déplacements) appliquées aux frontières des ROIs qui ne sont pas identiques.

La discussion aborde l'anisotropie des déformations hydriques, les amplitudes d'ouverture et de cisaillement et les aires fracturées. Ces distances entre les fissures seront aussi exposées.

1.3.1 Anisotropie [Act.7].

Cette roche argileuse est connue pour avoir un comportement isotrope transverse avec des valeurs différentes suivant les directions perpendiculaires et parallèles à la stratification et de nombreuses études en laboratoire et in-situ se sont intéressées à déterminer les propriétés mécaniques, hydromécaniques dans ces directions et d'en quantifier les rapports [25, 29–38]. On peut citer les travaux de Valès et al. 2004 [39] et Wakin 2005 [49]. L'approche que je propose est la conséquence des observations des champs de déplacement horizontaux et verticaux. En effet, ces champs montrent une évolution linéaire des déplacements entre deux fissures. Ces pentes horizontales et verticales correspondent aux déformations de la phase solide suivant les directions parallèles et perpendiculaires à la stratification. Le rapport entre ces deux déformations correspond au rapport d'anisotropie des déformations hydriques ($\varepsilon_{yy}/\varepsilon_{xx}$ ou $\varepsilon_1/\varepsilon_2$). Cette **anisotropie** des déformations hydriques issues de données spatialisées n'avait jamais été mesurée aux échelles de la galerie ou macroscopique. L'approche développée sélectionne les blocs continus (i.e. phase solide sans fissures apparentes), contrairement aux travaux cités précédemment. Ainsi plusieurs blocs (figure 1-23) sont discrétisés. Les déformations moyennes sont extraites de l'interpolation des

déplacements par l'équation d'un plan. Cette procédure est répétée pour chaque bloc et chaque état déformé. Ce choix est motivé par le dépôt de poussière dans la galerie engendrant des changements de niveaux de gris sur nos images, ce qui augmente plus les erreurs de mesure des déformations car obtenus par dérivation, que les erreurs de mesure des déplacements.

La mesure du rapport des déformations hydriques s'obtient après une succession d'étapes :

1. Une segmentation automatiquement des fissures et des blocs, obtenue à partir des champs $o, s, \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_1$ et ε_2 ,
2. La création d'un masque isolant chaque bloc (b) et les fissures (blanches et dilatées de plusieurs pixels ; figure 1-23 et figure 1-24). Les b blocs correspondent à des zones continues ne contenant pas de fissures visibles. Pour une meilleure visualisation, un niveau de gris et un numéro ont été imposés par bloc,
3. L'interpolation par un plan des champs de déplacements (u,v) pour chaque bloc avec :

$$u^b(x, y) = A_x^b \cdot x + B_x^b \cdot y + C_x^b \quad \text{équation 1-9}$$

$$v^b(x, y) = B_y^b \cdot x + A_y^b \cdot y + C_y^b \quad \text{équation 1-10}$$

avec $\varepsilon_{xx}^b = A_x^b$; $\varepsilon_{yy}^b = A_y^b$ et $\varepsilon_{xy}^b = \frac{1}{2}(B_x^b + B_y^b)$

4. La mesure de la pente moyenne des déformations moyennes ($\varepsilon_{yy}^b/\varepsilon_{xx}^b$ et $\varepsilon_1^b/\varepsilon_2^b$) pour chaque bloc (b) et pour chaque état déformé.

Echelle de la galerie [Act.7] [Act.25].

La figure 1-22 présente l'évolution de la déformation moyenne ε_{yy}^b en fonction de ε_{xx}^b au cours du cycle annuel. On constate, pour les différents blocs b ($b=1$ à 15), une bonne réversibilité des déformations sur cette période. Une régression linéaire permet d'en déduire le rapport (coefficient directeur) entre ces déformations. Les pentes définissent l'anisotropie des déformations hydriques. Le tableau 1-5 synthétise l'ensemble des rapports d'anisotropie dans le repère lié de la ROI ($\varepsilon_{xx}^b, \varepsilon_{yy}^b$) et dans le repère principal ($\varepsilon_1^b, \varepsilon_2^b$) de chaque bloc.

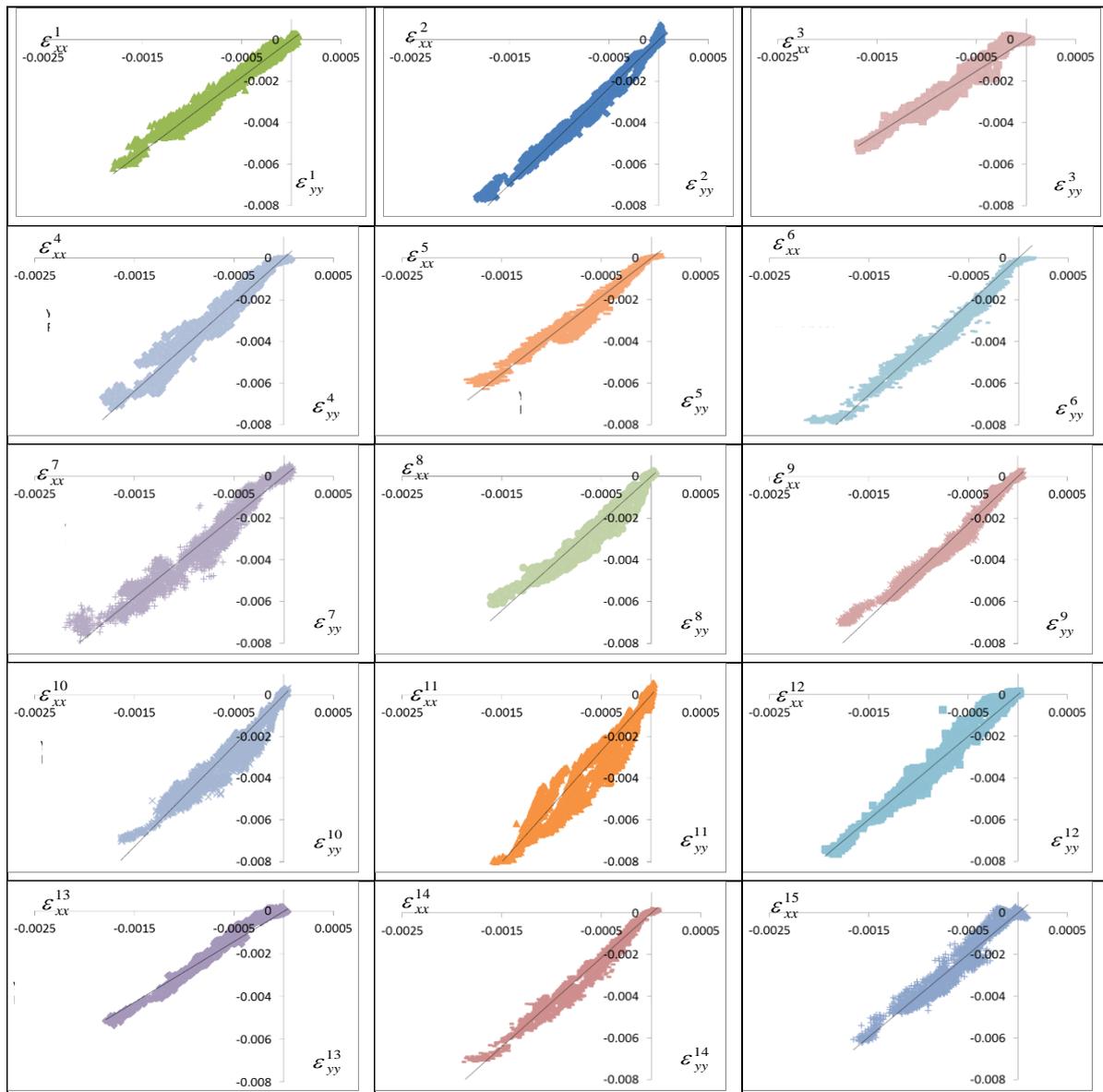


figure 1-22 : Pour chaque bloc b ($b=1-15$) et sur un cycle annuel, évolution de la déformation moyenne sub-verticale ε_{yy}^b , par rapport à la déformation moyenne sub-horizontale ε_{xx}^b . Les lignes continues noires représentent la régression linéaire.

La figure 1-22 confirme que les déformations suivant l'axe \vec{y} , perpendiculaires aux plans de stratification sont plus grandes que celles suivant l'axe \vec{x} [40]. Les déformations moyennes maximales de ε_{xx}^b et ε_{yy}^b sont respectivement de l'ordre de 0,2 et 0,8%. Ce résultat confirme l'anisotropie de la roche avec des déformations perpendiculaires aux plans de stratification environ quatre fois plus importantes que celles parallèles. Autre résultat marquant, c'est la très faible dépendance du rapport d'anisotropie aux variations d'hygrométrie dans la galerie (figure 1-22). En effet, le rapport entre les déformations reste

constant alors que dans le même temps les variations d'humidité relative peuvent atteindre 80% et 7°C pour la température au cours de l'année.

b	Surface [mm²]	$\varepsilon_{yy}^b/\varepsilon_{xx}^b$	$R^2(\varepsilon_{yy}^b/\varepsilon_{xx}^b)$	$\varepsilon_1^b/\varepsilon_2^b$	$R^2(\varepsilon_1^b/\varepsilon_2^b)$
1	3730	3,60	0,98	3,60	0,96
2	5241	4,63	0,98	4,67	0,96
3	5759	3,02	0,96	3,27	0,97
4	2317	4,27	0,97	4,39	0,97
5	4720	3,69	0,97	3,86	0,96
6	2498	4,35	0,97	4,71	0,96
7	1528	3,88	0,96	4,00	0,94
8	6843	4,28	0,96	4,40	0,96
9	10591	4,54	0,98	4,87	0,96
10	5624	4,85	0,94	5,06	0,94
11	3808	5,35	0,94	5,42	0,92
12	4789	3,98	0,97	4,23	0,98
13	6907	2,84	0,95	3,15	0,98
14	3616	4,27	0,98	4,45	0,96
15	4133	3,97	0,95	4,46	0,96
Moyenne	4805	4,10	-	4,30	-
Ecart-type	2236	0,65	-	0,64	-

tableau 1-5 : rapports d'anisotropie $\varepsilon_{yy}^b/\varepsilon_{xx}^b$, $\varepsilon_1^b/\varepsilon_2^b$ et des coefficients de corrélation $R^2(\varepsilon_{yy}^b/\varepsilon_{xx}^b)$, $R^2(\varepsilon_1^b/\varepsilon_2^b)$ (échelle de la galerie).

Le tableau 1-5 montre une forte variabilité des rapports d'anisotropie avec une valeur minimale de 2,84 et une valeur maximale 5,35 pour $\varepsilon_{yy}^b/\varepsilon_{xx}^b$ et pour $\varepsilon_1^b/\varepsilon_2^b$ les valeurs extrêmes sont 3,15 et 5,42. Leurs moyennes sont proches de 4,1 et 4,3. Ce faible écart des moyennes confirme que le repère 'ROI' (x,y) est proche du repère principal (1,2) de chaque bloc. Les écarts-types sont de l'ordre de 0,65. La variabilité spatiale de ces rapports atteste d'un comportement local fortement hétérogène qui de surcroît est présent sur les mêmes plans stratigraphiques (exemple : entre les blocs 12 et 13 de la figure 1-23 ; rapports de 3,98 et 2,84 respectivement). Ceci confirme qu'à cette échelle d'observation, la dimension des blocs ne permet pas d'obtenir un rapport moyen d'anisotropie des déformations hydromécaniques statiquement représentatif de la roche.

Comparativement, la taille des blocs est significativement supérieure à la surface élémentaire représentative (SER) mesurée à partir de la partie 'homogène' de la carte minéralogique qui est de l'ordre de 30 à 400 μ m suivant la méthode choisie [Act.4].

Dans sa thèse et sur la carte minéralogique haute résolution entière, Anne-Laure FAUCHILLE [7] montre que l'argilite de Tournemire ne permet pas d'obtenir cette indépendance du fait de la présence d'une concentration locale d'inclusions rigides (concrétion calcaire). L'extrapolation de ces observations à une échelle plus grande permet d'argumenter sur la présence d'hétérogénéités minéralogiques à différentes échelles et donc d'expliquer cette grande variabilité des rapports d'anisotropie. D'autres facteurs, non quantifiables à cette échelle d'observation peuvent influencer les déformations, on peut citer la micro facturation et le réseau poreux de la matrice [50].

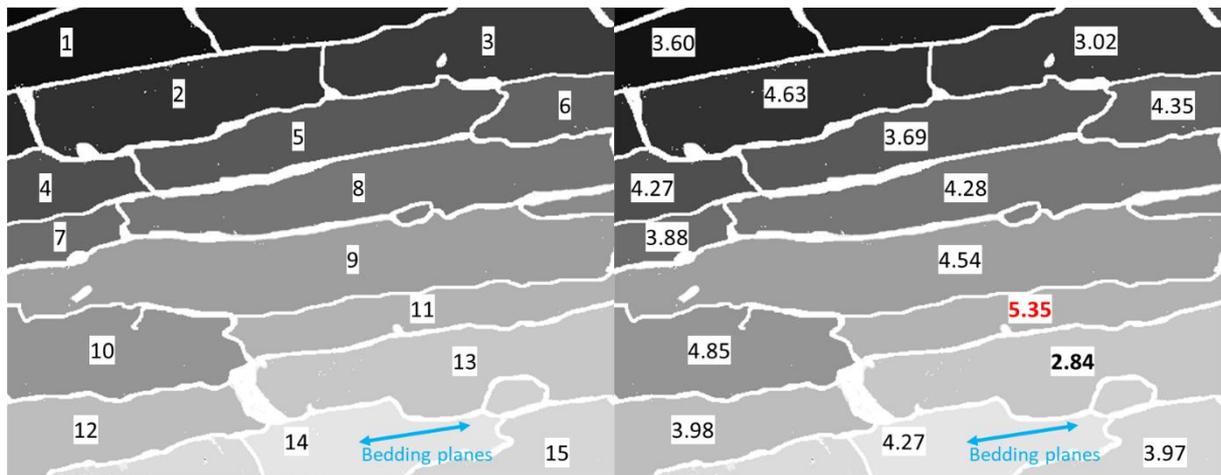


figure 1-23 : localisation des 15 blocs sur la ROI et valeur du rapport d'anisotropie $\varepsilon_{yy}^b/\varepsilon_{xx}^b$ (échelle de la galerie).

Echelle macroscopique [Act.25].

L'anisotropie des déformations hydriques a été mesurée avec la même approche et pour vingt états déformés. Le masque dissocie les fissures de dessiccation (fissures en blanc avec une dilatation de plusieurs pixels) et les huit blocs ($b=8$) (figure 1-24).

<i>b</i>	Surface [mm ²]	$\varepsilon_{yy}^b/\varepsilon_{xx}^b$	$R^2(\varepsilon_{yy}^b/\varepsilon_{xx}^b)$	$\varepsilon_1^b/\varepsilon_2^b$	$R^2(\varepsilon_1^b/\varepsilon_2^b)$
1	180,78	5,8	0,98	6,0	0,96
2	78,48	4,34	0,98	4,37	0,96
3	247,13	3,52	0,96	3,53	0,97
4	644,80	3,42	0,97	3,46	0,97
5	340,18	2,96	0,97	3,35	0,96
6	138,20	3,4	0,97	3,41	0,96
7	289,58	2,85	0,96	2,95	0,94
8	99,48	3,67	0,96	3,7	0,96
Moyenne	252,33	3,75	-	3,84	-
Ecart-type	183,19	0,95	-	0,96	-

tableau 1-6 : rapports d'anisotropie $\varepsilon_{yy}^b/\varepsilon_{xx}^b$, $\varepsilon_1^b/\varepsilon_2^b$ et des coefficients de corrélation $R^2(\varepsilon_{yy}^b/\varepsilon_{xx}^b)$, $R^2(\varepsilon_1^b/\varepsilon_2^b)$ (échelle macroscopique).

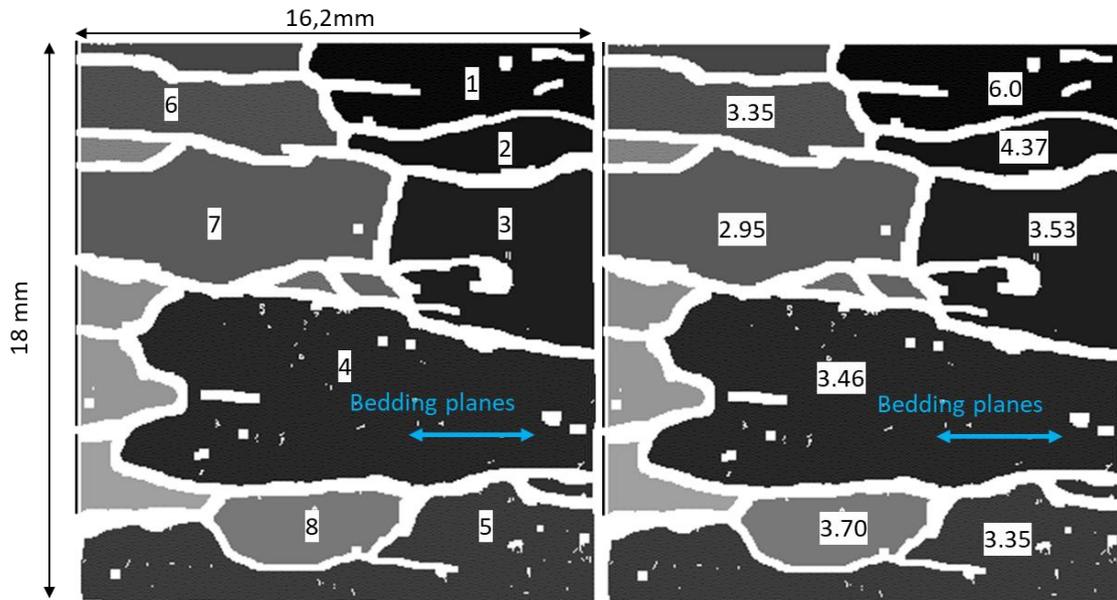


figure 1-24 : localisation des 8 blocs sur la ROI et valeur du rapport d'anisotropie $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ (échelle macroscopique).

Les rapports d'anisotropie montrent aussi une hétérogénéité de valeurs avec une valeur minimale de 2,84 et une valeur maximale 5,82 pour $\varepsilon_{yy}^b/\varepsilon_{xx}^b$ et pour $\varepsilon_1^b/\varepsilon_2^b$ les valeurs extrêmes sont 2,95 et 6 (tableau 1-6). Les moyennes des rapports d'anisotropie sont proches (3,75 et 3,84) confirmant que le repère 'ROI' est proche des axes principaux (1,2) de chaque bloc. Les écarts-types sont de l'ordre de 0,96.

Discussion.

La figure 1-25 présente les valeurs des rapports d'anisotropie obtenues aux échelles de la galerie et macroscopique. On note clairement une non-dépendance du rapport d'anisotropie des déformations vis-à-vis de l'échelle d'observation, malgré des sollicitations et des conditions aux limites différentes. Malgré une forte dispersion des valeurs entre les blocs et pour les deux échelles investiguées, il est à noter que les rapports d'anisotropie semblent indépendants du chargement appliqué.

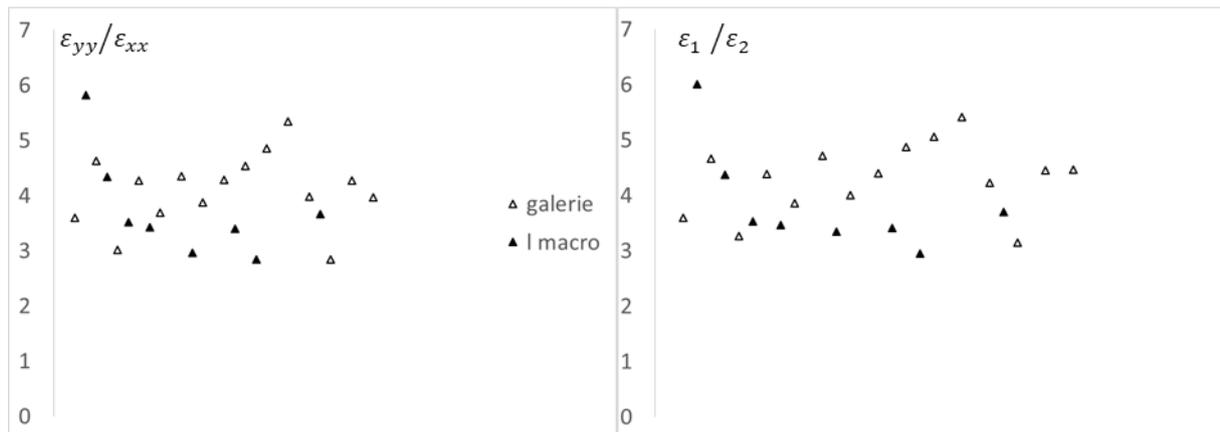


figure 1-25 : valeurs des rapports d'anisotropie aux échelles de la galerie et macroscopique.

Le tableau 1-7 montre les valeurs du rapport des déformations hydriques mesurées sur deux roches argileuses, l'argilite de Tournemire (nos études) et l'argilite du Callovo-Oxfordien dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Notons que tous les résultats du tableau 1-7, hormis à l'échelle de la galerie, ont été obtenus dans des conditions de contraintes libres (c'est-à-dire, aucune contrainte axiale ou confinement latéral). Dans ces conditions, l'amplitude des déformations hydriques devrait être supérieure à celle observée sous une pression de confinement, comme dans une galerie souterraine.

Les résultats du tableau 1-7 indiquent que nos valeurs des rapports d'anisotropie (galerie et laboratoire) sont en moyenne supérieures à celles obtenues par d'autres essais en laboratoire. Il est difficile d'expliquer clairement cet effet, mais son origine est probablement liée à l'endommagement de la roche argileuse (EDZ à l'échelle de la galerie et préparation de l'échantillon à l'échelle macroscopique). En effet, [38] et [51] ont montré (i) que l'amplitude des déformations hydriques dépend de l'échelle d'observation et (ii) que l'amplitude de la déformation hydrique à l'échelle centimétrique est beaucoup plus élevée que celle mesurée à l'échelle micrométrique. Les auteurs ont également observé que les roches argileuses endommagées et microfissurées présentent des contraintes hydriques (gonflement et retrait) plus élevées, principalement perpendiculairement à la stratification que dans les roches

argileuses non endommagées. En conséquence, les dommages et les microfissures existants, à différentes échelles spatiales, conduiraient à une plus grande amplitude de déformation hydrique et à un rapport d'anisotropie plus élevé lorsque l'échelle spatiale est plus grande.

rapport	échelle	RH (%)	Roche argileuse	références
~1-3	cm	>5-98	Tournemire	[39]
2,1-2,4	cm	32-98	Callovo-oxfordien	[40]
1,3-2,2	cm	36-98	Callovo-oxfordien	[22]
~1-3,6	100-300 μ m	75-99	Callovo-oxfordien	[38]
2,84-5,35 (moy\approx4,2)	dm	25-99	Tournemire	[Act.7] (galerie)
2,85-6 (moy\approx3,8)	cm	33-98	Tournemire	[Act.25] (macro.)

tableau 1-7 : rapports d'anisotropie des déformations hydriques mesurés à l'échelle du laboratoire et comparaison avec nos études (galerie et macroscopique).

Si l'on compare nos rapports d'anisotropie à ceux obtenus de paramètres mécaniques à l'échelle du laboratoire (principalement à partir de mesures ultrasonores généralement acquises dans la bande de fréquences de 100 kHz à 1 MHz), les résultats du tableau 1-8 sont très inférieurs à nos valeurs. Cette différence suggère qu'il n'y a pas de liens physiques simples et directs entre les deux groupes des rapports d'anisotropie. En effet, cette découverte n'est peut-être pas surprenante puisque nous comparons le rapport d'une réponse mécanique (le rapport d'anisotropie des déformations hydriques) à un rapport de propriétés mécaniques intrinsèques (le rapport d'anisotropie des vitesses de propagation ou l'anisotropie des modules élastiques). Par conséquent, on peut se demander quelles propriétés physiques sont directement liées au rapport d'anisotropie des déformations hydriques. A partir de l'équation d'élasticité dans le cadre d'une roche argileuse partiellement saturée (équation 1-11) et en considérant qu'aucune contrainte est appliquée sur le front de la galerie, le rapport des déformations perpendiculaires et parallèles ($\delta\varepsilon_{\perp}/\delta\varepsilon_{//}$) (équation 1-12) se simplifie et s'exprime en fonction de E_{\perp} , $E_{//}$, ν_{\perp} , $\nu_{//}$, b_{\perp} et $b_{//}$.

$$\delta \bar{\varepsilon} = S: \delta \bar{\sigma}' \quad \text{équation 1-11}$$

$$\frac{\delta \varepsilon_{\perp}}{\delta \varepsilon_{//}} = \frac{\frac{b_{\perp}}{E_{\perp}} - 2 \frac{v_{//}}{E_{//}} b_{//}}{-\frac{v_{\perp}}{E_{\perp}} b_{\perp} + \frac{1 - v_{//}}{E_{//}} b_{//}} \quad \text{équation 1-12}$$

où les variables E_{\perp} et $E_{//}$ sont les modules d'Young, v_{\perp} et $v_{//}$ des coefficients de, μ_{\perp} et $\mu_{//}$ des modules de cisaillement et b_{\perp} et $b_{//}$ des coefficients de Biot. \perp et $//$ définissent les orientations perpendiculaires et parallèles à la stratification.

Le rapport d'anisotropie (équation 1-12) est une fonction composée de deux modules d'Young, de deux coefficients de Poisson et de deux coefficients de Biot, et il est indépendant du chargement hydrique, ce qui confirme les résultats expérimentaux obtenus dans la galerie et à l'échelle macroscopique. En effet, puisque nos résultats expérimentaux ont montré que l'anisotropie des déformations hydriques ne dépend pas des modifications d'hygrométrie, les paramètres poro-élastiques (équation 1-12) ne dépendent pas non plus du chargement où leurs évolutions par rapport à l'humidité relative se compensent mutuellement. Sur l'argilite Callovo-Oxfordien pour laquelle les modules d'élasticité et les paramètres de Biot ont fait l'objet de recherches approfondies en laboratoire [45] et en considérant les valeurs suivantes correspondant à une argilite non endommagée et quasi saturée, on obtient $E_{//} = 1,2 E_{\perp}$ avec $E_{\perp} = 4$ GPa, $v_{\perp}=v_{//}=0,3$ et $b_{\perp}= b_{//}= 0,6$. L'existence d'un litage n'induit pas d'anisotropie des coefficients de Poisson et des coefficients de Biot [45]. Le rapport d'anisotropie est proche de 1,8. Cette valeur de 1,8 est significativement inférieure à celle mesurée dans nos études expérimentales [2,84-5,35] [2,85-6]. Cette différence peut être due à un endommagement présent sur le front de galerie et sur l'échantillon (préparation de l'échantillon), conduisant à une microfissuration dans la roche argileuse assimilée à de la déformation. Cette interprétation est cohérente avec les effets d'échelle observés sur les données cinématiques mentionnées précédemment (tableau 1-7).

rapport	paramètres	essais	Roche argileuse	références
1.2	Vitesse d'ondes P ⁽¹⁾	Ultrasonic	Northern Taiwan	[41]
1.2	Vitesse d'ondes S ⁽²⁾			
~1.0-1.6	Vitesse d'ondes P ⁽¹⁾	Ultrasonic sous chargement hydrostatique	Opalinus	[42]
1.3	Vitesse d'ondes P ⁽¹⁾	Ultrasonic	Callovo-Oxfordien	[43]
1.2-1.4	Vitesse d'ondes P ⁽¹⁾	Ultrasonic	Callovo-Oxfordien	[44]
1.0-1.1	Vitesse d'ondes S ⁽²⁾			
1.05-1.4	Module d'Young ⁽³⁾	Triaxial	Callovo-Oxfordien	[45]
1.0-1.1	Vitesse d'ondes P ⁽¹⁾	Ultrasonic sous chargement hydrostatique	Norwegian Sea shale	[46]
1.0-1.1	Vitesse d'ondes S ⁽²⁾			
1.2-1.4	Vitesse d'ondes P ⁽¹⁾	Ultrasonic sous chargement hydrostatique	Callovo-Oxfordien	[47]
1.2	Vitesse d'ondes S ⁽⁴⁾			
1.2-2	Module d'Young ⁽³⁾	Triaxial	Callovo-Oxfordien	[48]
2.84-5.35 (moy.~4.2)	Déformations hydriques	H-DIC	Tournemire	[Act.7] (galerie)
2,85-6 (moy~3,8)	Déformations hydriques	H-DIC	Tournemire	[Act.25] (macro.)

(1) $V_{//}^P / V_{\perp}^P$ où $V_{//}^P$ et V_{\perp}^P sont respectivement les vitesses d'ondes P parallèle et perpendiculaire au litage,

(2) $V_{//}^S / V_{\perp}^S$ où $V_{//}^S$ et V_{\perp}^S sont respectivement les vitesses d'ondes S parallèle et perpendiculaire au litage. Les vitesses d'ondes S sont polarisées dans le plan de propagation de l'onde.

(3) $E_{\perp} / E_{//}$ où $E_{//}$ et E_{\perp} sont respectivement les modules d'Young parallèle et perpendiculaire au litage.

(4) $V_{//}^{sH} / V_{//}^{sV}$ $V_{//}^{sH}$ et $V_{//}^{sV}$ sont respectivement la vitesse d'ondes S parallèle au litage et polarisée parallèlement par rapport au litage et la vitesse d'ondes S perpendiculaire au litage et polarisée perpendiculairement par rapport au litage.

tableau 1-8 : rapports d'anisotropie des paramètres mécaniques mesurés à l'échelle du laboratoire et comparaison avec nos études (galerie et macroscopique).

Ces travaux sur l'anisotropie permettent d'interpréter le comportement hydromécanique d'une roche argileuse lors d'une phase de dessiccation par le modèle conceptuel de la figure 1-26. Pour illustrer ce modèle simplifié, j'ai choisi trois blocs des dimensions et des déformations isotropes de retrait (ε) différentes et j'ai aussi imposé des translations de corps rigides (*imp_dis*). Son analyse et son interprétation confirment que lors de la phase de retrait des fissures, situées aux interfaces des blocs, s'ouvrent (mode

d'ouverture) mais aussi un phénomène de glissement (mode de cisaillement) entre les bords de la fissure est observé. L'ouverture de fissure (mode I) est facilement observable à l'œil ou sur les images car elle génère des pixels 'sombres' voire 'noires', mais le glissement ou cisaillement (mode II ou mode III) est impossible à visualiser et à considérer sans des outils métrologiques adaptés (exemple : H-DIC). Un retrait isotrope transverse ne modifierait pas les observations faites, seules les valeurs d'ouvertures et de glissement changeraient.

Pour l'ouverture (o), la figure 1-26.b confirme des valeurs constantes le long des blocs (1/3 et 2/3) et donc la moyenne de l'ouverture est représentative. Quant au glissement (s), les valeurs évoluent de façon monotone hormis à l'intersection des blocs 1 et 2 ($x_0=0$). Contrairement à l'ouverture, la valeur numérique du glissement est fonction de la position locale rendant l'interprétation du comportement des fissures plus complexe. A l'intersection des blocs 1/3 et 2/3 ($x_0=0, y_0=0$), des sauts d'ouverture et de glissement sont observés.

L'apport de la H-DIC à la compréhension du comportement des fissures de dessiccation permet de mesurer ces deux phénomènes localement (c.-à-d. pour chaque domaine interceptant une discontinuité) indépendamment et automatiquement, car ces deux phénomènes sont introduits explicitement (équation 1-5 et équation 1-6). Les sections §1.3.2 et §1.3.3 exposent l'ensemble des nouveaux résultats portant sur l'ouverture et le glissement obtenus pour les fissures sub-horizontales et sub-verticales.

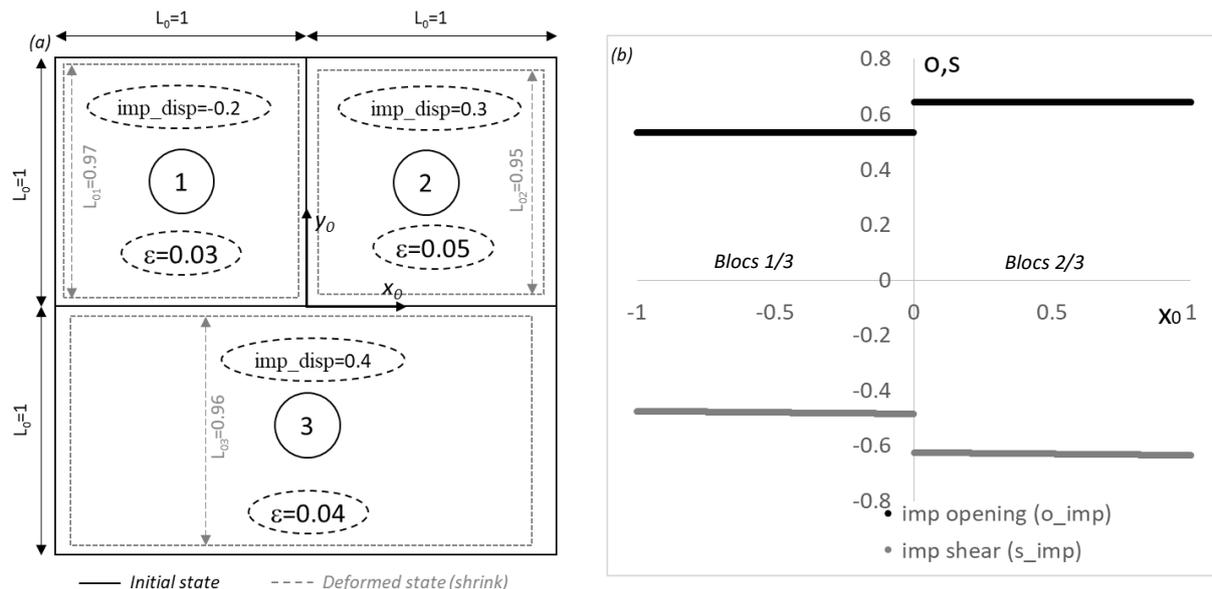


figure 1-26 : (a) Modèle conceptuel composé de trois blocs soumis à un retrait isotrope ($\epsilon=0.03$ à 0.05) et à des mouvements de solides rigides ($\text{imp_disp}=-0.2$ à 0.4) et (b) les valeurs d'ouverture et de glissement aux frontières des blocs suivant la direction ($x_0, y_0=0$).

1.3.2 Fissures sub-horizontales [Act.24].

Cette partie synthétise la distance entre les fissures sub-horizontales dans la direction perpendiculaire aux plans de stratification et leur comportement (ouverture, glissement, orientation) par rapport aux échelles d'observation et aux chargements. Pour quantifier la distance entre les fissures, je me suis aidé du masque isolant les fissures et les blocs (figure 1-23.a et figure 1-24.a). Chaque contour a été interpolé par une surface rectangulaire ($L \times l$) et seule la largeur (l) a été utilisée pour exprimer la distance entre deux fissures sub-horizontales. La distance (L) ne peut pas servir pour mesurer la distance entre les fissures sub-verticales car peu voire pas de blocs sont délimités par ces fissures. En effet, ce sont les bords de la ROI qui limitent les dimensions des rectangles.

A l'échelle de la galerie, les blocs délimités par des fissures de dessiccation (figure 1-23) sont les blocs 2 et 5 et à l'échelle macroscopique, il n'y a que le bloc 8 (figure 1-24).

Pour étudier, le comportement des fissures de dessiccation, j'ai dissocié les fissures de sub-horizontales et sub-verticales à partir de l'angle θ_H (figure 1-15 et figure 1-17) et j'ai fractionné chaque fissure en sous-fissures du fait de valeurs locales du glissement qui pourraient influencer fortement une valeur moyenne. De plus, les fissures ne sont pas toujours rectilignes localement ce qui a une forte influence sur les valeurs locales de o et s (figure 1-31). Ainsi une fissure de dessiccation continue a pu être scindée en plusieurs sous-fissures de longueur différente. Pour chaque sous-fissure identifiée et pour chaque état déformé, l'ouverture moyenne (o), le glissement moyen (s) ainsi que les écarts-types ont été calculés. Le mode de rupture est commenté au moyen de l'angle α (figure 1-12).

Le mode de glissement observé dans nos études s'apparente à un cisaillement hors-plan des lèvres des fissures et donc au mode III de la mécanique de la rupture. En effet, le front des fissures se situe au sein du massif rocheux ou de l'échantillon et donc le mouvement de glissement est subparallèle au front (figure 1-27). La longueur (a) correspond à l'étendue de l'EDZ au sein du massif rocheux autour des galeries ou de l'échantillon.

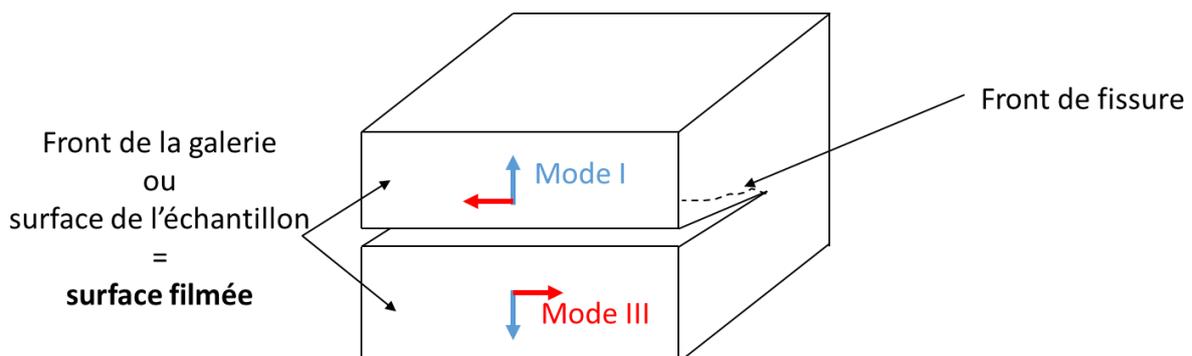


figure 1-27 : Schéma illustrant les modes I et III.

Echelle de la galerie.

La distance entre les fissures sub-horizontales varie entre 35 et 69,4mm avec une valeur moyenne de 54,6mm et un écart-type est de 9,88mm. Ces valeurs sont significativement inférieures aux observations faites par Cabrera et al., 2001 [6], dont la valeur moyenne était de l'ordre d'une vingtaine de centimètres. Deux hypothèses peuvent être avancées :

- Ces fissures sont apparues entre les deux périodes d'observation (i.e. 1990-2000 et nos travaux datant de 2011-2012),
- Ces fissures ont une ouverture faible (0,1 à 0,8mm), et donc difficilement observables à l'œil nu.

Pour la seconde hypothèse, la figure 1-29 présente les valeurs d'ouverture o (mode I), de glissement s (mode III) ainsi que le mode de rupture dominant pour un état extrême ($\Delta RH=73.71\%$, $\Delta T=7.22^\circ C$) et confirme que les valeurs de o sont proches du seuil de détection de notre œil.

L'ensemble de ces nouveaux résultats permet de tracer l'évolution du glissement (s) et de l'angle (α) par rapport l'ouverture (o), pour chaque sous-fissure (SH) et sur un cycle d'un an. Il confirme que les six fissures sub-horizontales choisies présentent des comportements différents en termes d'ouverture maximale, de glissement maximal et de mode de rupture dominant (figure 1-30). L'ouverture a lieu pendant les phases de désaturation du massif rocheux et la fermeture pendant la phase de resaturation.

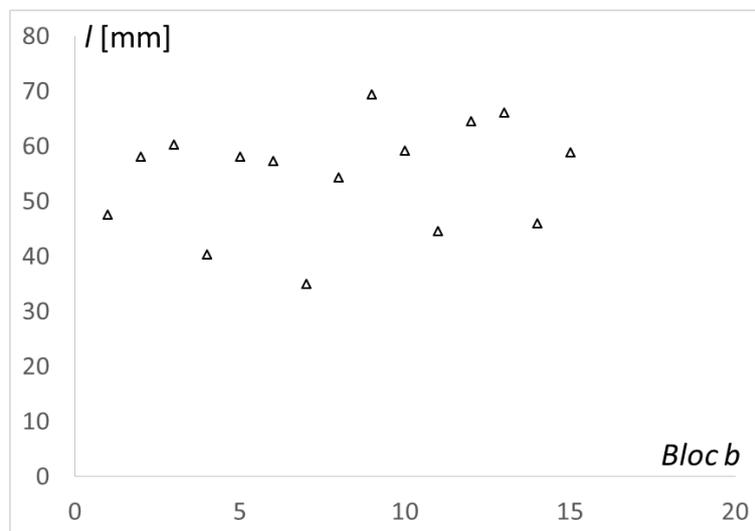


figure 1-28 : Distances (l) entre les fissures de dessiccation sub-horizontales à l'échelle de la galerie.

Les hystérèses observées sur les tracés o - s (flèches bleues sur la figure 1-30b,e,f) et o - α montrent clairement des différences entre les rapports ouverture/glisement lors des phases de désaturation et de saturation du massif rocheux. Pour d'autres fissures (SH3, SH8), ce phénomène d'hystérèse n'est pas observable (figure 1-30.a,c,d).

Sur les argilites du Cox (site de Bure), Pham et al. [40] ont montré que les déformations macroscopiques décrivent une hystérésis entre les périodes de désaturation et de saturation. Ce phénomène est induit par une hystérésis de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative [52,53].

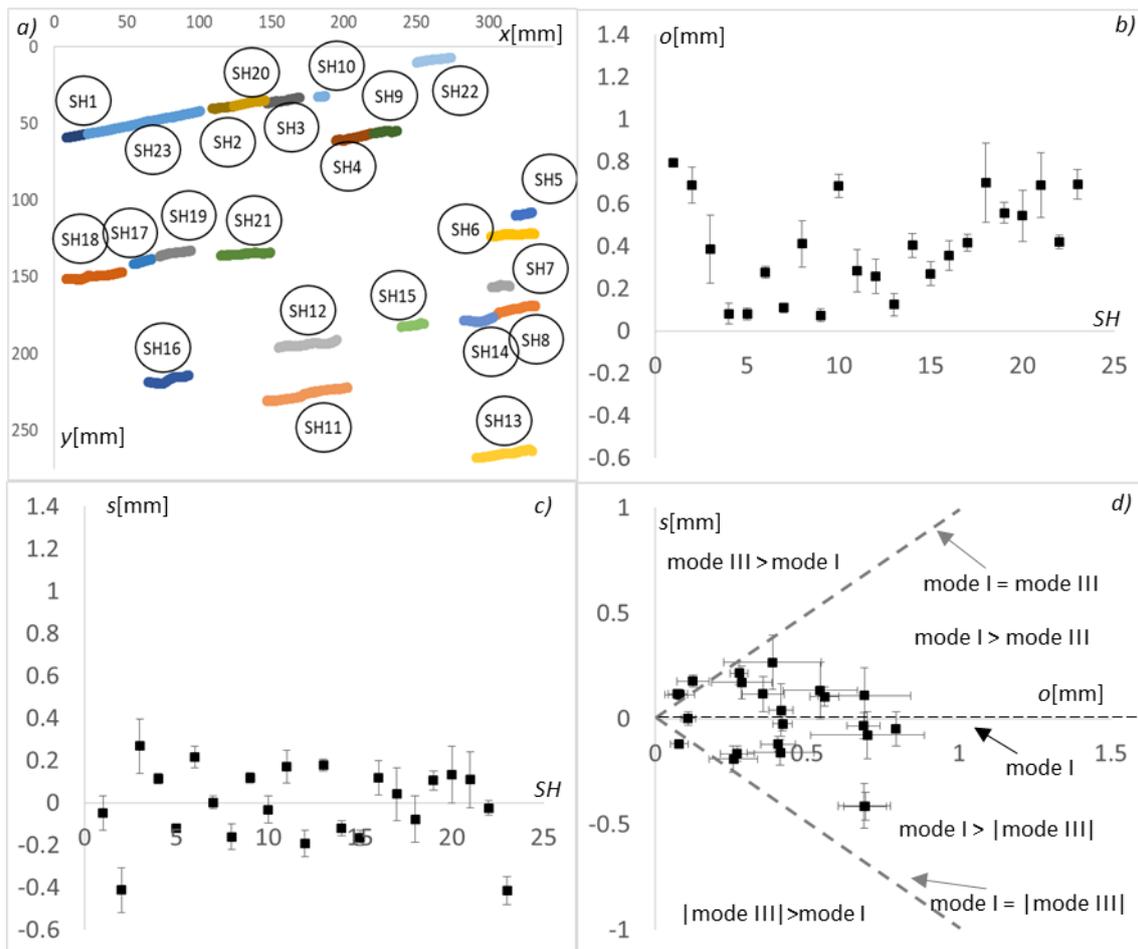


figure 1-29 : (a) localisation des 23 sous-fissures sub-horizontales (SH). (b), (c) Pour un état extrême ($\Delta RH=73.71\%$, $\Delta T=7.22^\circ C$) valeurs moyennes o et s obtenues pour les 23 sous-fissures sub-horizontales (d) tracé de s en fonction o pour les 23 sous-fissures sub-horizontales.

De plus, ces hystérèses apparaissent principalement pour les grandes ouvertures et peuvent être dues principalement à deux phénomènes différents :

- des déformations hydromécaniques induites par la déformation des minéraux argileux gonflants et/ou par la déformation du réseau poreux. Cette dernière serait d'intensité différente entre les phases de désaturation et de saturation (ex : effet 'bouteille d'encre'),
- des mouvements/translations entre les blocs et différés entre les phases de désaturation et de saturation.

Pour l'argilite de Tournemire, les argiles représentent 25 à 50% (en pourcentages massiques) des minéraux et dans cette phase argileuse, les interstratifiés illite/smectite varient entre 5 à 25% [7].

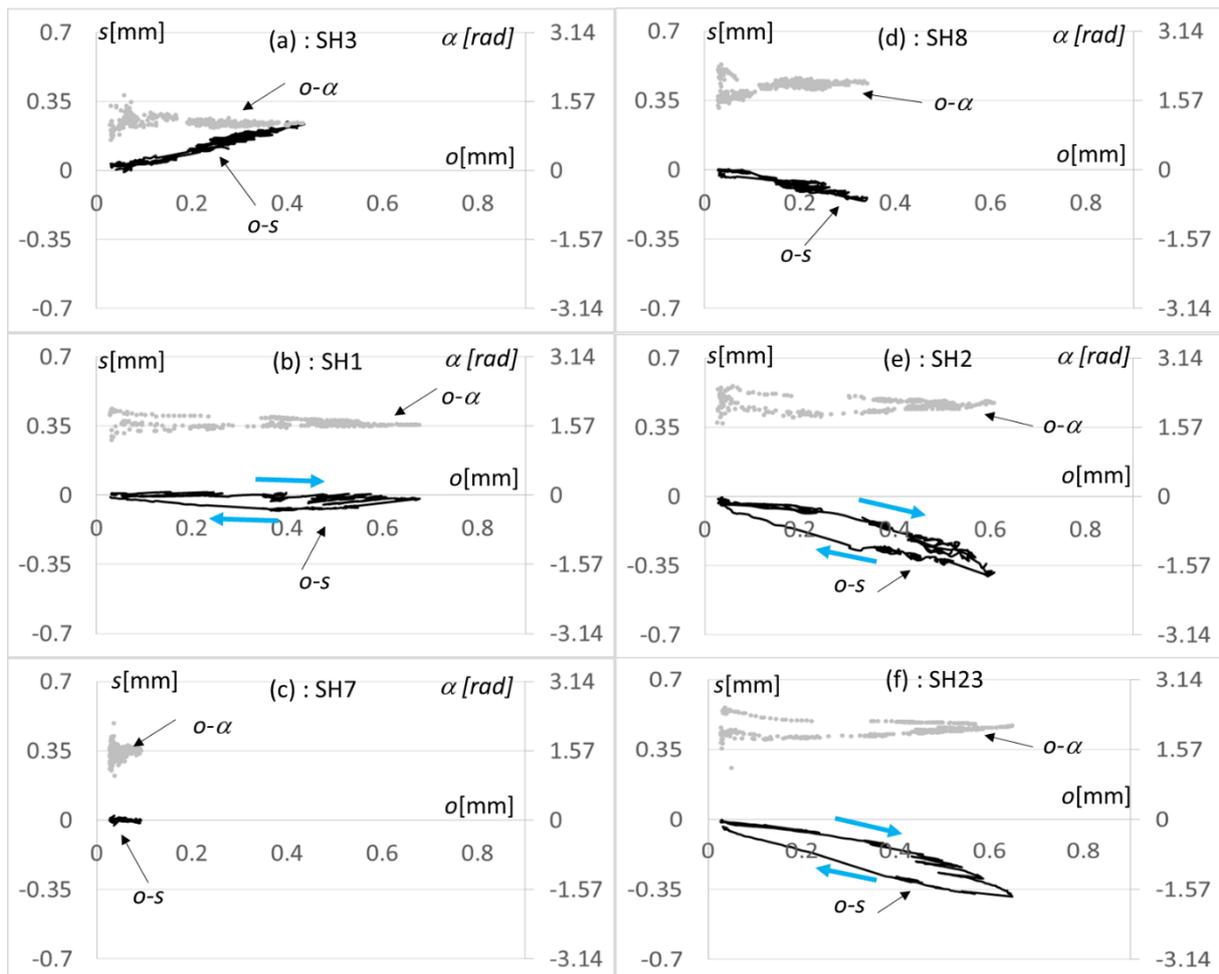


figure 1-30 : tracés de s et α en fonction o pour 6 fissures sub-horizontales sur une période d'un an.

D'autres particularités sont observées :

- *Le changement de signe des composantes s_{max} pour les sous-fissures sub-horizontales SH2 et SH20 (figure 1-29.a) qui sont connectées à une fissure sub-verticale. La valeur de s_{max} passe de -0,41mm à 0,13mm.*
- *Des sous-fissures sub-horizontales continues et non parallèles localement à la stratification (figure 1-31) et non connectées à une fissure sub-verticale.*
- *La grande variabilité des ouvertures maximales allant de 0,074 à 0,8mm, voire 1,26mm localement.*

Pour confirmer si le retrait de la phase solide induit à lui seul l'ouverture des fissures, il est possible de relier l'ouverture maximale théorique des fissures (o_{theo}) (équation 1-9) avec la déformation verticale de retrait ($\varepsilon_{\perp} \approx \varepsilon_1 \approx \varepsilon_{yy}$) (figure 1-22) et la largeur des blocs (l).

$$o_{theo} = \varepsilon_{yy_max} \cdot l \quad \text{équation 1-13}$$

avec (l) la largeur des blocs ($35 < l < 70$ mm) (figure 1-28)

et $5 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{1_max} < 8 \cdot 10^{-3}$ (figure 1-22)

Les valeurs de l'ouverture maximale théorique (o_{theo}) varient de 0,175 à 0,56mm. Ces valeurs sont proches des valeurs expérimentales, mais restent inférieures à certaines valeurs expérimentales ($o_{max}=0,8$ mm, voire 1,26mm localement).

Le changement de signe de s et la gamme d'ouverture maximale théorique (o_{theo}) inférieure à l'ouverture maximale mesurée expérimentale, étayent la possible présence de mouvements de blocs s'ajoutant aux mouvements induits par la déformation de retrait des blocs (figure 1-26).

L'autre axe de réflexion porte sur des déformations de retrait autour des fissures plus grandes que les déformations moyennes mesurées sur chaque bloc. En effet, la figure 1-11 montre une augmentation de la pente du déplacement au voisinage de la fissure, ce qui induit donc une déformation plus importante que celle obtenue à l'échelle du bloc. Ainsi une zone de transition entre les blocs et les fissures concentreraient plus de déformations de retrait.

Les nouveaux champs dus à l'enrichissement sont exprimés dans une base locale liée au domaine et donc à l'orientation locale des fissures, l'interprétation du comportement cinématique (o,s) des fissures peut être complexe mais exprime réellement les phénomènes observés. Les exemples de la figure 1-31 correspondant à des fissures en forme de « marche d'escalier » ou de « V » confirment les difficultés d'interprétation du comportement cinématique local (o,s) de ces fissures soumises à une translation n constante couplée à la convention de signe d' α (§1.2.4). Pour la forme de marche d'escalier, une diminution locale

de l'ouverture (o) (passage du vert au jaune) est observée avec un changement de signe de s (passage du vert au bleu). Pour la forme en V, les valeurs de o évoluent peu mais s change de signe (passage du vert au bleu). Les interprétations (figure 1-31) confirment qu'une fissure continue non rectiligne dont les blocs sont soumis à un mouvement de translation n se décompose en :

- des valeurs d'ouverture (o) variant le long de la discontinuité et,
- des changements de signe des glissements locaux (s).

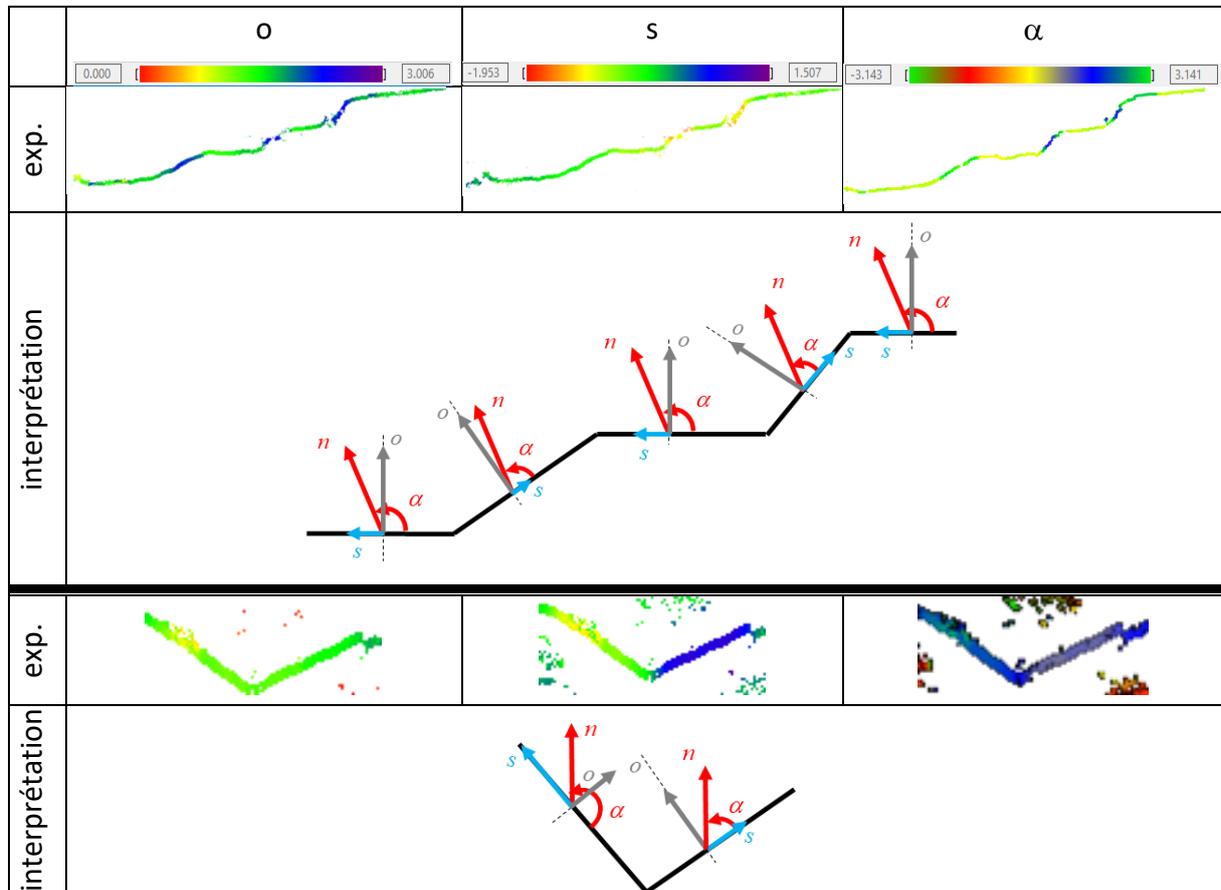


figure 1-31 : Exemples et interprétations du changement de signe de la composante s .

Pour chaque état déformé, nous pouvons quantifier l'orientation locale de fissures sub-horizontales. J'ai choisi de présenter les résultats pour deux états distincts (figure 1-48) car ils représentent respectivement les instants déformés correspondant au nombre de domaines fracturés (N_{max}) détectés par H-DIC et à l'aire fracturée mesurée (CA_{max}), les plus élevés.

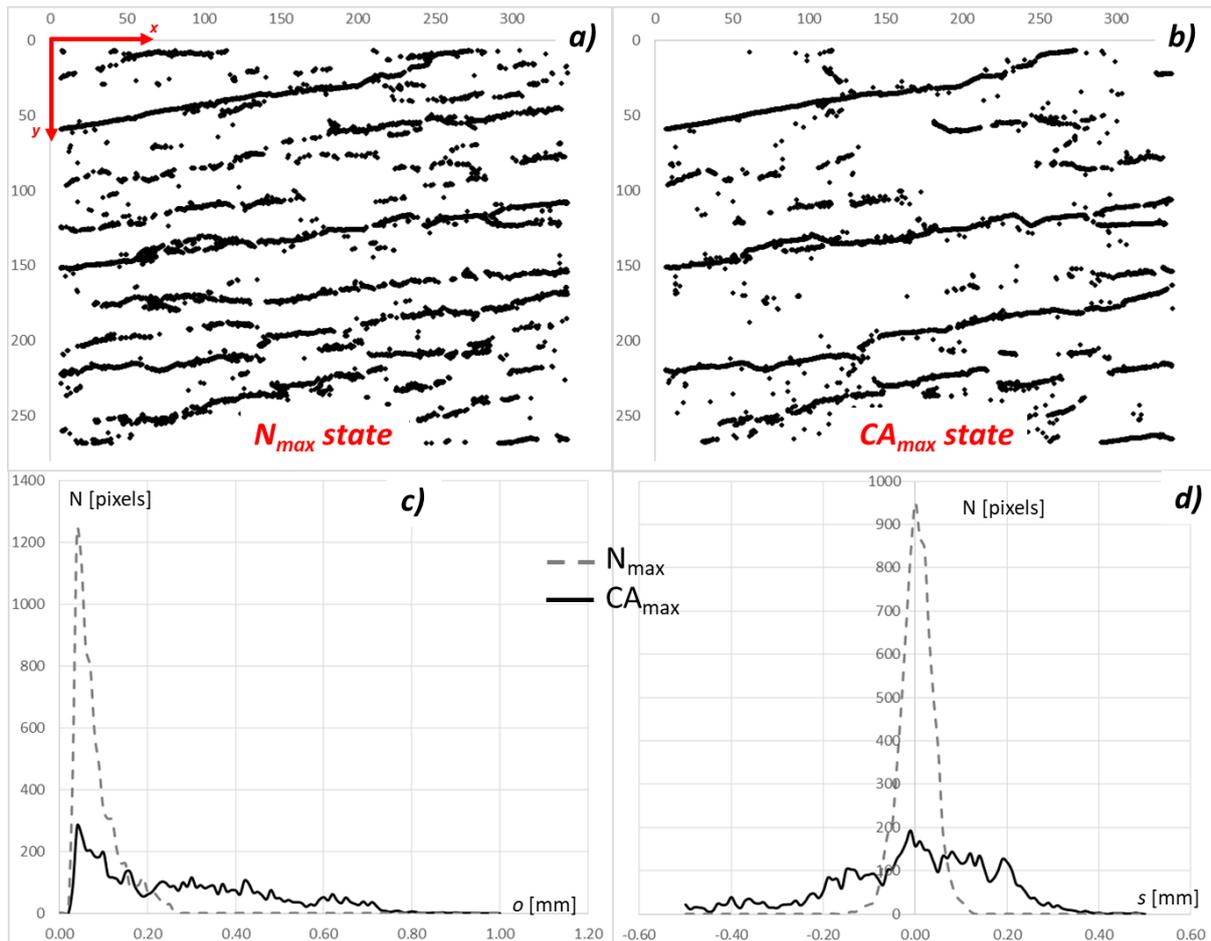


figure 1-32 : Pour les états N_{max} et CA_{max} : (a,b) localisation des fissures sub-horizontales. (c, d) fréquences des domaines fracturés correspondant aux fissures sub-horizontales en fonction de o et s [Act.24].

La figure 1-32.a et la figure 1-32.b montrent la position des fissures sub-horizontales pour N_{max} et CA_{max} . Les figure 1-32.c,d expriment les fréquences d'ouverture et de glissement. Pour l'état N_{max} , les ouvertures locales varient entre 0 et 0,25mm et le glissement évolue entre -0,15mm et 0,15mm. Pour l'état CA_{max} , il y a moins de pixels fracturés que pour l'état N_{max} mais l'ouverture maximale atteint 0,8mm et il en est de même pour le glissement, mais avec une gamme des valeurs variant entre -0,5mm et 0,4mm.

Echelle macroscopique [Act.25].

A l'échelle macroscopique, la distance entre les fissures sub-horizontales varie entre 1,8 et 6mm (figure 1-33) avec une valeur moyenne de 3,62mm et un écart-type de 1,54mm. Elles sont nettement inférieures à celles obtenues à l'échelle de la galerie, dont la moyenne est de l'ordre de 54,6mm.

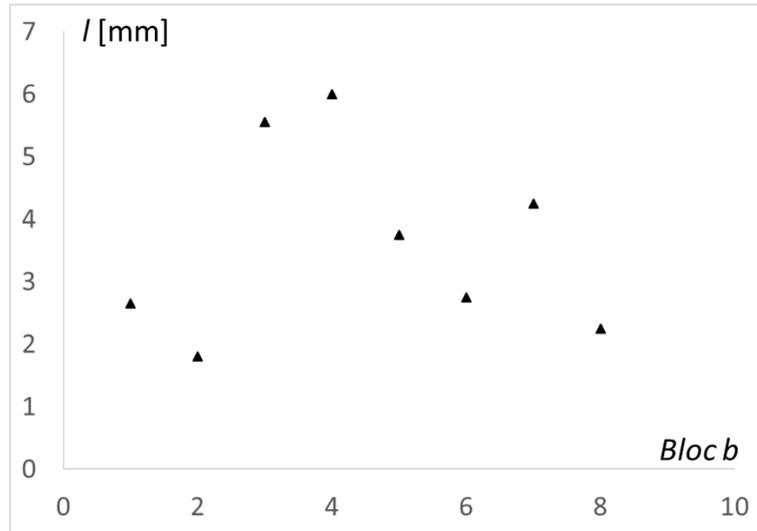


figure 1-33 : Distances entre les fissures de dessiccation sub-horizontales à l'échelle macroscopique.

La figure 1-34 présente la localisation, l'ouverture (o), le glissement (s) et l'évolution de s , α en fonction de o pour l'état extrême de chargement hydrique ($\Delta RH=65^\circ$). La figure 1-34.b montre que l'ouverture maximale varie de 0,015 à 0,082mm. Hormis cinq sous-fissures (SH13, SH14, SH15, SH16 et SH17 avec $s_{max}=-0,01$ à 0,018mm), le mode III est négligeable ($\alpha \approx 1,57$ rad) et donc la fissure évolue principalement suivant le mode d'ouverture (figure 1-34.d).

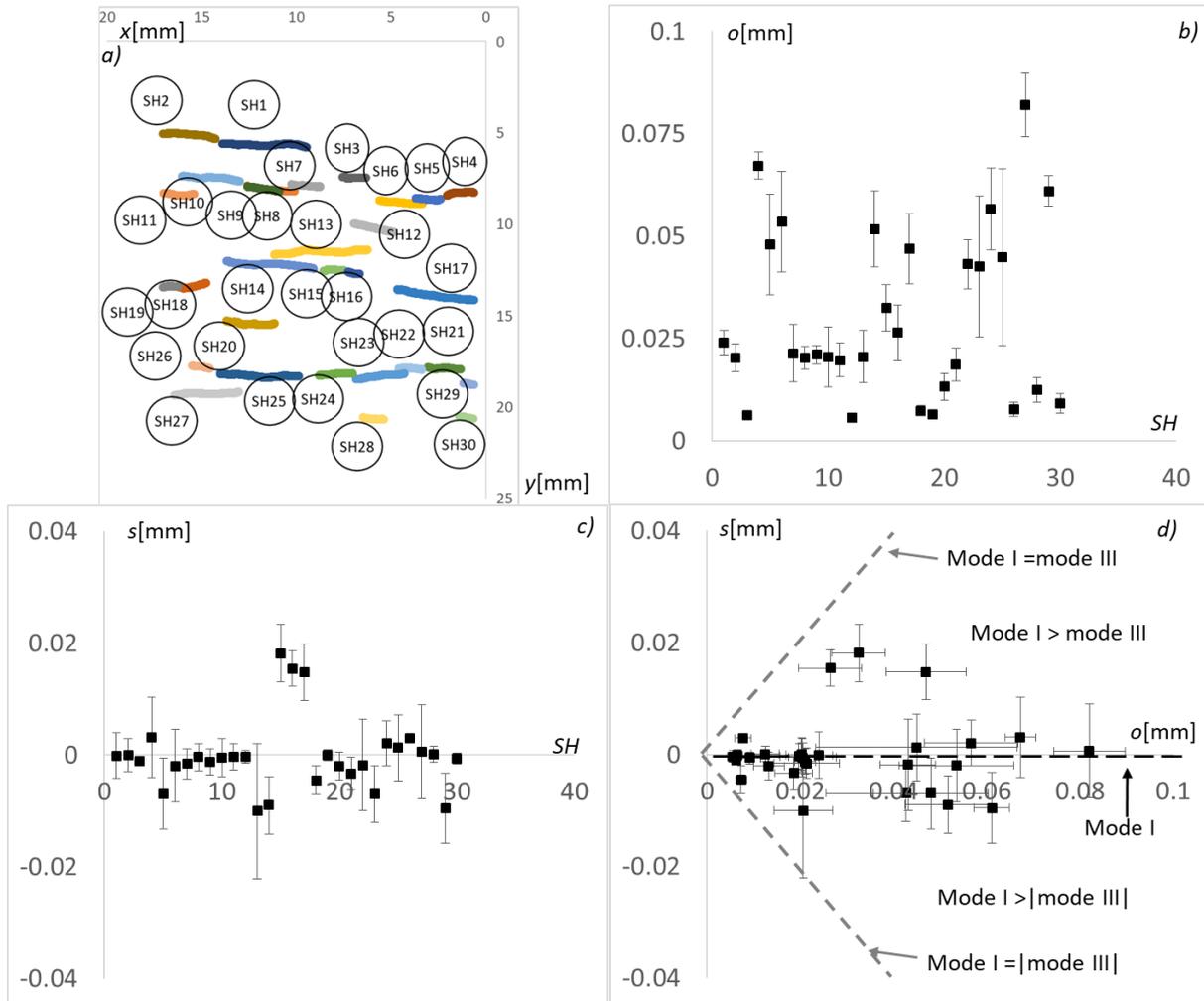


figure 1-34 : (a) localisation des 30 sous-fissures sub-horizontales (SH). (b), (c) Pour un état extrême ($\Delta RH=65\%$), valeurs moyennes o et s obtenues pour les 30 sous-fissures sub-horizontales. (d) Tracé de s en fonction o pour les 30 sous-fissures sub-horizontales

La figure 1-35 confirme une cinématique hétérogène des fissures de dessiccation sub-horizontales pendant la phase de désaturation à l'échelle macroscopique. Contrairement à la figure 1-30, aucune hystérésis n'a été mesurée car ce phénomène apparaît entre les phases de désaturation et de saturation (essai en galerie). La figure 1-35 confirme aussi que α est proche de 1,57 rad, ce qui correspond à un mode I dominant.

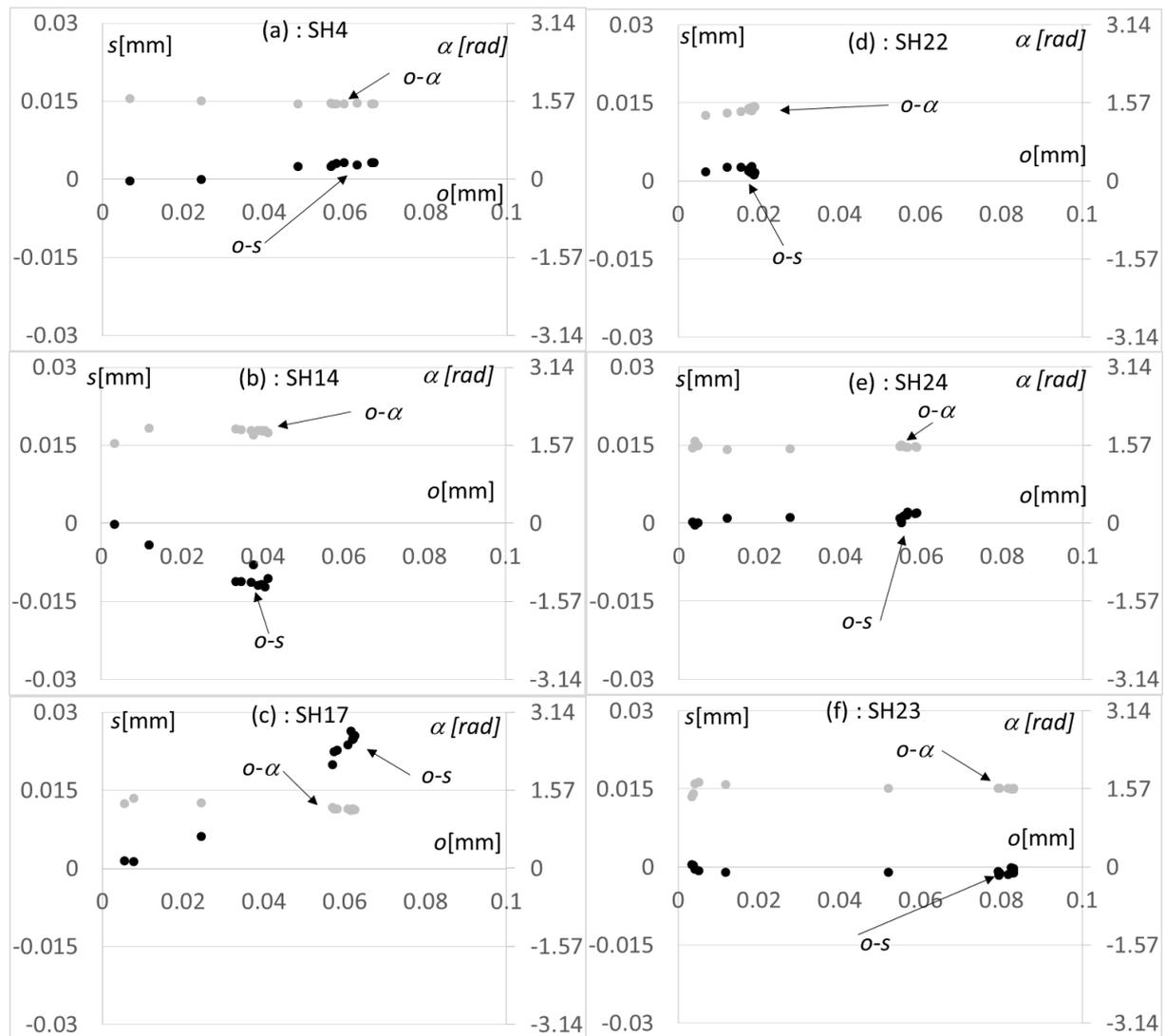


figure 1-35 : tracés de s et α en fonction o pour 6 sous-fissures sub-horizontales.

Echelle mésoscopique [Act.25].

A l'échelle mésoscopique, la figure 1-36 présente la localisation, l'ouverture (o), le glissement (s) et l'évolution de s , α en fonction de o pour l'état extrême de chargement hydrique ($\Delta RH=65^\circ$). La figure 1-36.b montre que l'ouverture maximale varie de 0,0014 à 0,0039mm. Les fissures sub-horizontales à l'échelle mésoscopique évoluent suivant un mode mixte, avec une dominance du mode I (figure 1-37). L'amplitude d'ouverture est proche de la taille du pixel. Si des ouvertures inférieures au pixel sont présentes, elles sont difficilement localisables, car le mouchetis est optimisé pour la cartographie minéralogique [51] et évolue significativement pendant l'essai, ce qui diminue la résolution de la CIN.

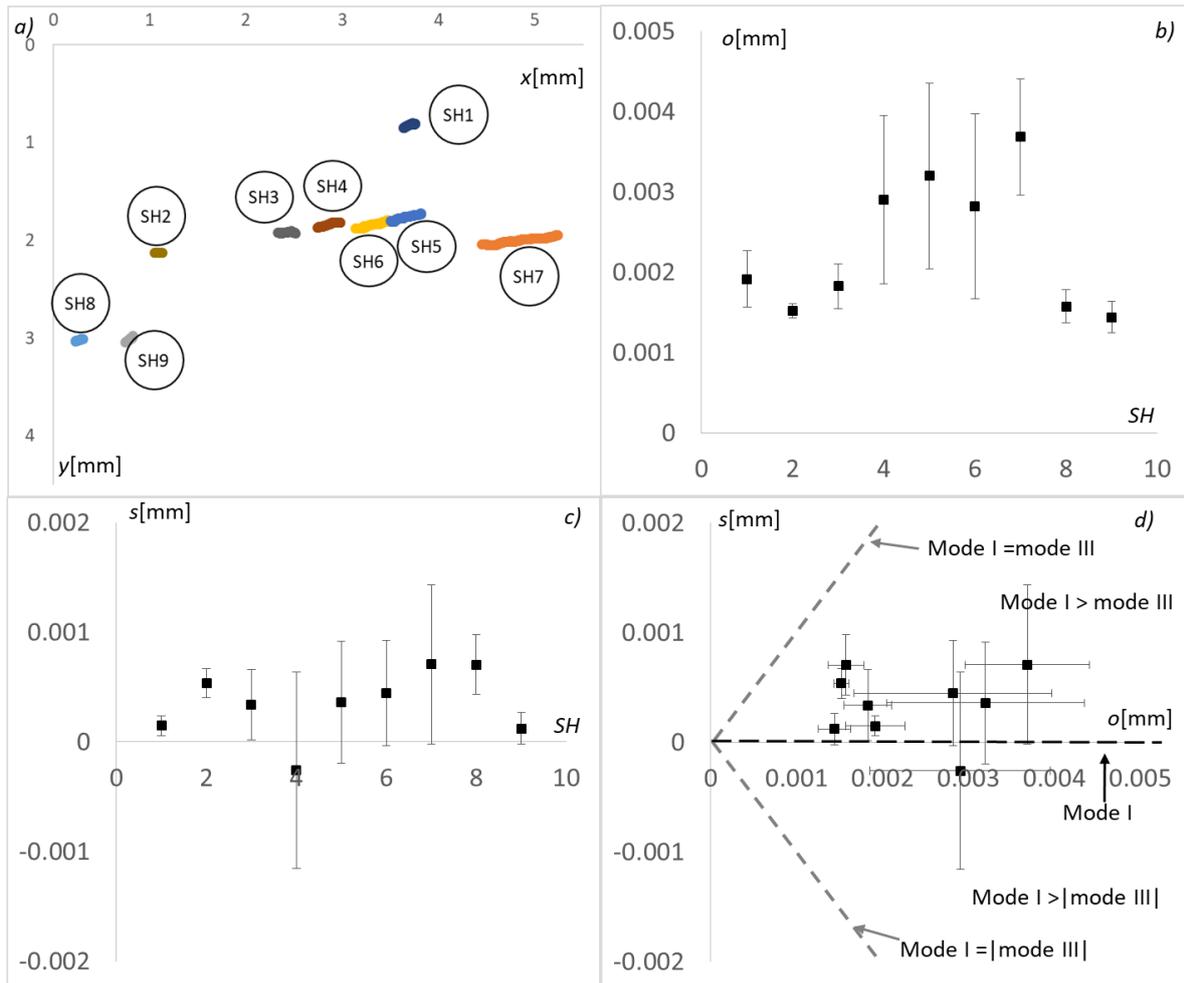


figure 1-36 : (a) localisation des 9 sous-fissures sub-horizontales (SH). (b), (c) Pour un état extrême ($\Delta RH=65\%$) valeurs moyennes o et s obtenues pour les 9 sous-fissures sub-horizontales (d) tracé de s en fonction o pour les 9 sous-fissures sub-horizontales

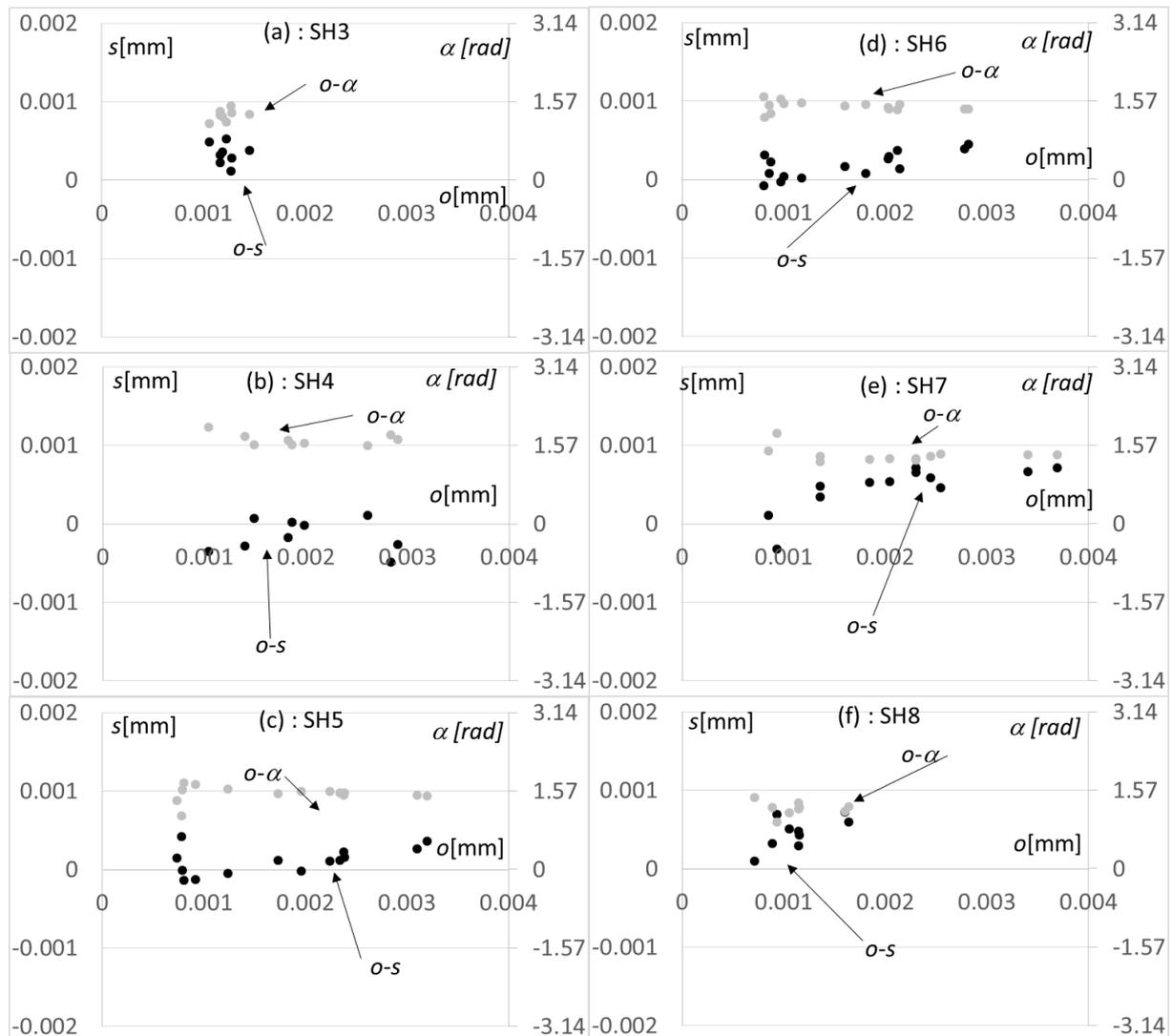


figure 1-37 : tracés de s et α en fonction o pour 6 sous-fissures sub-horizontales.

Discussion.

Nous constatons des largeurs de blocs à l'échelle de la galerie sont un ordre de grandeur plus grand qu'à l'échelle macroscopique (figure 1-38), ce qui montre la présence de fissures de dessiccation avec une distance inférieure à celle observée sur le site de Tournemire (200mm ; Cabrera et al., 2001 ; figure 1-38.a). Ces fissures de dessiccation ont une distance variant de 1,8 à 6mm pour les essais en laboratoire et de 35 à 69,4mm pour l'essai en galerie. Avec un seuil de détection de 0,14 pixels. Nos différents essais expérimentaux multi-échelles ont permis de détecter plus de 'petites' fissures et de réduire la distance entre elles. Il est aussi important de souligner qu'à l'échelle mésoscopique des fissures encore plus petites ont été détectées, mais leur nombre sur la ROI n'a pas permis de mesurer la largeur (l) des blocs.

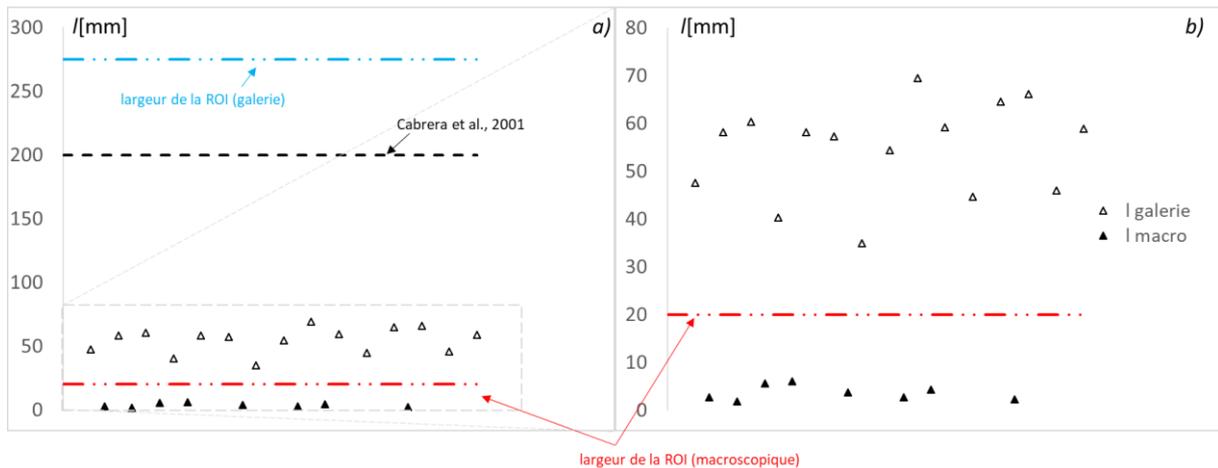


figure 1-38 : (a) Distances entre les fissures de dessiccation sub-horizontales aux échelles de la galerie et macroscopique et Cabrera et al., 2001 [6]. (b) zoom sur les distances mesurées aux échelles de la galerie et macroscopique

Ces résultats montrent que des fissures d'ouverture inférieure à $38\mu\text{m}$ (seuil de détection à l'échelle de la galerie) existent aux échelles macroscopique et mésoscopique et permettent de supposer la possible présence de fissures non détectées au sein des blocs b définis comme 'continus' à cette échelle. Ces dernières ne pouvant pas être détectées à l'échelle de la galerie car leur ouverture est inférieure à la résolution de la H-DIC, sont alors considérées comme de la déformation et correspondent au phénomène observé par Fauchille et al. 2016 [51] entre l'échelle macroscopique et mésoscopique. Pour confirmer la présence de 'petites' fissures à l'échelle de la galerie, il faudrait améliorer la résolution en diminuant les dimensions de la ROI.

Pour illustrer ces différents blocs 'continus', le schéma de la figure 1-39, basé sur nos observations, propose trois familles de fissures de dessiccations basées sur nos trois échelles d'observations et sur les valeurs d'ouverture :

- La première famille correspond aux 'grandes' fissures dont l'ouverture varie entre $100\mu\text{m}$ et $1,3\text{mm}$ (principalement visibles à l'échelle de la galerie).
- La seconde famille concerne des fissures d'ouverture moyenne dont les valeurs se situent entre 10 et $65\mu\text{m}$, soit un ordre de grandeur plus faible qu'à l'échelle précédente (principalement visibles à l'échelle macroscopique).
- La troisième et dernière famille coïncide avec des fissures dont l'ouverture est de l'ordre de quelques micromètres ($1-3,5\mu\text{m}$), soit un ordre de grandeur plus petit de celle observées à l'échelle macroscopique (figure 1-40) (principalement visibles à l'échelle microscopique).

Bien entendu, d'autres fissures peuvent exister à des échelles plus grandes (ex : failles). A l'échelle microscopique [51] sur des images MEB, Wang et al., 2014 [54] avançait des ouvertures de $1\mu\text{m}$ et de longueur $50\mu\text{m}$ sur les argilite du Cox.

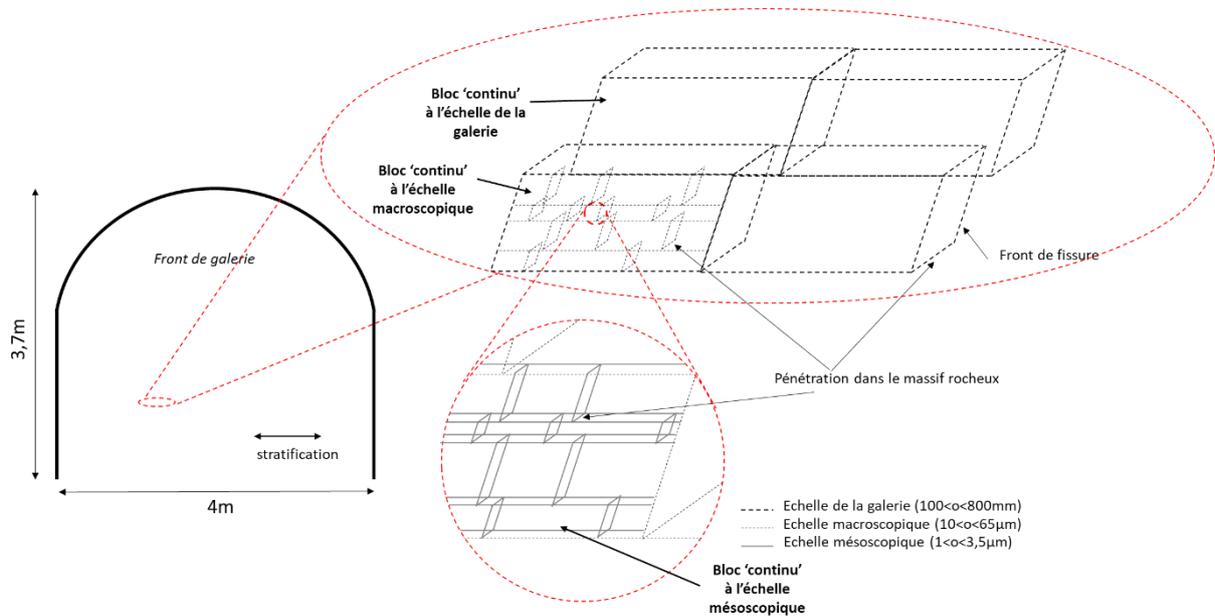


figure 1-39 : Illustration des blocs et des fissures de dessiccation.

Sur des échantillons de sol argileux soumis à une dessiccation, Hallaire [55] avait observé la présence de différents types de fissures ressemblant fortement à mes observations :

- Les fissures dites 'majeures' (i.e. grandes ouvertures) avaient une pénétration dans l'échantillon importante et délimitaient de grands blocs.
- Les fissures 'mineures' délimitant des blocs plus petits. Ces fissures se situent au sein des grands blocs.

C'est ce même effet d'échelle (entre les échelles de la galerie et macroscopique) que j'observe sur l'argilite de Tournemire avec une orientation privilégiée des fissures de dessiccation avec la stratification.

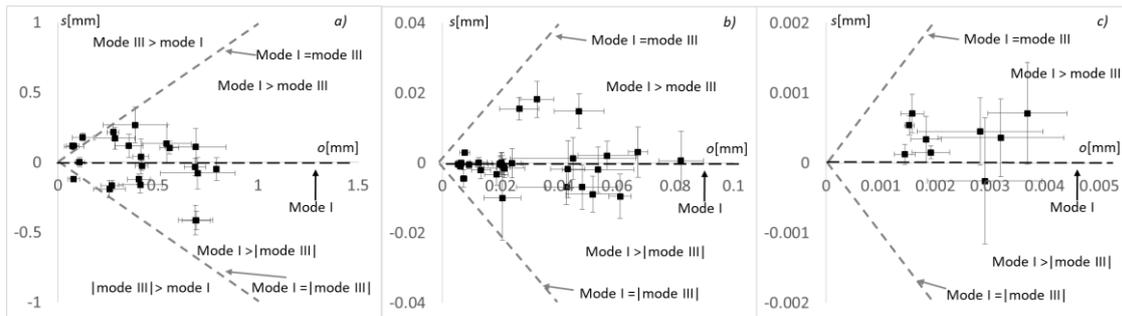


figure 1-40 : tracé de s en fonction o des fissures sub-horizontales à l'échelle de la galerie (a), macroscopique (b) et mésoscopique (c).

L'approche expérimentale mise en œuvre dans ces deux études montre une fracturation plus dense (figure 1-38) allant de 1,8 à 70mm que les observations visuelles effectuées sur le site ($\approx 20\text{cm}$), et avec une gamme de fissure allant de 0,001 à 1,26mm d'ouverture maximale mais aussi la présence de glissement des lèvres des fissures sub-horizontales. Ces mesures confirment le schéma conceptuel mettant en exergue la présence d'une ouverture et d'un glissement des fissures de dessiccation (figure 1-26).

Quelle que soit l'échelle d'observation, les fissures sub-horizontales évoluent principalement en mode mixte avec un mode I dominant (figure 1-40). De plus, les champs cinématiques montrent la présence de fissures sub-verticales (figure 1-17 et figure 1-19) qui vont être analysées sur le même principe.

1.3.3 Fissures sub-verticales [Act.24].

Echelle de la galerie.

Comme pour les fissures sub-horizontales, la figure 1-41 présente la localisation, l'ouverture et le glissement de treize sous-fissures sub-verticales pour le chargement extrême ($\Delta\text{RH}=73.71\%$, $\Delta\text{T}=7.22^\circ\text{C}$). La figure 1-42 présente l'évolution du glissement et de l'orientation du mode de fracturation par rapport à l'ouverture sur une période d'un an.

Ces nouveaux résultats permettent aussi de tracer l'évolution de l'ouverture par fonction du glissement et de l'angle α pour chaque sous-fissure. L'ensemble de ces évolutions est tracé sur une période annuelle. Les tracées de ces six sous-fissures sub-verticales choisies présentent différents comportements (ouverture maximale, glissement maximal, modes) et dont voici les principales observations :

- L'ouverture maximale varie de 0,05 à 0,82mm,
- L'ouverture maximale des fissures sub-verticales du même ordre de grandeur que les fissures sub-horizontales,

- Le glissement maximal varie de -0,14 à 0,56mm,
- La majorité des fissures évoluent en mode mixte mais avec une dominance du mode I,
- Les fissures (SV7, SV3, SV12) évoluent selon le mode I ($\alpha \approx 1.57$ rad) (figure 1-41),
- En mode mixte, des phénomènes d'hystérésis (SV8 ; figure 1-42.b) sont visibles entre les périodes de désaturation et de saturation. Pour d'autres fissures (SV1, SV4), ce phénomène n'est pas observable, alors que l'ouverture peut être grande (> 0,4mm).

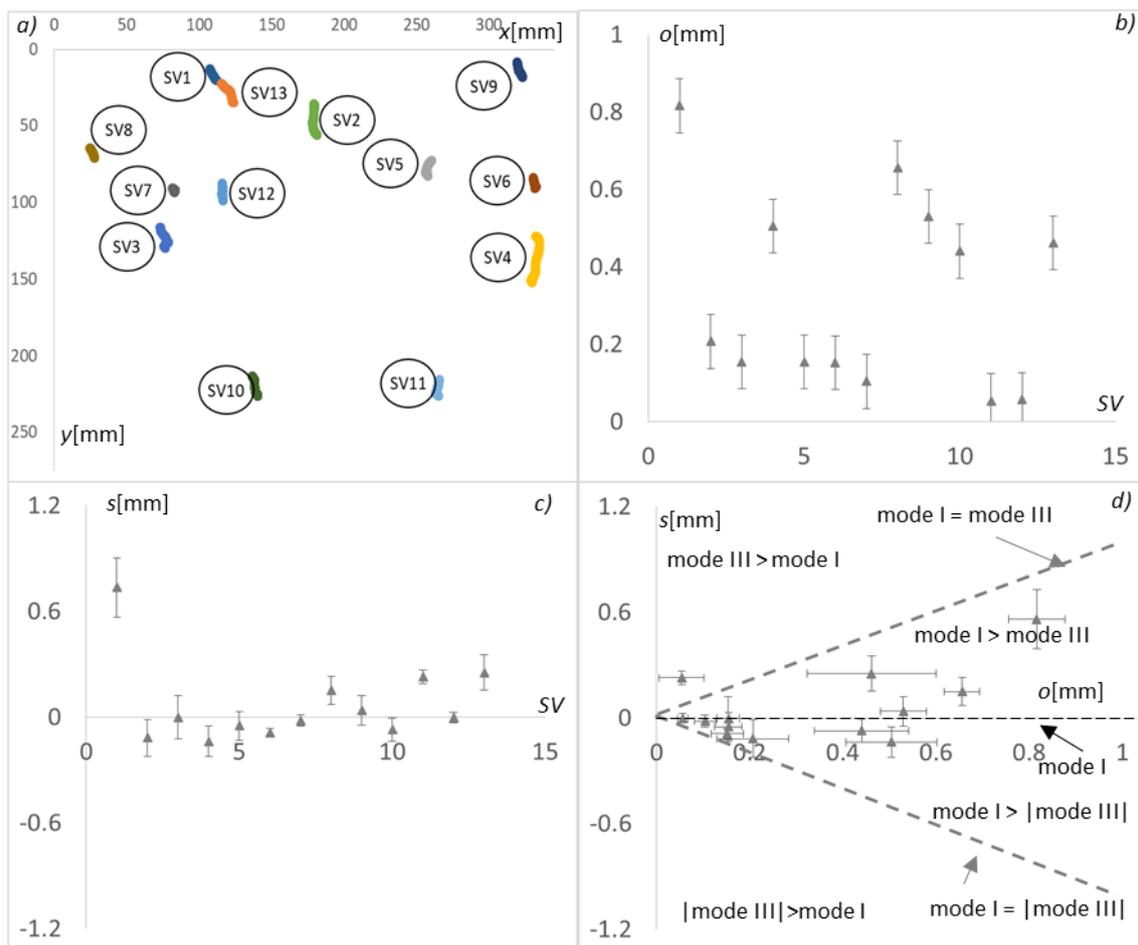


figure 1-41 : (a) localisation des 13 sous-fissures sub-verticales (SV). (b), (c) Pour un état extrême ($\Delta RH=73.71\%$, $\Delta T=7.22^\circ C$) valeurs moyennes o et s obtenues pour les 13 sous-fissures sub-verticales (SV) (d) tracé de s en fonction o pour les 13 sous-fissures sub-verticales (SV).

Induites par des valeurs d'anisotropie étendues (2,84 à 5,42) et la possible présence de mouvement entre les blocs, la synthèse et la compréhension du comportement des fissures

de dessiccation sont extrêmement complexes. La forte hétérogénéité (anisotropie, fissures, microstructure, ...) de nos résultats expérimentaux complexifie des approches par modélisation numérique (exemple : XFEM) pour étudier conjointement le comportement hydromécanique de la roche, sa fracturation et faire des comparaisons directes numérique/expérimental.

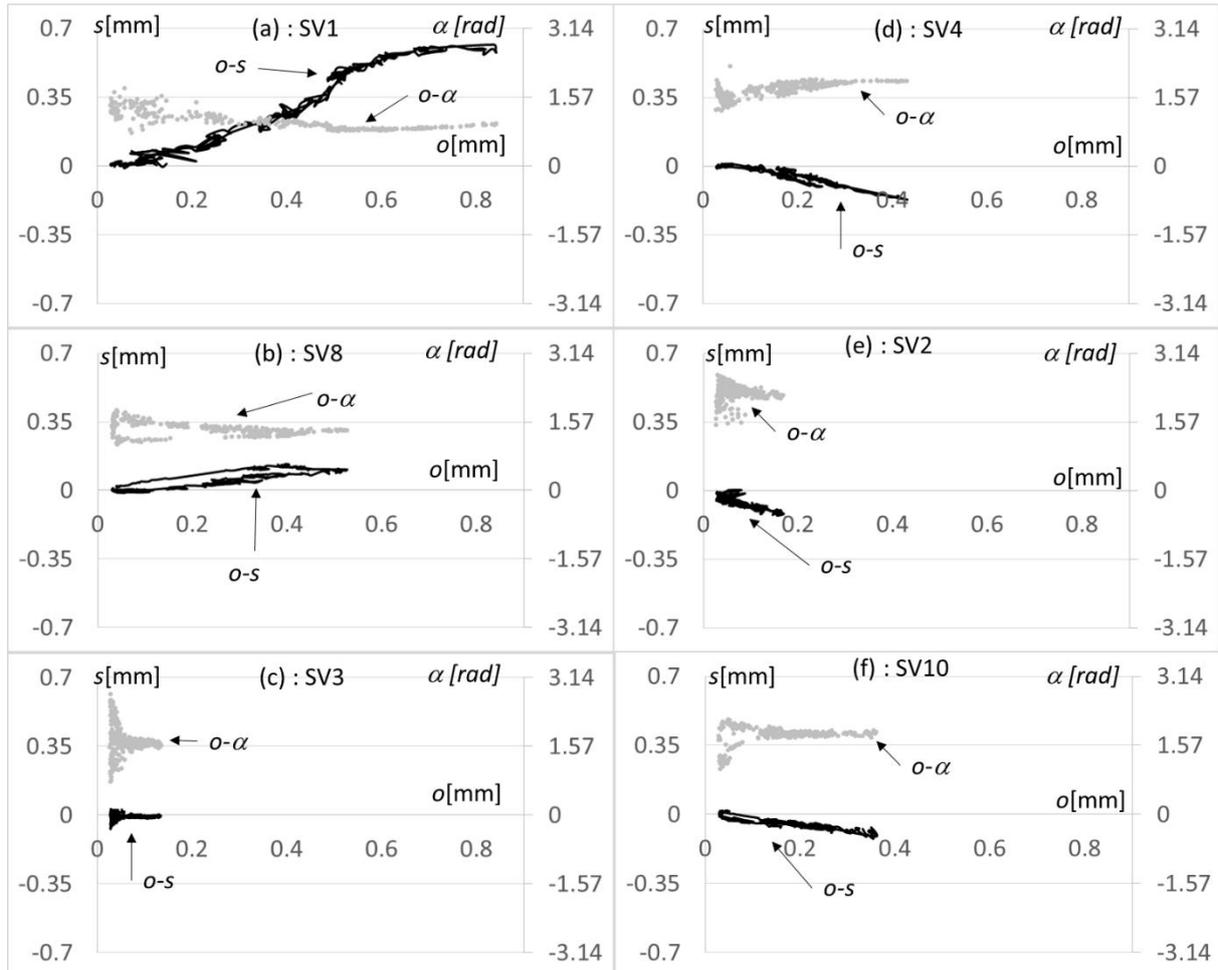


figure 1-42 : tracés de s et α en fonction o pour 6 fissures sub-verticales sur une période d'un an.

Comme pour les fissures sub-horizontales, la figure 1-43.a et la figure 1-43.b montrent la position des fissures sub-verticales pour N_{max} et CA_{max} . La figure 1-43.c exprime la quantité de domaines fracturés en fonction de θ_H . Pour rappel, la valeur $\beta_H = 0,19$ rad correspond à l'orientation de la stratification par rapport à l'axe x et la figure 1-43.d confirme que les fissures verticales sont principalement perpendiculaires à cette direction. Ces résultats confirment que les domaines fracturés sont majoritairement des fissures correspondantes aux fissures sub-horizontales (figure 1-32 et figure 1-43). Contrairement aux fissures sub-horizontales, la figure 1-43 montre une fracturation composée de fissures sub-verticales plus

éparpillées et moins continues. Comme pour les fissures sub-horizontales, les figure 1-43.c,d montrent un nombre supérieur de pixels fracturés pour l'état N_{max} que pour l'état CA_{max} , mais avec des gammes d'ouverture et de glissement plus étroites.

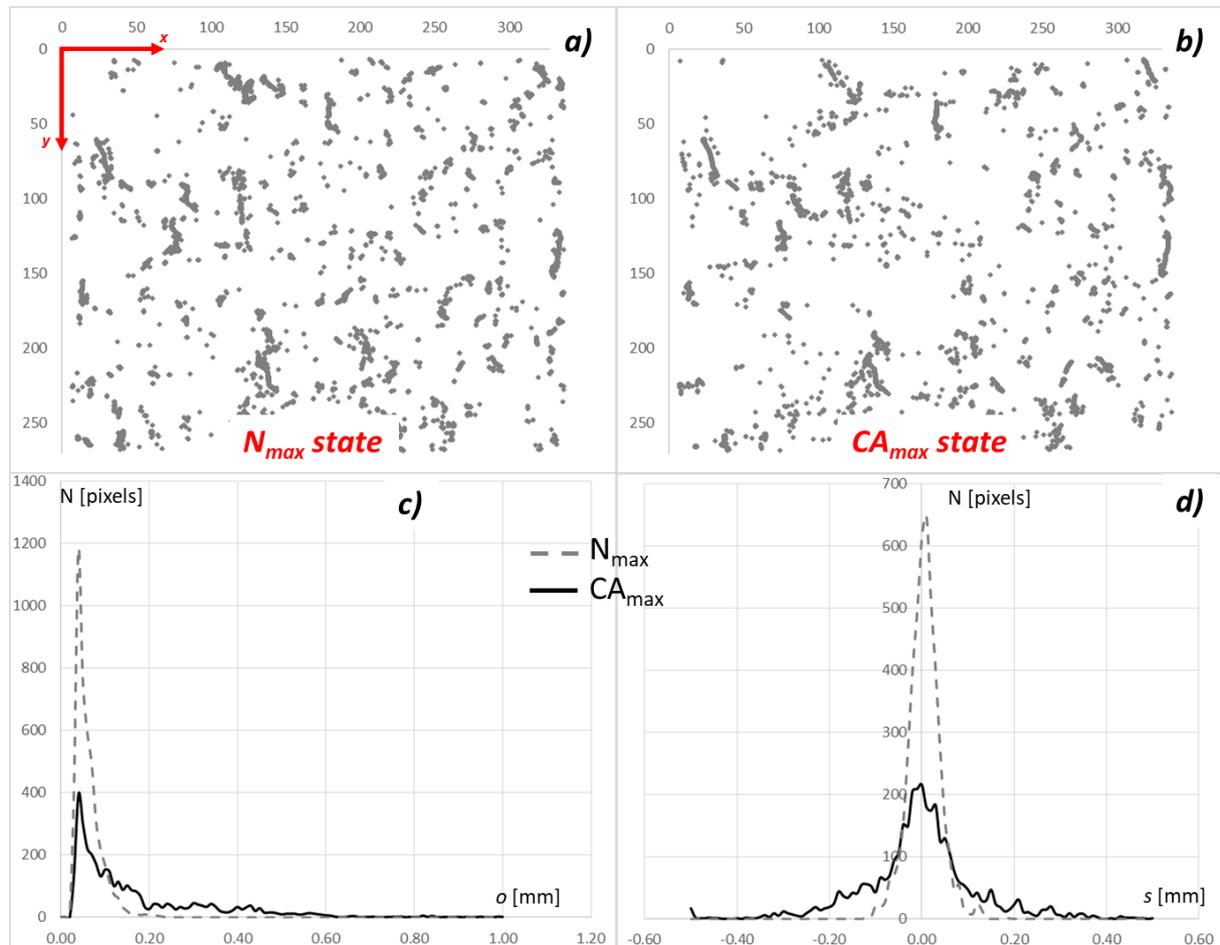


figure 1-43 : Pour les états N_{max} et CA_{max} : (a,b) localisation des fissures sub-verticales. (c, d) fréquences des domaines fracturés correspondant aux fissures sub-verticales en fonction de o et s [Act.24].

Echelle macroscopique [Act.25].

La figure 1-44 présente la localisation, l'ouverture (o), le glissement (s) et l'évolution de s , α en fonction de o pour l'état extrême de chargement hydrique ($\Delta RH=65^\circ$). La figure 1-44.b montre que l'ouverture maximale varie de 0,013 à 0,04mm. Ces fissures sub-verticales évoluent suivant un mode mixte avec comme mode principal, le mode I (figure 1-44.d et figure 1-45).

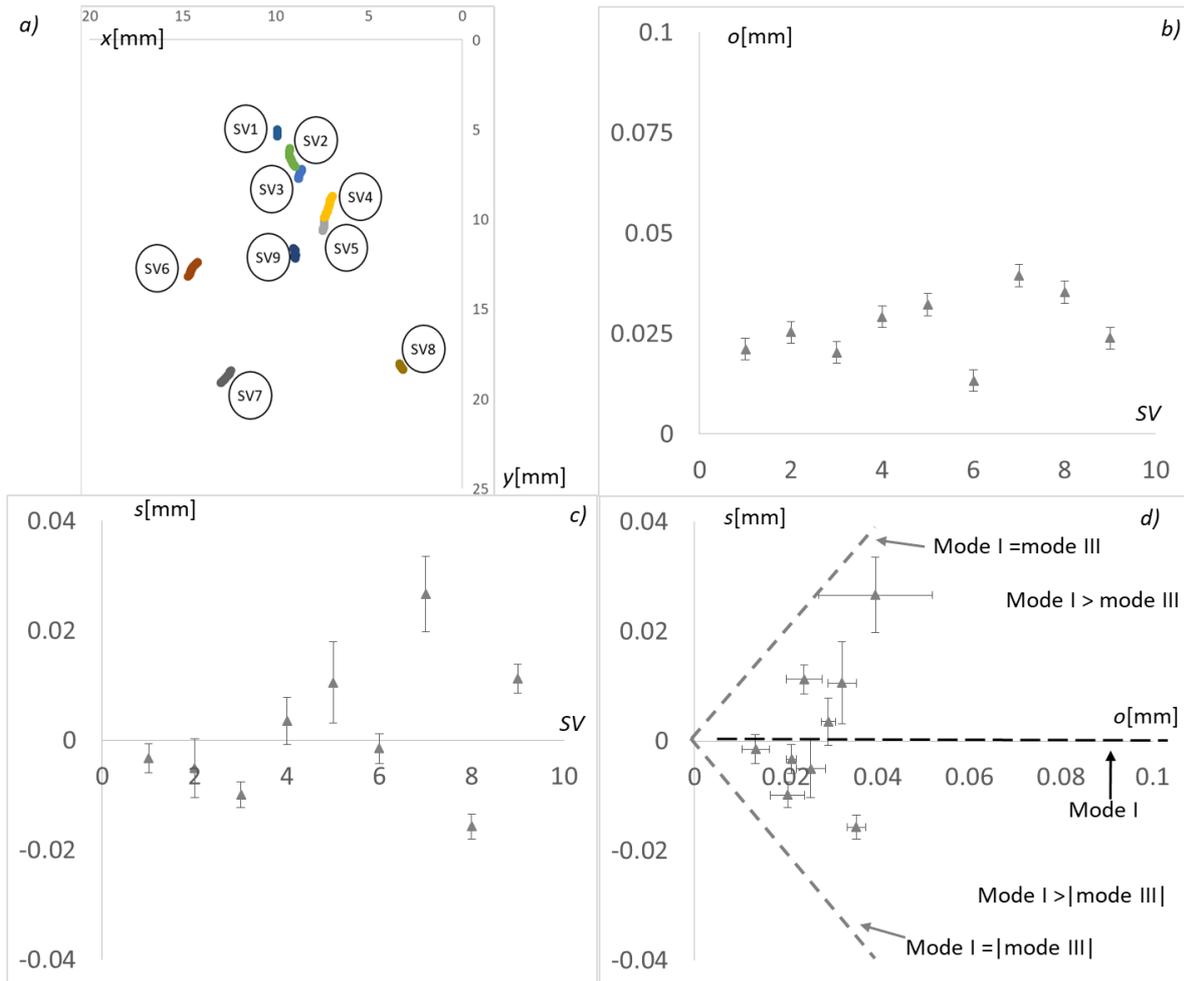


figure 1-44 : localisation des 9 sous-fissures sub-verticales (SV). (b), (c) Pour un état extrême ($\Delta RH=65\%$) valeurs moyennes o et s obtenues pour les 9 sous-fissures sub-verticales (d) tracé de s en fonction o pour les 9 sous-fissures sub-verticales.

La figure 1-45 confirme une cinématique hétérogène des fissures de dessiccation sub-verticales lors d'une phase de désaturation à l'échelle macroscopique et, contrairement à la figure 1-42, aucune hystérésis n'est mesurée car l'échantillon n'a été soumis qu'à une phase de dessiccation. La figure 1-45 confirme aussi qu' α est proche de 1,57 rad, ce qui correspond à un mode mixte avec un mode I dominant.

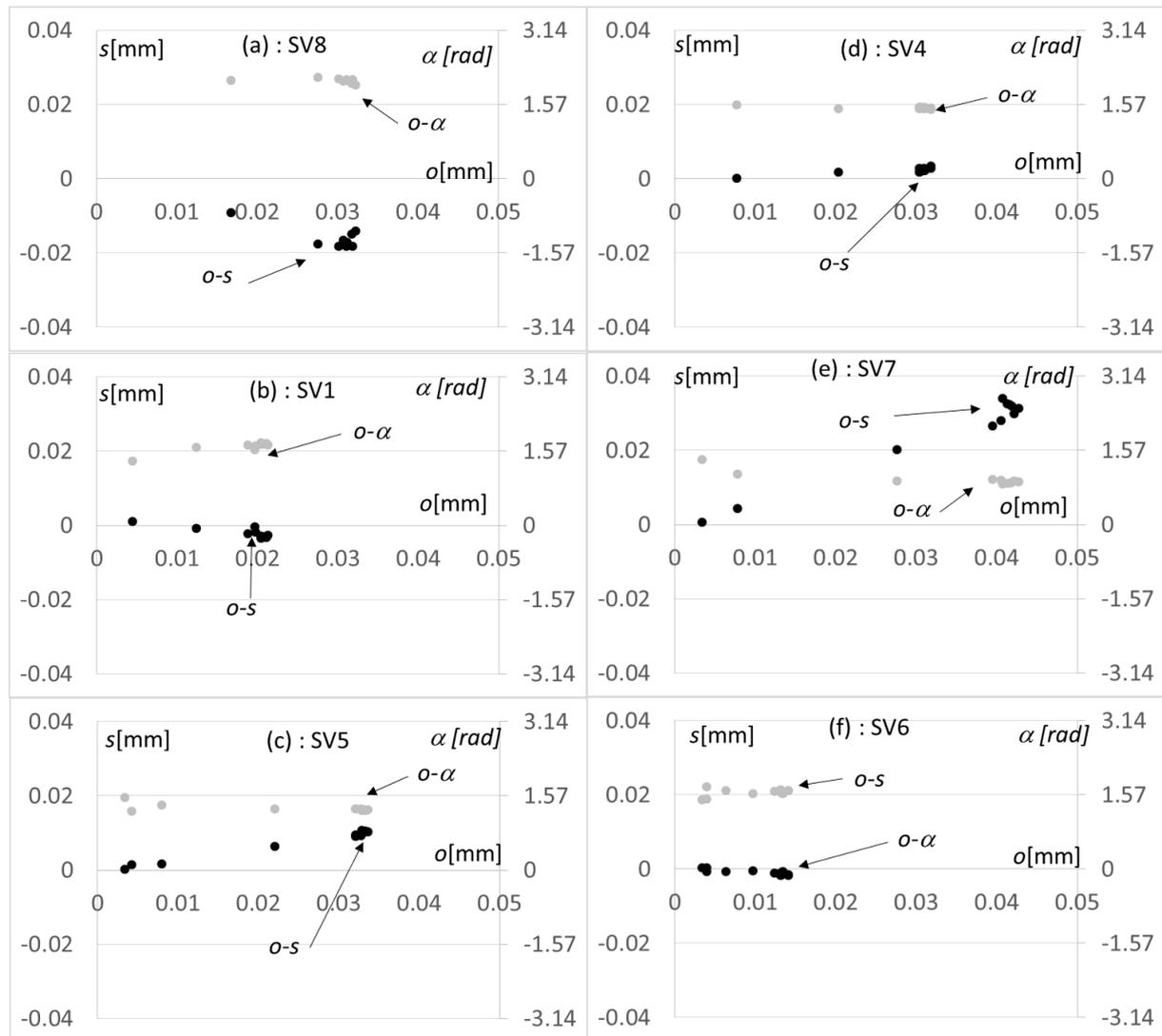


figure 1-45 : tracés de s et α en fonction o pour 6 sous-fissures sub-verticales.

Discussion.

Les approches expérimentales mises en œuvre dans ces deux études (galerie et laboratoire) montrent la présence de fissures sub-verticales qui s'ouvrent et glissent. Ce phénomène n'a jamais été décrit dans la littérature auparavant. A l'échelle mésoscopique, aucune fissure sub-verticale n'a été observée, (i) soit parce que l'ouverture est inférieure à la précision de mesure ou (ii) soit parce qu'aucune fissure n'est présente. L'ouverture maximale des fissures sub-verticales varie de 0,01 à 1,2mm et l'amplitude du glissement est du même ordre de grandeur. Ces mesures confirment le schéma conceptuel proposé de la figure 1-26. Quelle que soit l'échelle d'observation, les fissures sub-verticales évoluent principalement en mode mixte avec un mode I dominant.

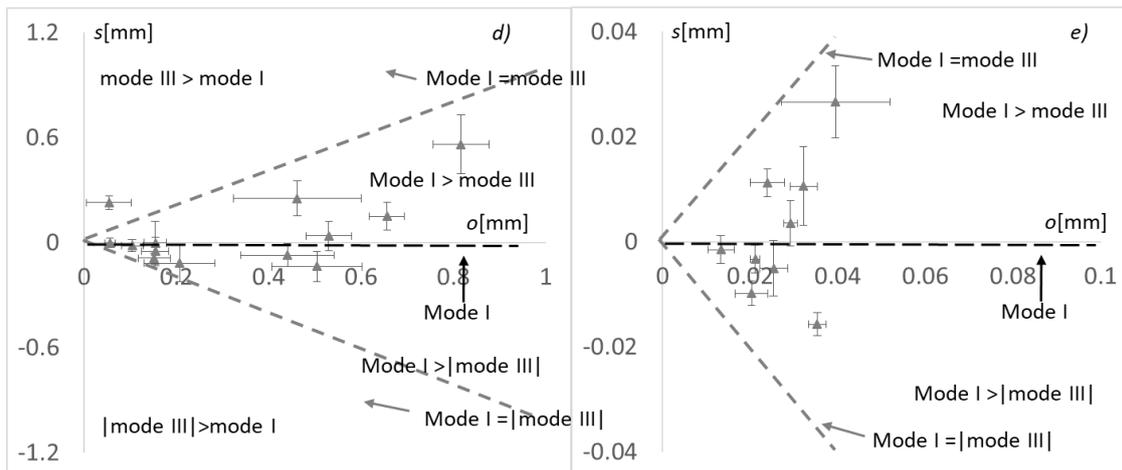


figure 1-46 : tracé de s en fonction o des fissures sub-verticales à l'échelle de la galerie (a) et macroscopique (b).

1.3.4 Aire fracturée et porosité surfacique des fissures [Act.24].

Cette fracturation composée de fissures sub-horizontales et sub-verticales entraîne une modification des propriétés mécaniques de la roche (ex : endommagement), mais aussi de perméabilité à l'eau et au gaz [5,56]. Il est proposé dans cette partie de mesurer l'aire fracturée et la porosité surfacique des fissures et d'asseoir la force de la H-DIC (i.e. précision sub-pixel et mesures automatiques) par rapport aux techniques classiques basées sur l'analyse d'images [57–59].

En effet, les méthodes, utilisées dans la littérature, sont basées sur l'analyse d'images et la mesure d'aire fracturée est très fortement liée à :

- L'ouverture locale des fissures,
- Au contraste entre ces fissures et le matériau (i.e. phase solide)
- La valeur seuil choisie pour définir si le pixel appartient ou non à une fissure.

Après seuillage et binarisation, ces approches consistent à compter le nombre de pixel qui correspond à l'aire fracturée. La précision de l'ouverture locale de ces approches est de l'ordre du pixel.

Dans nos études, les images acquises ne permettent pas d'envisager l'emploi de ces techniques, mais la mesure spatialisée de l'ouverture locale ($o(x,y)$) permet de calculer l'aire fracturée (CA) pour chaque état déformé analysé (t) (équation 1-14).

En première approche, l'aire fracturée locale (x, y) correspond à l'ouverture locale ($o_i(x, y)$) multipliée par la largeur de la droite matérialisant la fissure $l_f(x, y)$. J'ai imposé une largeur de la droite matérialisant la fissure égale à la largeur du pixel ($l=1$).

$$CA(t) = \sum_{i=0}^N o_i(x, y, t) \cdot \gamma \times l_f(x, y, t) \cdot \gamma$$

équation 1-14

$$= \gamma^2 \cdot \sum_{i=0}^N o_i(x, y, t)$$

avec : $l_f(x, y) = 1$, γ le grandissement ($\gamma=0,269$, $0,01$ et $0,0022\text{mm}\cdot\text{pixel}^{-1}$ aux échelles de la galerie, macroscopique et mésoscopique) et o_i la valeur de l'ouverture des fissures de dessiccation pour $o \geq 0.14$ pixel (i.e. 38 , $1,4$ et $0,31\mu\text{m}$, respectivement). Pour rappel, cette valeur seuil a été obtenue à partir d'une étude de sensibilité de la H-DIC sur des images numériques simulant l'ouverture et le glissement d'une fissure [Act.2].

Echelle de la galerie [Act.24].

L'analyse de la figure 1-48 et du tableau 1-9 permet d'observer cinq résultats marquants :

- L'aire fracturée (CA) augmente 'linéairement' avec le nombre de pixels fracturés, jusqu'à un nombre maximal de domaines fracturés ($N_{\max}=12193$ pixels), sur un total de $1,09 \cdot 10^6$ pixels (i.e. $ROI \approx 79186\text{mm}^2$).
- Malgré un nombre maximal de domaines fracturés, l'aire fracturée (CA) n'est que de $227,5\text{mm}^2$, traduisant la présence d'une grande quantité de domaine fissuré, mais dont l'ouverture locale est faible. On parle alors de fissures (petites, moyennes et grandes) ayant une petite ouverture. La porosité de surface des fissures ($\phi_{\text{fissure}}=CA/ROI$) est à cet instant de $0,29\%$ (tableau 1-9).
- Une fois toutes les fissures ouvertes, il s'ensuit une période ouverture/fermeture en fonction de l'hygrométrie dans la galerie, jusqu'à une aire fracturée maximale (CA_{\max}) de $595,8\text{mm}^2$ obtenue pour des écarts d'humidité relative et de température maximales ($\Delta HR=72,7\%$ et $\Delta T=7,9^\circ\text{C}$) (figure 1-49 et tableau 1-9).
- A cet instant, le nombre de domaines fracturés n'est plus que de 9444 (tableau 1-9), soit une diminution d'environ 2750 domaines pour lesquels la H-DIC ne détecte pas de fissures parce que l'ouverture est inférieure à la valeur seuil. Ces fissures sont alors considérées comme fermées. Ceci peut être interprété par une dominance des moyennes et grandes fissures à s'ouvrir préférentiellement, au détriment des petites qui se referment. L'ouverture produit des efforts de traction qui se traduisent par des efforts de compression sur les fissures au voisinage. Si les efforts de compression sont supérieurs aux

efforts de traction, cela entraîne leur fermeture. La différence entre les 'grandes', les 'moyennes' et les 'petites' est peut-être leur pénétration/profondeur (a) dans le massif rocheux qui peut aussi avoir une conséquence sur leur ouverture maximale (figure 1-47). A cet état extrême de chargement, la porosité de surface des fissures ($\phi_{fissure}$) correspond à 0,75% de la surface étudiée (tableau 1-9).

- Une fois l'aire fracturée maximale atteint, il s'ensuit une nouvelle période ouverture/fermeture en fonction de l'hygrométrie dans la galerie, jusqu'à une fermeture complète et un retour à un état proche de l'état initial ($CA \approx 0$).

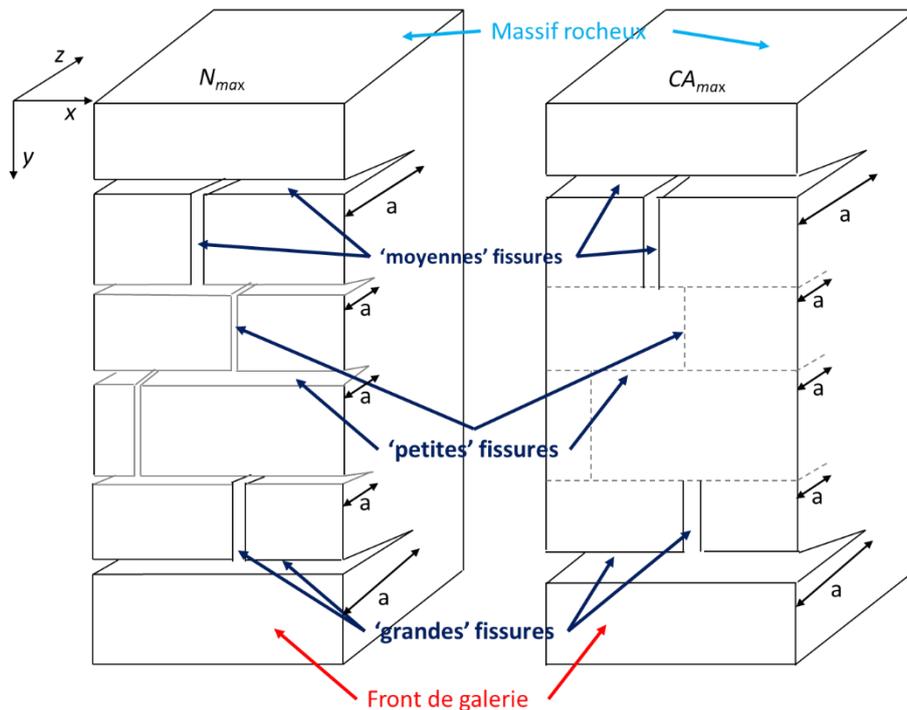


figure 1-47 : Schéma du massif rocheux présentant l'ouverture des fissures à deux instants (N_{max} et CA_{max}).

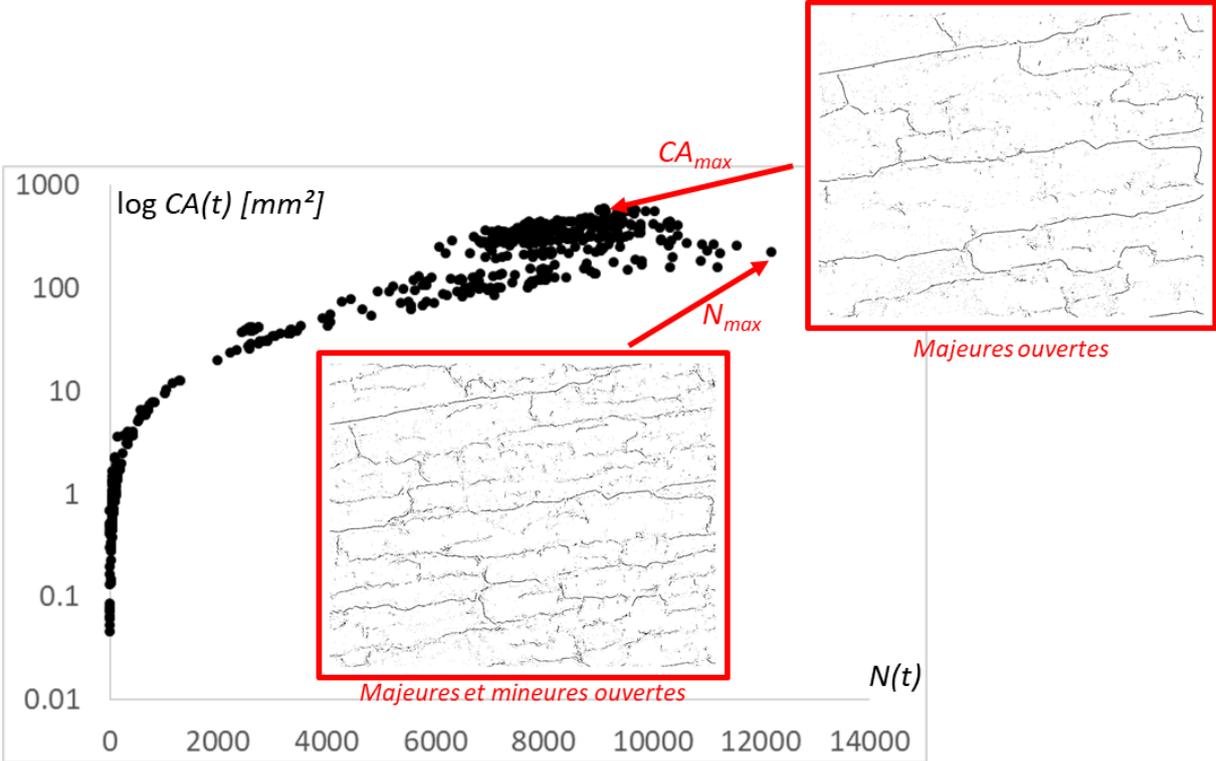


figure 1-48 : Evolution de log CA en fonction du nombre de domaines $N(t)$.

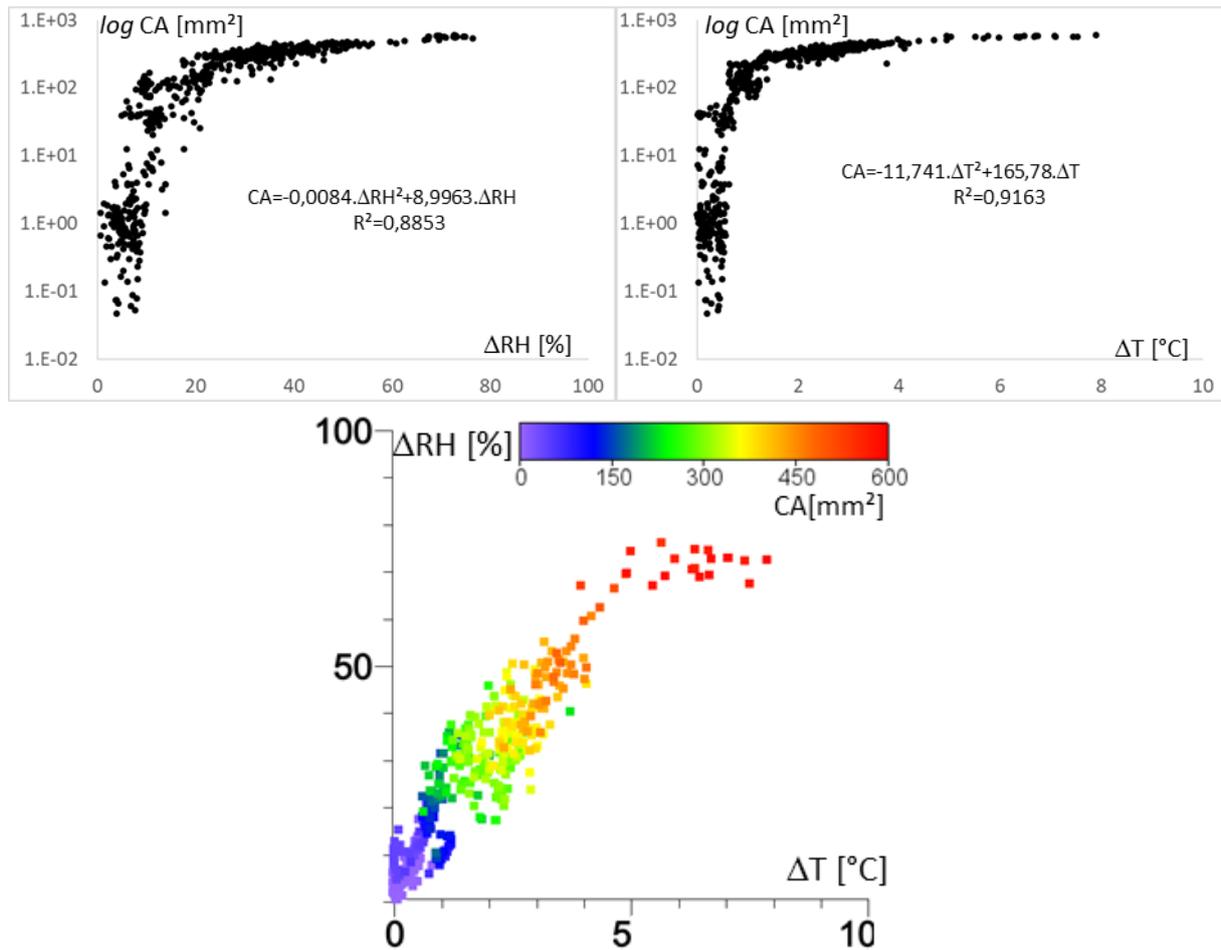


figure 1-49 : Evolutions de $\log CA$ en fonction de (a) ΔRH et de (b) ΔT . (c) Comparaison de CA avec ΔRH et ΔT .

Lorsque l'on trace l'évolution de $\log CA$, CA_{max} est proche des valeurs extrêmes de $\Delta H = 72,7$ et $\Delta T = 7,9^\circ\text{C}$ (figure 1-49). En première approche, CA évolue par rapport à ΔH et ΔT selon un polynôme de degré 2 (figure 1-49.a,b).

La figure 1-49.c montre explicitement la corrélation entre CA et l'hygrométrie dans la galerie avec des valeurs de CA faibles lorsque ΔRH et ΔT sont faibles et des valeurs de CA grandes lorsque ΔRH et ΔT sont significatifs.

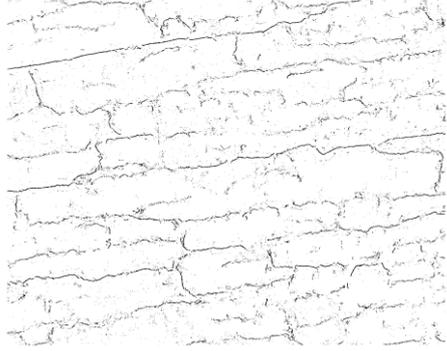
Etat	N_{max}	CA_{max}
Date	2011/10/21	2012/2/13
Localisation des fissures de dessiccation		
ΔHR [%]	35,22	72,7
ΔT [°C]	1,16	7,9
N [pixels]	12193	9444
CA [mm ²]	227,5	595,8
$\phi_{fissure}=CA/ROI$	0,29%	0,75%

tableau 1-9 : synthèse des valeurs pour deux états (N_{max} et CA_{max}).

Echelle macroscopique [Act.25].

La figure 1-50 présente l'évolution de l'aire facturée en fonction de ΔHR et de la teneur en eau massique w . Cette dernière a été obtenue via la mesure de la masse de l'échantillon pendant la phase de désaturation et de la masse sèche après essai. La teneur en eau massique ($w=3,17\%$) au début de l'essai est proche de l'état saturée de la roche [60].

L'aire fracturée maximale est de l'ordre de $2,6\text{mm}^2$ (figure 1-50), obtenue pour une différence d'humidité relative (ΔHR) de 65%. Pour cet état déformé, le rapport maximal (CA/ROI_{maxi}) entre l'aire fracturée et la taille de la ROI correspond à 0,97%.

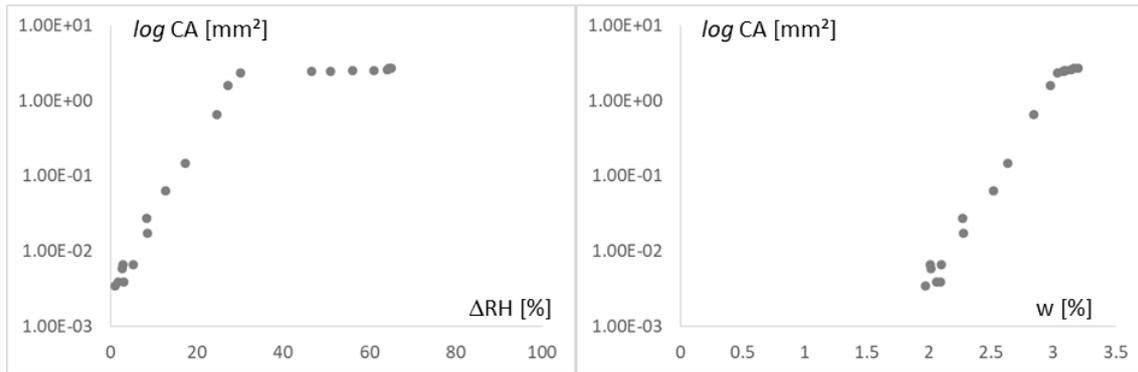


figure 1-50 : Evolutions de log CA en fonction de (a) ΔRH et de (b) la teneur en eau massique w [%].

Echelle mésoscopique [Act.25].

A l'échelle mésoscopique, l'aire fracturée maximale est de l'ordre de $0,05\text{mm}^2$ (figure 1-51), soit un rapport maximal (CA/ROI_{maxi}) de 0,233%. Cette valeur est significativement inférieure aux valeurs obtenues en galerie et à l'échelle macroscopique.

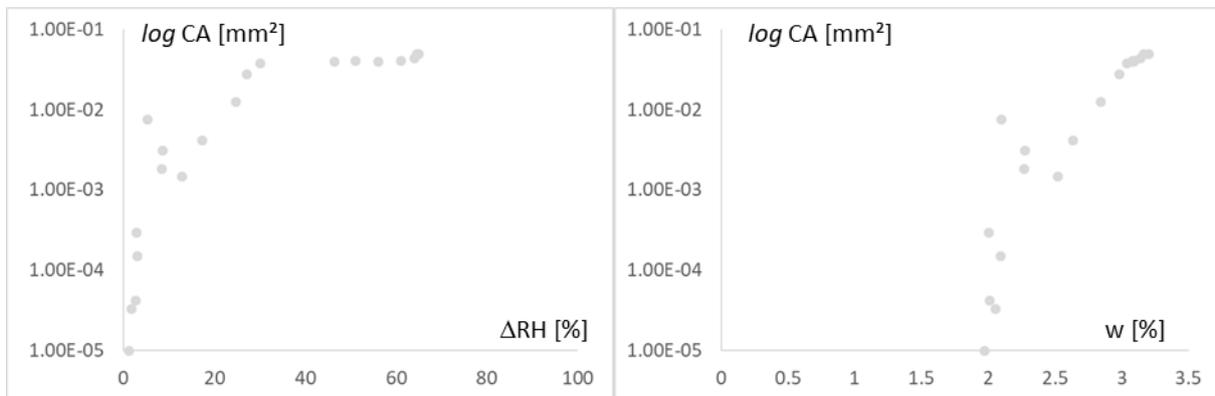


figure 1-51 : Evolutions de log CA en fonction de (a) ΔRH et de (b) la teneur en eau massique w [%]

Discussion.

La mesure de l'aire fracturée au cours d'un cycle annuel en galerie ou en laboratoire lors d'une dessiccation permet de confirmer des effets d'échelles sur l'aire fracturée. Cette fracturation joue un rôle important et doit être pris en compte dans le transfert de fluides. Bien évidemment la connaissance de la porosité (volume poreux, géométrie du réseau et taille des pores) ainsi que les isothermes de sorption sont nécessaires pour les modèles hydromécaniques, mais cette fracturation induite en surface une porosité de fissures qui me semble nécessaire de considérer. Pour cela, je peux aussi calculer la porosité de surface des

fissures ($\phi_{fissure}$) au cours du temps. Pour rappel, la porosité de la roche non endommagée de Tournemire est de l'ordre de 7 à 8% [60].

La figure 1-52.a présente l'évolution de $\log CA$ en fonction de ΔRH et montre clairement que l'aire fracturée totale augmente de quatre ordres de grandeur en fonction de l'échelle d'observation (galerie, macroscopique et mésoscopique). Les valeurs de CA varient entre $0,05\text{mm}^2$ et $595,8\text{mm}^2$.

Lorsque, je normalise les valeurs de CA par rapport l'aire de la région d'intérêt (ROI), la figure 1-52.b montre que $\phi_{fissure}$ est plus importante à l'échelle macroscopique (0,97%) que celle mesurée à l'échelle de la galerie (0,75%). A l'échelle mésoscopique, $\phi_{fissure}$ atteint 0,2%.

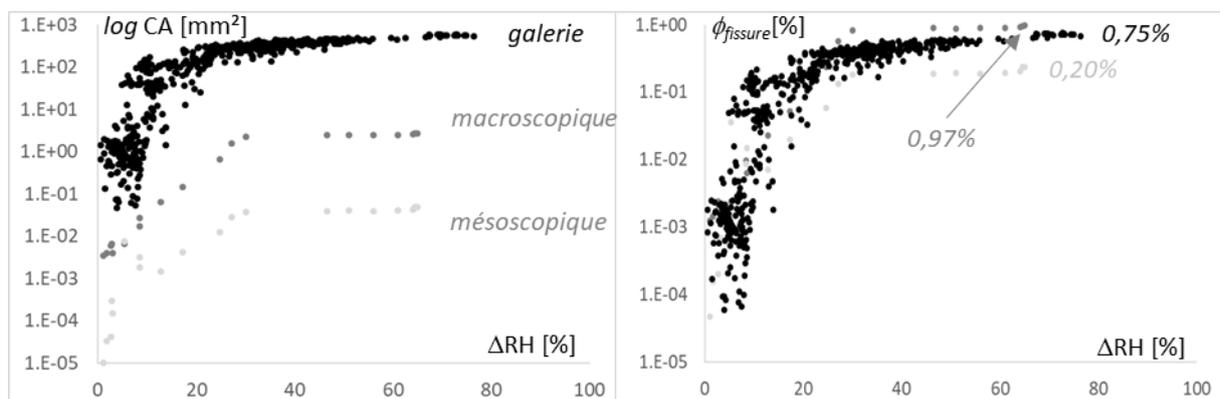


figure 1-52 : (a) Evolutions de $\log CA$ en fonction de ΔRH pour les échelles de la galerie, macroscopique et mésoscopique. (b) Evolutions de $\log \phi_{fissure}$ en fonction de ΔRH pour les échelles de la galerie, macroscopique et mésoscopique

1.3.5 Exploitation des champs d'ouverture (o).

Comparaison entre porosité surfacique de fissures et déformations.

L'ensemble de ces données expérimentales (déformations, fracturation) permet de mieux comprendre le comportement hydromécanique de l'argilite de Tournemire à différentes échelles.

Outre les comparaisons directes (déformations des blocs, ouverture, glissement) issues de la H-DIC avec les variables d'état, l'apport de ces nouvelles grandeurs permet de coupler ces grandeurs entre elles. J'ai concentré les figures suivantes sur la relation entre les déformations surfaciques moyennes à l'échelle de la ROI ($\overline{\varepsilon}_{s ROI}$), les déformations surfaciques moyennes des blocs ($\overline{\varepsilon}_{s blocs}$) et la porosité surfacique des fissures ($\phi_{fissure}$).

En galerie et pendant la durée de l'étude (≈ 1 an), on admet facilement qu'à l'échelle de l'ingénieur, la roche argileuse (phase solide + porosité) ne subit pas de variations de volume et donc que les déformations de retrait mesurées dues aux variations d'hygrométrie, génèrent une ouverture des fissures de dessiccation.

En laboratoire les faces extérieures de l'échantillon étant libres, le volume de l'échantillon diminue lors de la phase de déshydratation due la fermeture des fissures et à la diminution de volume de la phase solide. Dans les deux cas d'étude, les analyses menées sont planes, et les grandeurs mesurées sont $\overline{\varepsilon_{s ROI}}$, $\overline{\varepsilon_{s blocs}}$, $\phi_{fissure}$ et sont liées entre elles par la relation suivante :

$$\overline{\varepsilon_{s ROI}} = \overline{\varepsilon_{s blocs}} + \phi_{fissure} \quad \text{équation 1-15}$$

avec $\overline{\varepsilon_{s blocs}}$ correspondant à la déformation surfacique moyenne des b blocs « continus » (voir §1.3.1) et $\overline{\varepsilon_{s total}}$ la déformation surfacique moyenne. On admet que :

$$\overline{\varepsilon_{s ROI}} = 0 \text{ pour l'étude en galerie (i.e. pas de variation de volume)} \quad \text{équation 1-16}$$

$$\overline{\varepsilon_{s ROI}} \neq 0 \text{ pour l'étude en laboratoire (i.e. les bords de l'échantillon sont libres en déformation)} \quad \text{équation 1-17}$$

Echelle de la galerie.

La figure 1-53 confirme la relation linéaire entre $\overline{\varepsilon_{s blocs}}$ et $\phi_{fissure}$ sur une période d'un an. Les déformations moyennes de retrait induisent une augmentation de la porosité surfacique de fissure. Comme la pente n'est pas égale à un, ceci traduit des légères erreurs sur la déformation surfacique moyenne et la porosité surfacique de fissures. Cela peut être due à une quantité de fissure non détectée due à leur faible ouverture ($\sigma < 0,14$ pixels) engendrant une diminution des valeurs de $\phi_{fissure}$ et une augmentation des valeurs de $\overline{\varepsilon_{s blocs}}$. Une autre source d'erreur possible est la non prise en compte de l'ensemble des fissures délimitant les blocs car elles se trouvent à l'extérieur de la ROI, et donc engendrent une sous-estimation de $\phi_{fissure}$.

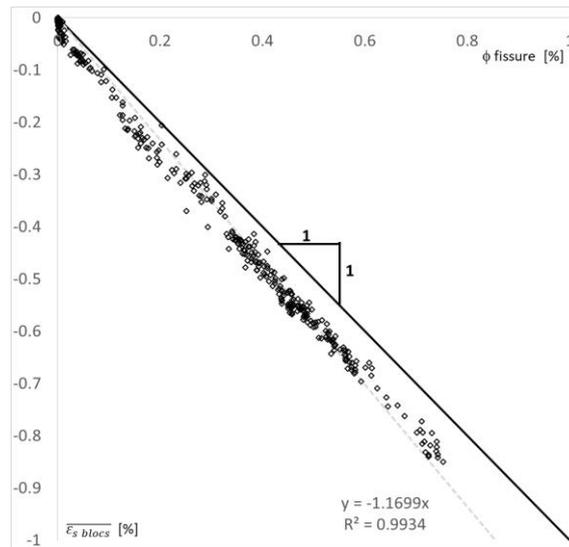


figure 1-53 : Evolution de $(\overline{\varepsilon_s \text{ blocs}})$ en fonction de $\phi_{fissure}$ à l'échelle de la galerie.

Echelle macroscopique.

A l'échelle macroscopique, la surface totale de l'échantillon est filmée. La figure 1-54.a présente les évolutions de $\overline{\varepsilon_s \text{ blocs}} + \phi_{fissure}$, $\overline{\varepsilon_s ROI}$, $\overline{\varepsilon_s \text{ blocs}}$, $\phi_{fissure}$ au cours du temps et la figure 1-54.b exprime $\overline{\varepsilon_s \text{ blocs}} + \phi_{fissure}$ en fonction de $\overline{\varepsilon_s ROI}$. $\overline{\varepsilon_s ROI}$ définit la déformation d'un parallélogramme issu de quatre points choisis aux bords de l'échantillon. Ces figures confirment que la déformation surfacique moyenne de l'échantillon se traduit directement par un retrait des blocs et une diminution de la porosité surfacique de fissures (pente ≈ 1 ; figure 1-54), avec une contribution de la porosité surfacique de fissures supérieure à la déformation moyenne des blocs (0,97% contre 0,6%).

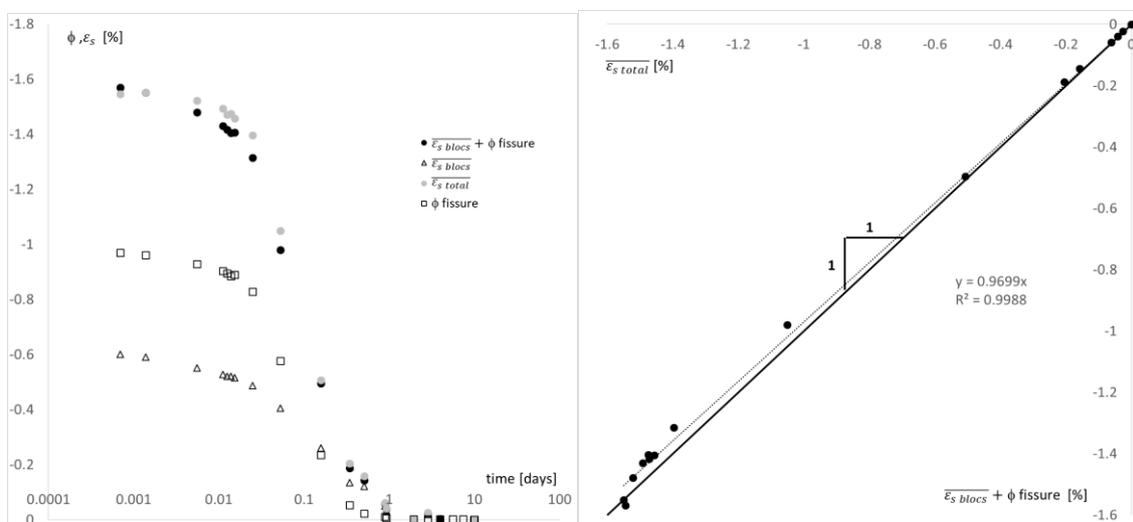


figure 1-54 : (a) Evolutions de $\overline{\varepsilon_s \text{ blocs}} + \phi_{fissure}$, $\overline{\varepsilon_s \text{ total}}$, $\overline{\varepsilon_s \text{ blocs}}$, $\phi_{fissure}$ en fonction du temps et (b) évolution de $\overline{\varepsilon_s}$ en fonction de $\overline{\varepsilon_s \text{ blocs}} + \phi_{fissure}$.

Distribution des ouvertures.

Ces études menées en galerie et au laboratoire confirme que la porosité surfacique des fissures, les déformations surfaciques de la phase solide et l'échantillon sont liées. Toutefois, l'analyse quantitative des résultats expérimentaux et spatialisés par métrologie optique permettent, en plus des nombreux résultats mentionnés, de discrétiser l'aire fracturée ($CA_{classes}^f$) en fonction des ouvertures (ou classes d'ouverture) et de les comparer avec les variables (RH, T), le temps (t), l'aire totale fracturée (CA) ou la taille de la ROI. L'aire des fissures ($CA_{classes}^f$) et la porosité surfacique des fissures $\phi_{fissure}^{classe}(t)$ par gamme d'ouverture ont été calculée respectivement en utilisant les équations 1-14 et 1-15.

$$CA_{classes}^f(t) = \gamma^2 \cdot \sum_{i=0}^N o_i(x, y, t) \quad \text{équation 1-18}$$

$$\phi_{fissure}^{classe}(t) = \frac{CA_{classes}^f(t)}{ROI} \quad \text{équation 1-19}$$

avec $o_{min}^f(x, y, t) < o_i(x, y, t) < o_{max}^f(x, y, t)$ et $0,027 \leq f \leq 1,37\text{mm}$.

Je peux ainsi tracer la porosité de surface des fissures par classe de fissures ($\phi_{fissure}^{classe}(t)$) (équation 1-14) en fonction du temps (figure 1-55.b). En comparant cette donnée spatialisée avec l'évolution de ΔRH , je confirme que ΔRH est d'autant plus grande que l'étendue des ouvertures est importante. A l'instant (t_1) correspondant au nombre maximal de domaines fracturés ($N_{max}=12193$ pixels) (i.e. trait noir discontinu sur la figure 1-55.b), la figure 1-55.c confirme que $\phi_{fissure}$ est 0,28% et que cette porosité surfacique de fissures est composée de fissures ayant une ouverture (o) faible et variant entre $37\mu\text{m}$ et $262\mu\text{m}$. Pour l'instant (t_2) correspondant à l'aire fracturée maximale ($CA_{max}=595,8\text{mm}^2$) (tableau 1-9) (i.e. trait blanc discontinu sur la figure 1-55.b), la gamme des ouvertures est plus grande et varie de $27\mu\text{m}$ à $1,36\text{mm}$ avec une proportion plus homogène de $\phi_{fissure}^{classe}(t)$ (0,02 à 0,04%, pour une ouverture inférieure à $0,75\text{mm}$) (figure 1-55.d). Pour les fissures d'ouverture supérieure à $0,75\text{mm}$, le rapport $\phi_{fissure}^{classe}(t)$ décroît significativement ($\ll 0,005\%$). Ces analyses quantitatives permettent de mieux caractériser la roche fracturée pour affiner les modèles associés.

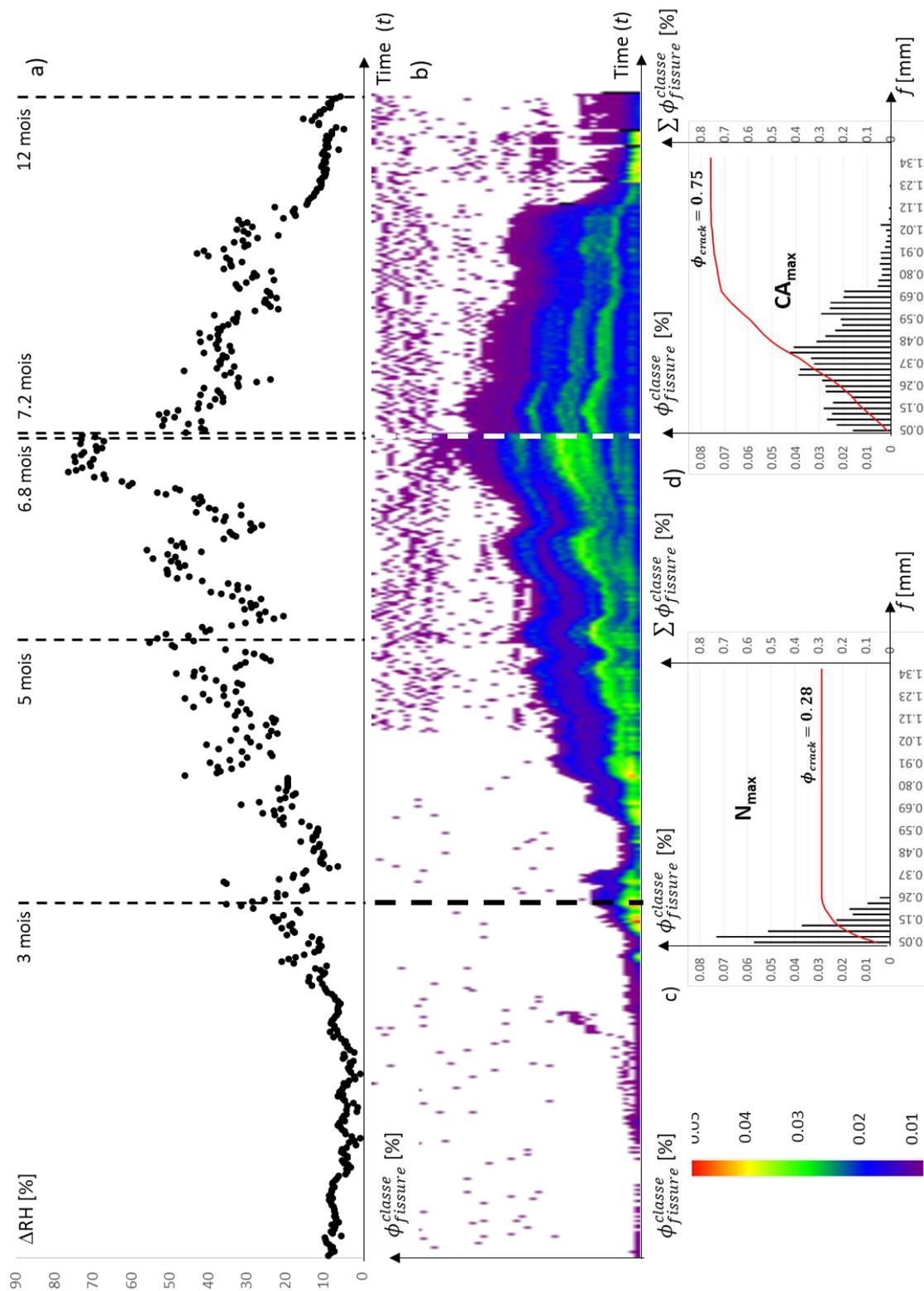


figure 1-55 : (a,b) Evolutions de ΔRH et $\phi_{fissure}^{classe}$ en fonction du temps (t) et (c,d) extraits de $\phi_{fissure}^{classe}$ et $\sum \phi_{fissure}^{classe}$ en fonction de f pour deux temps (N_{max} et CA_{max}).

Analyse fréquentielle des ouvertures en galerie.

L'analyse entre l'ouverture des fissures hydriques et les données d'humidité relative a été faite mais de façon qualitative (figure 1-8). Pour confirmer qu'il existe une relation entre l'ouverture (o) et les variables d'état (RH et T), j'ai représenté les signaux dans l'espace des fréquences (FFT) [61]. La figure 1-56.a présente les résultats des FFTs entre la période du 20/07/2012 et du 08/01/2013, soit 48 mesures/jour pendant 170,66 jours. Les propriétés de la transformée de Fourier rapide obligent d'avoir un échantillonnage en puissance de 2 (ici $N=2^{13}=8192$ mesures) sans perte de données.

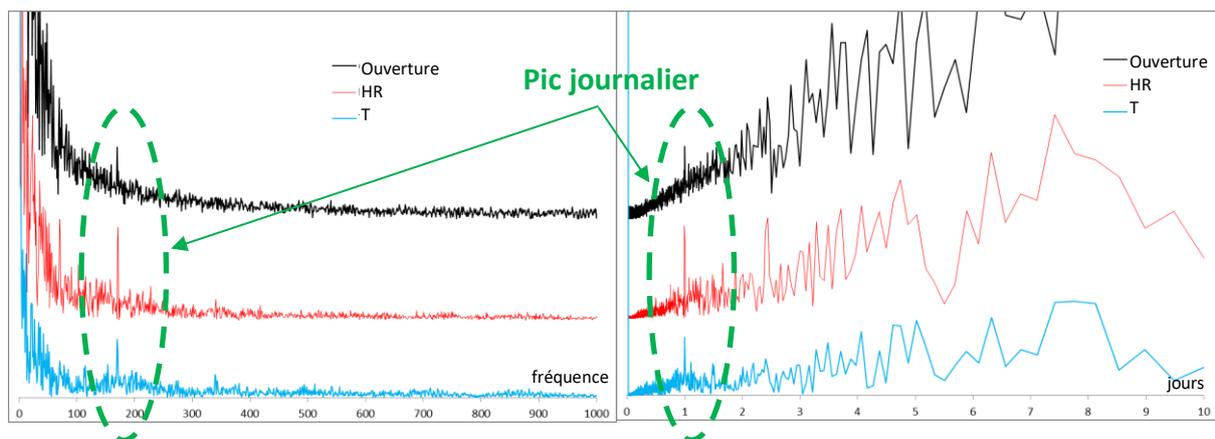


figure 1-56 : a) Transformées de Fourier calculées dans le domaine des fréquences pour une ouverture de fissure, T et HR. b) Transformées de Fourier en fonction du temps.

Les résultats de la figure 1-56.b montrent clairement un pic journalier des trois transformées de Fourier (ouverture/fermeture des fissures, température et humidité relative) et confirme que l'ouverture/fermeture est contrôlé par l'hygrométrie au sein de la galerie. Concernant l'humidité relative, ces mêmes observations ont été faites sur les sites de Tournemire [23] (figure 1-57.b) et Mont-Terri (Suisse) [34]. Hélas, d'autres pics (pic annuel par exemple) pourraient être localisés si la durée du signal était plus longue (3-4 ans) et sans la perte de valeurs. Pour combler les manques de données, il existe des algorithmes qui permettent via un signal discret réel enregistré sur une longue période (>1 an) de « combler » des valeurs manquantes [62]. Avec cet algorithme et sur des données d'humidité relative enregistrées sur le site de Tournemire et sur une période de trois ans, un pic annuel a été caractérisé (figure 1-57.a).

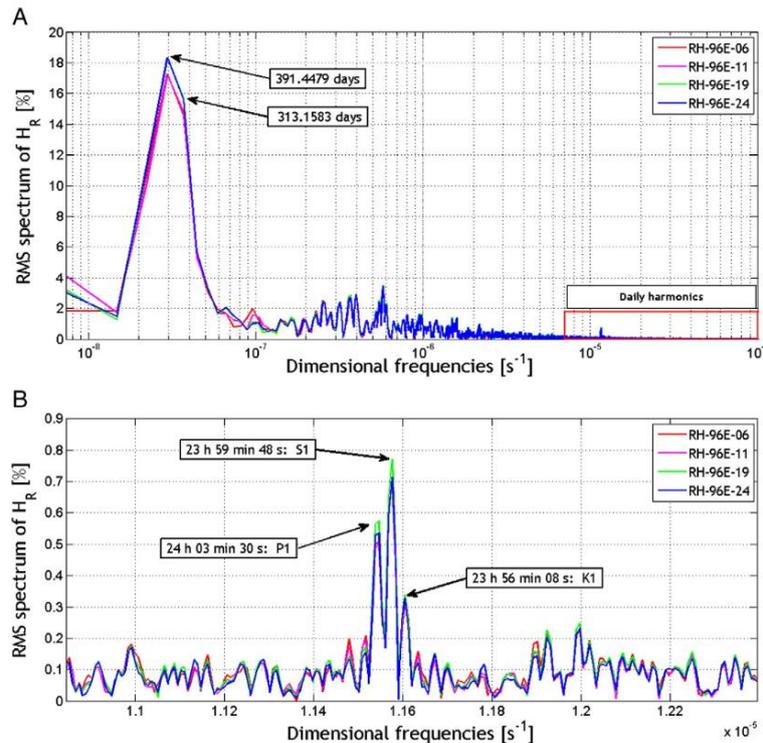


figure 1-57 : a) RMS spectra obtained for the air relative humidity time series, H_R [%], respectively measured at 6 m, RH-96E-06, 11 m, RH-96E-11, 19 m, RH-96E-19 and 24 m, RH-96E-24, of the Gallery 1996 East entrance. A, Total estimated RMS spectra; B, zoom on diurnal harmonics. Extrait de [62].

1.4 Analyse de la microstructure (cartographie minéralogique) et superposition avec les champs H-DIC (déformations, fissuration).

Outre l'analyse quantitative des champs mesurés par CIN, permettant d'expliquer le comportement hydromécanique de l'argilite de Tournemire à trois échelles d'investigation, le travail présenté dans cette partie permettra de répondre à la question (§1.1) sur l'influence de la microstructure sur la fracturation et sur la déformation de la roche. Cette superposition entre une cartographie minéralogique et les champs hydromécaniques a eu lieu à l'échelle mésoscopique dans le cadre des travaux de thèse d'Anne-Laure FAUCHILLE. La seconde phase de sa thèse (figure 1-3) visait à acquérir au moyen d'un MEB en mode électrons rétrodiffusés la zone correspondante au champ mésoscopique analysé par CIN. La spatialisation de la microstructure appelée aussi cartographie minéralogique a été obtenue au moyen d'un algorithme de segmentation d'images MEB, développé au sein de l'équipe E2 de l'institut IC2MP [63,64] (figure 1-59).

L'exploitation de la cartographie minéralogique permet aussi de quantifier la SER. Pour cela, nous nous sommes concentrés sur une partie dite 'homogène' (rectangle en pointillé rouge sur la figure 1-59) de la cartographie minéralogique et différents outils mathématiques ont été utilisés et les résultats comparés. A l'échelle de la cartographie entière, une concrétion calcaire (hétérogénéités microstructurales) (figure 1-60.f) est présente, ne permettant pas aux indicateurs de SER d'être pertinents.

Avant la superposition des résultats et l'estimation de la SER, la figure 1-58 expose les méthodes 'counting box 1', 'counting box 2' et approche statique.

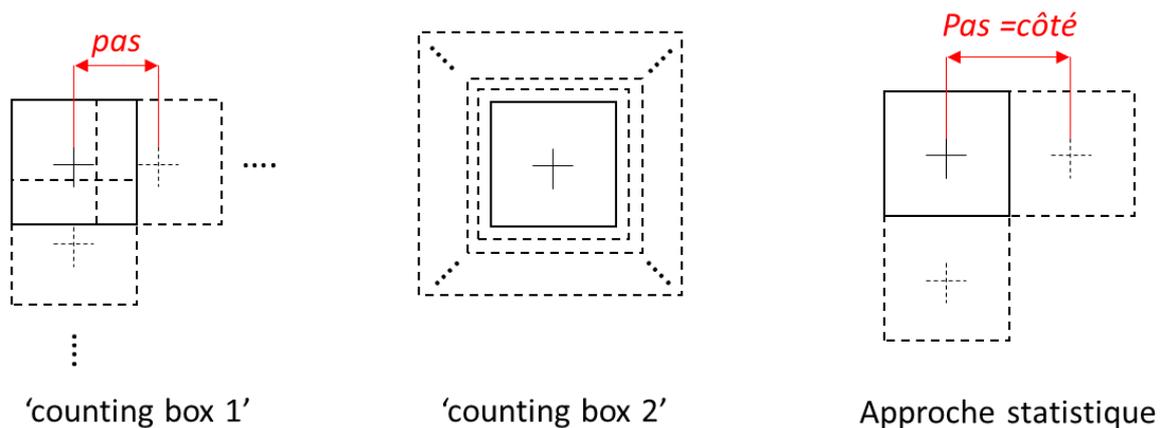


figure 1-58 : Schémas des méthodes de calcul des paramètres microstructuraux et de SER.

1.4.1 Minéralogie [Act.11].

Une étape de quantification et de caractérisation de la cartographie a été entreprise sur des domaines de dimensions égales et de pas égaux à ceux utilisés en CIN. Au moyen de la méthode de 'counting box 1' [65], les paramètres microstructuraux suivants ont alors été mesurés (figure 1-60) :

- le pourcentage de grains (Pg),
- la surface moyenne des grains (Sg),
- le rapport moyen d'élongation des grains (h/L),
- l'orientation moyenne des grains (α),
- leur nombre (N).

L'analyse de ces cinq paramètres a permis d'identifier des hétérogénéités locales, puis de les superposer aux fissures de dessiccation observables à l'échelle mésoscopique (surlignées en rouge sur la figure 1-60). La figure 1-60 montre clairement qu'un paramètre microstructural seul ne permet pas d'expliquer la localisation des fissures hydriques.

Toutefois, lorsque l'on superpose l'ensemble des hétérogénéités microstructurales (figure 1-60.f), les fissures de dessiccation passent à l'interface de celles-ci, et donc la microstructure des argilites semble contrôler la position des fissures hydriques. Cette cartographie minéralogique permet aussi de la superposer avec les déformations locales (DF) (ici la densité des déformations principales majeures ε_1). La figure 1-61.a présente le nombre de domaines en fonction Pg et ε_1 . Sur la figure 1-61.b, le nombre de domaines a été calculé en fonction de Sg et ε_1 . La fréquence illustre le nombre de domaines compris dans une gamme de déformation ε_1 et dans une gamme de Pg ou de Sg .

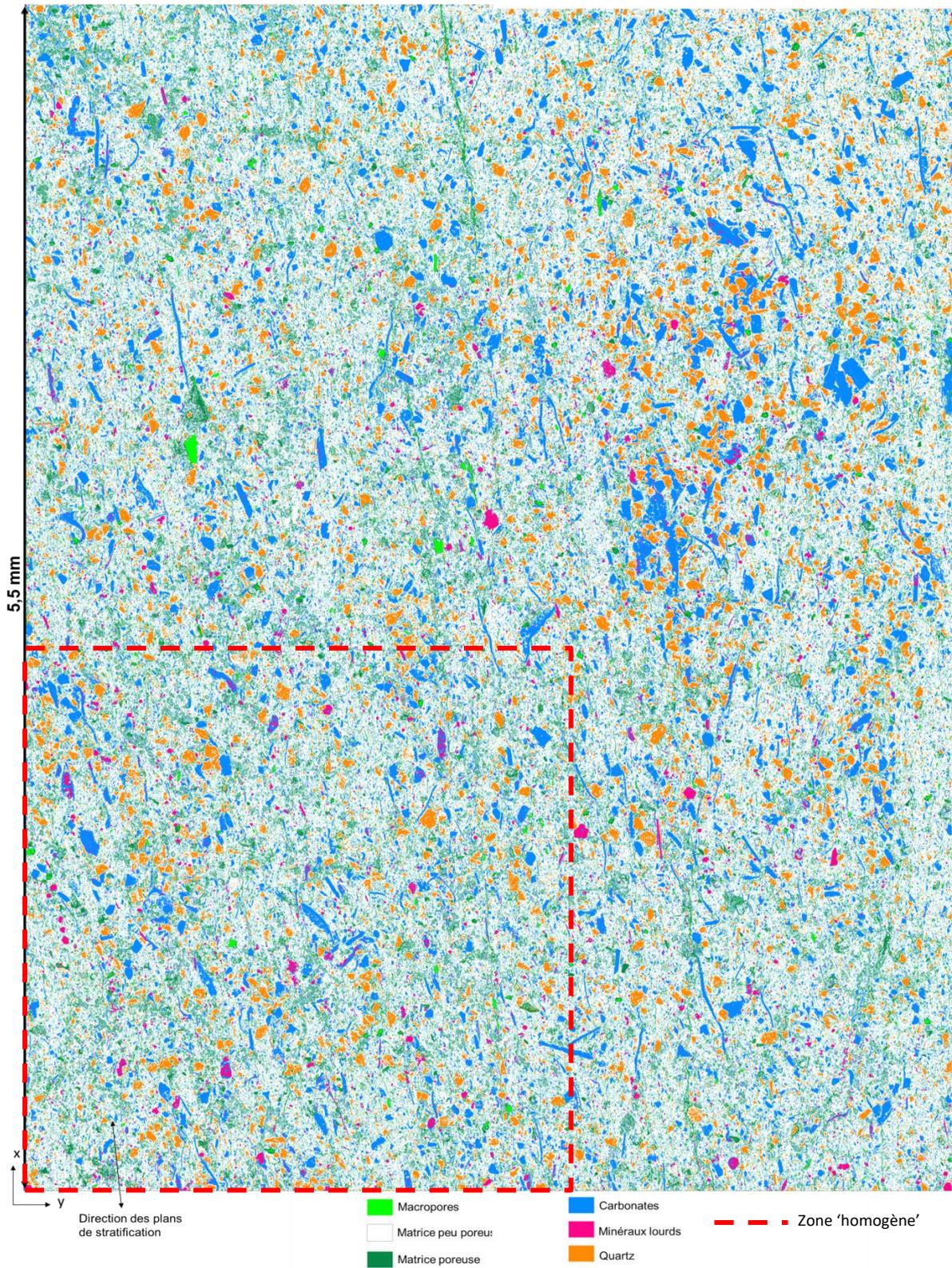


figure 1-59 : Mosaïque segmentée correspondant au champ mésoscopique (extrait de [7]).
SER calculée dans la zone en pointillé rouge.

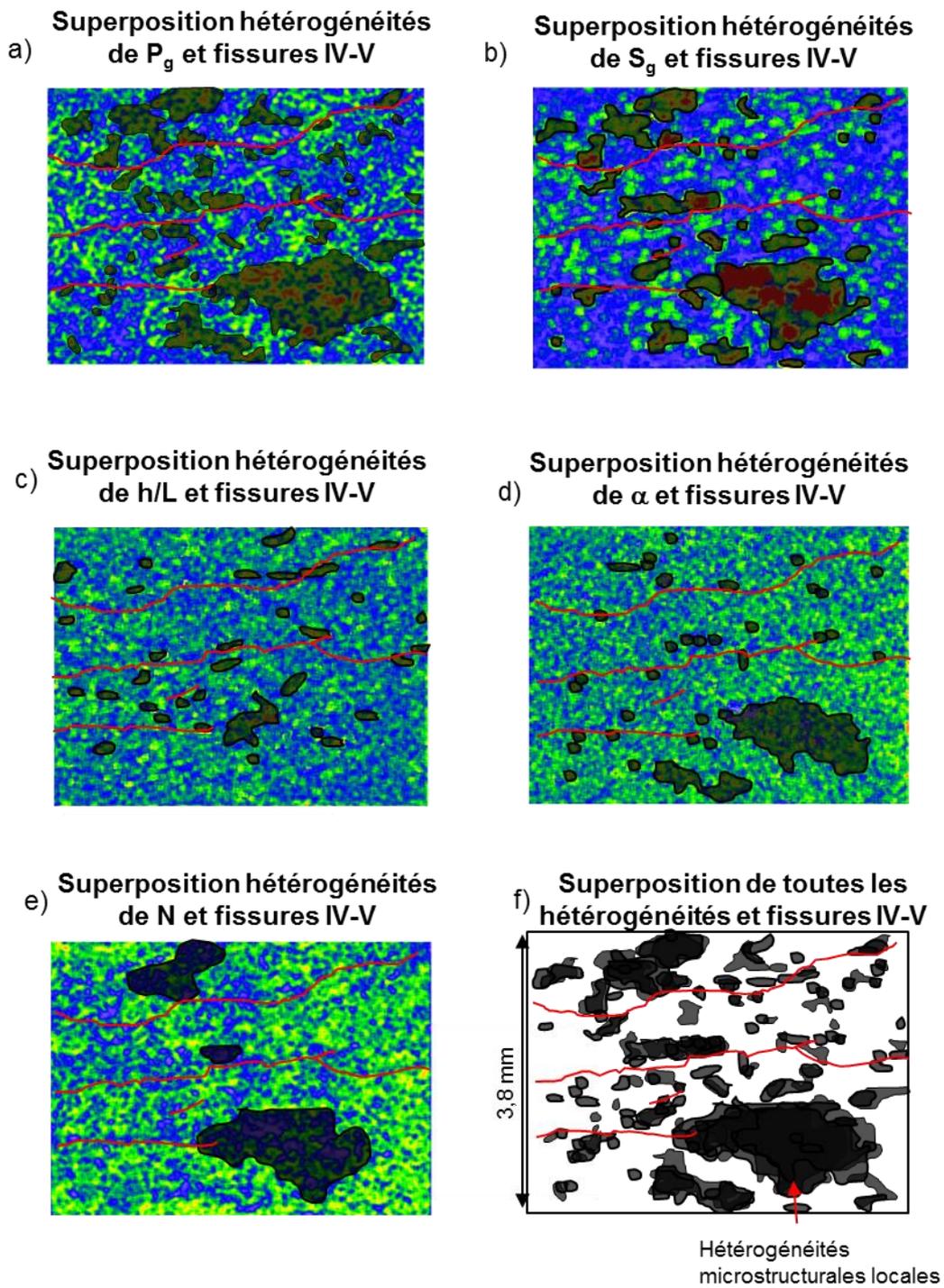


figure 1-60 : Superposition des fissures de dessiccation avec les paramètres microstructuraux : P_g , b) S_g , c) h/L , d) α et e) N . f) Superposition avec toutes les hétérogénéités (extrait de [7]).

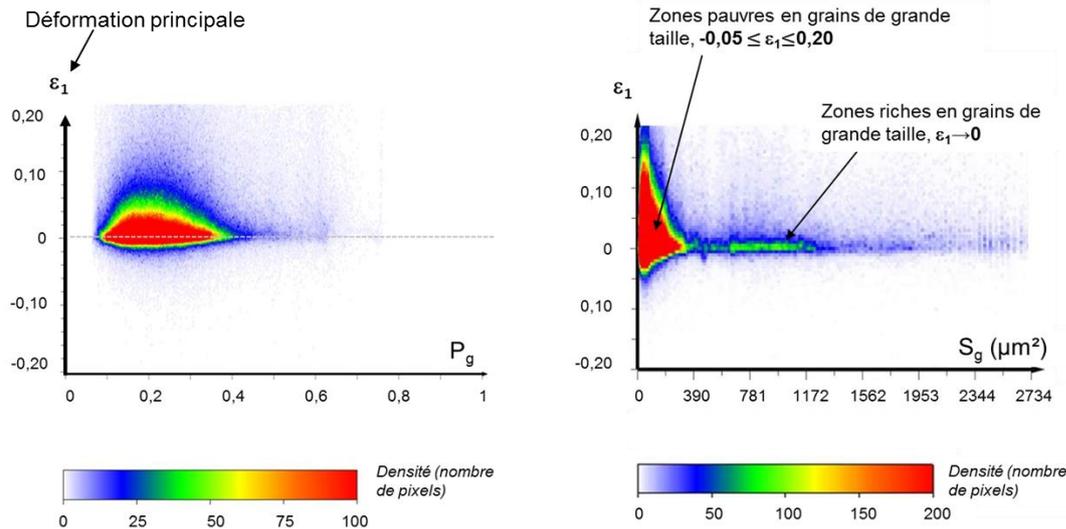


figure 1-61 : Comparaison de la déformation ϵ_1 par rapport à la proportion de grain P_g (a) et à la taille moyenne des grains S_g (b) (extrait de [7]).

L'interprétation de la figure 1-61 entre les déformations principales majeures ϵ_1 et la microstructure n'est pas si simple, car pour chaque valeur de P_g ou de S_g , les valeurs de ϵ_1 présente une forte variabilité allant de -0,025 à 0,15. La seule tendance visible porte sur les domaines contenant des grains de grande taille, car la déformation ϵ_1 tend vers zéro traduisant une déformation nulle de ces grains. Notre étude ne permet pas d'obtenir une relation 'directe' entre déformations et proportion ou taille des grains. Ceci peut s'expliquer par :

- La mesure des déformations (DF) par dérivation des déplacements n'est pas adapté lorsque le milieu est fracturé (figure 1-14) (tableau 1-3),
- Des mesures de surface alors que la déformation de l'échantillon est volumique,
- Une déformation contrôlée par la microstructure sur une zone plus étendue que la taille du domaine,
- Un milieu très hétérogène à l'intérieur du domaine et donc quel est le sens de la déformation moyenne mesurée,
- Une prise en compte de la fermeture de microfissures non visibles à cette échelle dans le calcul des déformations à l'échelle mésoscopique et donc que veut-dire les valeurs de déformations.

Pour le point de petites fissures non visibles, l'analyse de la cartographie minéralogie et les travaux de Wang et al., 2013 [38] (utilisation d'un MEBE sur l'argilite du Cox) mettent en évidence la présence de petites fissures qui n'ont pas été détectées par manque de résolution.

1.4.2 Surface élémentaire représentative (SER) [Act.4] [Act.6]

En plus de la superposition originale entre des paramètres microstructuraux et des déformations hydromécaniques, l'apport d'une cartographie haute résolution permet d'utiliser des outils mathématiques classiques ('counting box 2' (figure 1-62.a) et approches statistiques (figure 1-62.b)) et des descripteurs microstructuraux [Act.4] pour quantifier le volume élémentaire représentatif (VER) ou la SER dans notre cas, c'est-à-dire la surface minimale considérant le milieu continu 'équivalent' (i.e. milieu effectif). Dans notre cas, cette surface correspond à une surface suffisamment grande d'un matériau hétérogène (grains/matrice argileuse) pour être statistiquement représentative de la roche. Les résultats obtenus sont utiles entre autres pour des applications en pétrophysique [66] et en modélisation numérique (X-FEM [67], homogénéisation (i.e. propriétés effectives), changement d'échelles (FEM²) [68–70], DEM, transport,...). A partir de la mosaïque segmentée (figure 1-59), l'image est binarisée, séparant ainsi la matrice argileuse des grains.

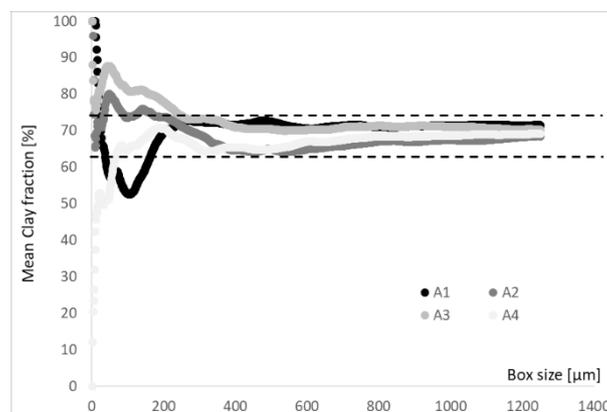


figure 1-62 : estimation et comparaison des tailles de SER obtenues avec la méthode 'counting box 2'.

Une zone carrée dite 'homogène' (zone sans concrétions calcaires et délimitée par des pointillés rouges sur la figure 1-59) a été divisée en quatre domaines indépendants de mêmes dimensions (2000x2000 pixels ; 1,25x1,25mm²) suffisamment grands pour obtenir une homogénéité statistique. Les dimensions de la zone 'homogène' sont de 2,5x2,5mm² (4000x4000pixels) avec une valeur moyenne de la phase argileuse ($\overline{\phi_{argile}}$) de 69,8%.

La méthode 'counting box 2' consiste à calculer le pourcentage de la matrice argileuse sur une surface carré (i.e. box size) centrée pour chaque domaine (1 à 4) et de côté égal à 3 pixels. A chaque itération, le côté augmente de deux pixels. Les résultats des courbes présentent de hautes fréquences et aucune corrélation entre elles pour des tailles de boîte inférieures à 200μm (figure 1-62). De tels résultats sont associés aux quelques grains de

grandes tailles [7]. Pour estimer une taille de la SER, le domaine doit être suffisamment grand et comprendre plusieurs grains. Les valeurs moyennes de chaque domaine ont été comparées à l'intervalle $(1 \pm \varepsilon) \cdot \overline{\phi_{argile}}$ (avec $\varepsilon = \{5\%;10\%\}$) et les valeurs affichées dans le tableau 1-10 correspondent à la petite largeur de SER comprise dans cet intervalle. En fonction du seuil (ε), la largeur moyenne de la SER évolue significativement en passant de 129 μm à 441 μm . La dispersion des valeurs moyennes de la SER et les valeurs des écarts-types remettent en question l'homogénéité statique de la carte minéralogique et s'explique par une petite évolution de microstructure entre les directions horizontale et verticale [Act.4]. En effet, les grains de carbonates apparaissent plutôt allongés suivant des directions parallèles à la stratification, formant une anisotropie géométrique et conduisant à des valeurs dispersées de SER.

Domaine	$\overline{\phi_{argile}}$ [%]	largeur de la SER [μm] pour $\varepsilon=10\%$	largeur de la SER [μm] pour $\varepsilon=5\%$
1	71,4	163	179
2	68,5	71	749
3	70,2	214	260
4	69,1	68	576
Moyenne	69,8	129	441
Ecart-type	1,3	71,8	267,5

tableau 1-10 : Estimation de la SER obtenue avec la méthode 'counting box 2'.

L'approche statistique consiste, quant à elle, à calculer la proportion de matrice argileuse sur des domaines indépendants les uns des autres, ne se chevauchant pas et balayant la totalité de la surface 'homogène'. La valeur moyenne de la matrice argileuse et l'écart-type sont connus en fonction de la taille du domaine dont l'incrément est fixé à 1 pixel. La valeur moyenne de la matrice reste constante et correspond à la valeur moyenne de la surface. Les écart-types diminuent avec l'augmentation de la taille du domaine. La taille de la SER avec l'approche statique correspond à l'intersection entre la pente des écarts-types et une droite horizontale (trait rouge sur la figure 1-63.b) symbolisant une évolution constante de la largeur de la SER [Act.4]. Dans ce cas, la largeur de la SER est du même ordre de grandeur que la méthode 'counting box 2' et sa valeur est estimée à $140 \pm 10 \mu\text{m}$ (flèche rouge sur la figure 1-63.b).

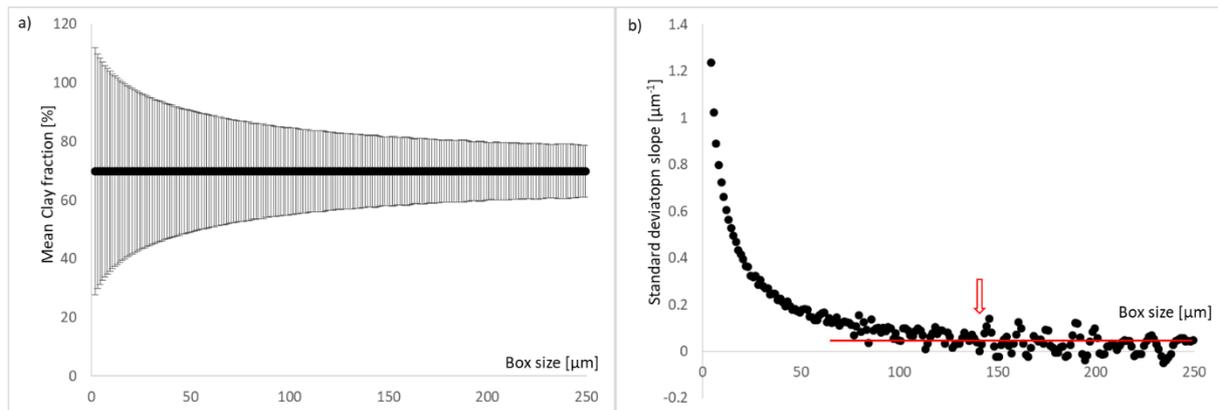


figure 1-63 : (a) Approche statistique : évolutions de la valeur moyenne et de l'écart-type de la phase argileuse en fonction de la dimension du domaine ; (b) évolutions de la pente des écarts-types de la phase argileuse en fonction de la dimension du domaine

D'autres descripteurs microstructuraux (fonction de covariance, lineal path function, longueur de percolation, et variogramme) ont été mis en œuvre sur ces mêmes domaines et confirment les résultats précédents sur la variabilité de la taille de la SER allant de 31 à 103 μm [Act.4]. Il est à noter que ces valeurs sont plus petites que celles des méthodes citées précédemment (tableau 1-10). Ces descripteurs microstructuraux sont quant à eux, adaptés pour démontrer l'anisotropie microstructurale de la roche due à l'alignement des grains parallèlement à la stratification de la roche. Les résultats de la fonction de covariance et du variogramme confirment que la carte minéralogique n'est pas statistiquement homogène. Cet aspect rend difficile l'interprétation des résultats et remet même en question la notion de SER de cette carte.

Enfin, l'ensemble des outils mathématique de quantification de la SER permettent de recommander l'utilisation (i) de la fonction de covariance et/ou du variogramme pour valider au préalable l'homogénéité statistique des cartes et (ii) des méthodes de 'counting box 2' et/ou statistiques pour quantifier la SER.

1.5 Conclusions générales

Ces études hydromécaniques multi-échelles d'une roche argileuse (argilite de Tournemire) ont été réalisées au travers du développement et de l'utilisation d'un algorithme de corrélation d'images numériques adapté au milieu fracturé. Cette approche est non invasive, sans contact et spatiale l'information (mesures de champs). Cette avancée a permis de découpler et d'étudier le comportement hydromécanique (déplacements et déformations) de la phase solide et le comportement des fissures de dessiccation (ouverture et glissement). Ces nouveaux résultats ont aussi permis d'apporter des réponses sur l'aire fracturée du milieu et sur la porosité surfacique de fissures en fonction de l'échelle investiguée. L'ensemble de

ces résultats expérimentaux mettent en avant les progrès et les avancées effectuées sur la compréhension hydromécanique d'une roche argileuse à différentes échelles. Sa facilité envisage des applications de cet outil sur d'autres géomatériaux (bétons, sols, argiles, bentonites, ...) liés à différents domaines d'applications (stockage, retrait/gonflement, construction, ...) dès lors que le solide étudié est soumis à des transformations physiques. Son pouvoir d'adaptation aux différentes échelles spatiales lui confère aussi une autre grande qualité.

Par ce manuscrit synthétisant deux travaux de recherche sur une roche argileuse, j'ai voulu démontrer que l'approche expérimentale originale que je porte au sein de mon institut permet de mieux décrire la réponse (thermo)-hydromécanique d'une roche argileuse. La synthèse de mes travaux (tableau 1-11) et les résultats présentés dans ce manuscrit permettent d'orienter mes perspectives de recherche à court et moyen terme. Ce tableau exprime clairement un manque de résultats hydromécaniques aux petites échelles (nano et micro) et à l'échelle d'un site (échelles métriques et pluri-métriques) et le manque de résultats volumiques.

	Anisotropie		Distance entre les fissures SH	Fissures		Aire fracturée	CA/ROI
	$\langle \varepsilon_1 / \varepsilon_2 \rangle$ Min-max	ε_{1-max} - ε_{2-max}		SH (mm)	SV (mm)		
Galerie	4,5 3,15-5,42	0,08-0,017	Moyenne 54,6mm Min-max 35-69,4mm	o→0,1-1,26 s→-0,4-0,3	o→0,05-1,26 s→-0,14-0,56	595,8mm ²	0,75%
Macro	3,8 2,95-6	0,0057- 0,00096	3,62mm 1,8- 5,55mm	o→0,005-0,082 s→-0,01-0,018	o→0,013-0,04 s→-0,015-0,027	2,6mm ²	0,97%
Méso	X	X	X	o→0,0014-0,0039 s→-0,005-0,005	X	0,05mm ²	0,2%

tableau 1-11 : synthèse des résultats obtenus aux différentes échelles.

Il est à noter aussi que le projet fédérateur NEEDS souhaite étendre la compréhension de cette roche argileuse aux couplages THM-C. Dans ce contexte, un projet structurant (2019-2021) entre les laboratoires L3SR (porteur P. BESUELLE-L3SR), Navier et IC2MP a été déposé et accepté et dont les objectifs visent une étude du comportement sous sollicitation en température et en humidité relative des roches argileuses. Plusieurs échelles sont investiguées, allant de l'échelle des feuillets argileux à l'échelle macroscopique (celle de l'ingénieur), en passant par l'échelle mésoscopique (inclusions minérales noyées dans une matrice argileuse). Le dialogue entre ces trois échelles est abordé par des méthodes de changement d'échelle, prenant en compte les phénomènes physiques pertinents aux différentes échelles. Les méthodes proposées dépendent des échelles : modélisation en dynamique moléculaire pour passer de l'échelle micro au comportement de la matrice argileuse (Laboratoire Navier), caractérisation expérimentale avec mesures de champs

(tomographie synchrotron et corrélation d'images) à l'échelle mésosopique, en parallèle à un travail de changement d'échelle méso-macro par homogénéisation numérique (L3SR), et enfin caractérisation expérimentale à l'échelle macro, servant à l'identification d'un modèle macro (IC2MP). Pour ma part, j'envisage une approche expérimentale à l'aide d'une enceinte climatique (acquises dans le cadre du CPER 2015-2020 bâtiment durable) et mesures de champs cinématiques. Le montage expérimental sera composé d'une enceinte climatique dotée de trois fenêtres de visualisation (figure 1-64). Cette enceinte spécifique a été développée pour suivre trois phases de l'échantillon et dont les gammes de température et d'humidité relative sont respectivement de $-40 < T < 180^{\circ}\text{C}$ et $10 < \text{HR} < 97\%$. Cet équipement permet d'imposer une hygrométrie (RH et T) et les images acquises d'étudier la réponse THM de l'échantillon en termes d'isotropie transverse, de déformations et de fracturation. Pour cela, chaque fenêtre sera équipée d'une caméra imageant une face de l'échantillon avec une résolution proche de $10 \mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1}$. Une face de l'échantillon analysée sera parallèle au plan de stratification (caméra 1 de la figure 1) et les 2 autres seront orthogonales (caméras 2 et 3). L'ensemble des données permettra de caractériser les déformations thermo-hydrromécaniques 3D [Act.16].

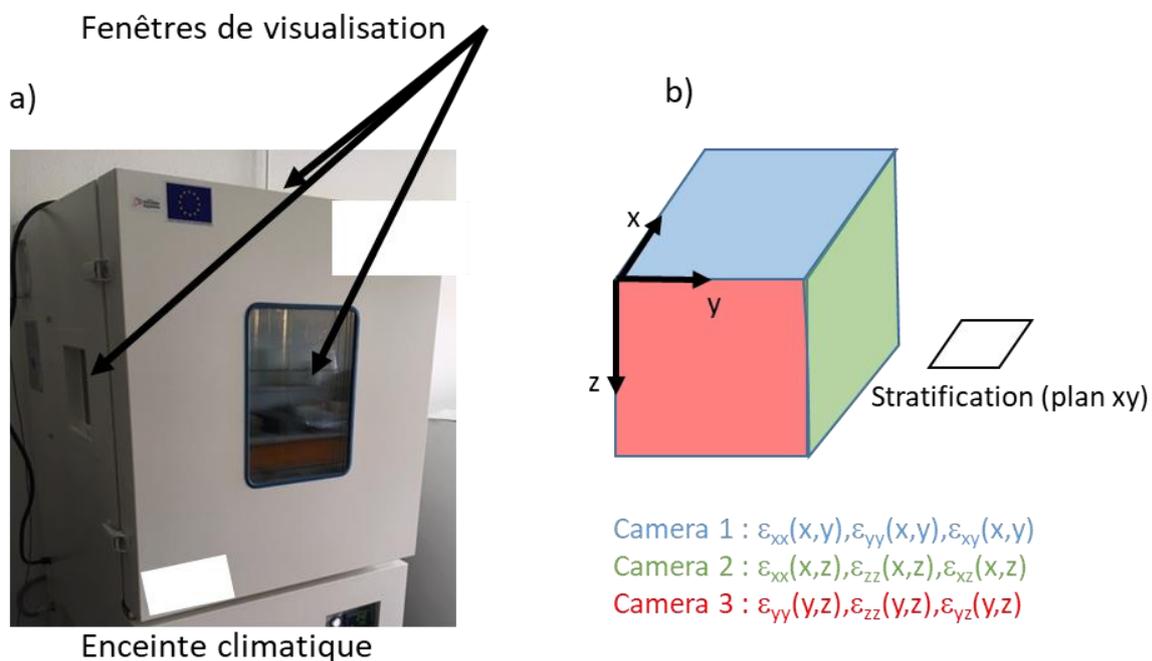


figure 1-64 : (a) enceinte climatique avec les trois fenêtres de visualisation, (b) Faces de l'échantillon analysées par les caméras 1, 2 et 3.

Je pense que mes compétences dans le monitoring *in situ* et les résultats de certains de mes travaux de recherche pourraient trouver des applications sur d'autres matériaux liés au stockage en géologie profonde. Je peux citer le revêtement des galeries pour caractériser

le comportement du béton (voussoirs, béton projeté) par rapport à l'environnement et à la coactivité (exemple : creusement galerie, la ventilation forcée, au vieillissement, ...).

Les observations et les résultats expérimentaux à l'échelle de la galerie ont donné lieu à de premières comparaisons temporelles (1 an) entre l'ouverture expérimentale de trois 'grandes' fissures et celle mesurée à partir d'un modèle numérique. Ce modèle 2D aux éléments finis a été développé avec CodeAster© [71]. Le paramètre étudié dans ce modèle numérique est la longueur de pénétration (a) des fissures et qui correspond à l'étendue de l'EDZ au sein du massif rocheux.

Les actuelles/futures collaborations avec l'institut Pprime sur les développements d'outils métrologiques optiques s'orientent sur l'acquisition d'images à des échelles inférieures (nano-micro) au moyen (MEB-FIB, MEB-FEG) (§2.1), mais aussi sur l'utilisation de la stéréo-corrélation (H-SDIC ; [Act.8]) et la corrélation volumique (H-DVC ; [Act.9]) pour l'étude du comportement mécanique en se concentrant par exemple sur la convergence des galeries, la pénétration des fissures au sein d'échantillons, la connectivité 3D des fissures, dans le but de toujours d'enrichir la compréhension du comportement hydromécanique des roches argileuses aux différentes échelles.

Des extensions de ces travaux pourraient être envisagés sur les sols argileux où de nombreuses études s'intéressent à leur comportement hydromécanique avec observation de fissures [11].

Les récents développements à la petite échelle, dans le cadre de la thèse de doctorat de Younès Mammadi que j'ai co-encadré avec Valéry VALLE permettent de dissocier et de quantifier séparément (i) les déformations par l'utilisation des gradients locaux issus de la H-DIC et (ii) la partie fissuration (ouverture, cisaillement, orientation).

Dans le cadre du projet européen *EURAD WP Gaz* (2019-2024) auquel je participe (porteur IC2MP : Richard GIOT), je développe une cellule triaxiale miniaturisée (\emptyset échantillon de 4mm) (figure 1-65) couplée à de l'injection de gaz pour fracturer l'échantillon de roche argileuse. Cette déformation sera suivie via l'acquisition des volumes déformés par μ tomographie RX. Mes compétences me permettent de concevoir et de dimensionner la tenue mécanique de cette cellule vis-à-vis des pressions imposées dans notre cahier des charges (confinement jusqu'à 10MPa, fluide de l'ordre de 4,5MPa). Ce travail interne à mon laboratoire se fait conjointement avec Dimitri PRET (IC2MP) qui se concentre sur les aspects minéralogiques/images avec comme points importants :

- l'énergie de la source X,
- la taille des minéraux,
- les dimensions des échantillons

En effet, le mouchetis indispensable pour mettre en œuvre la DVC, sera obtenu grâce aux différents minéraux composant notre roche argileuse, et à un choix spécifique des paramètres d'acquisition choisis. Ce travail préparatoire minutieux aura une forte influence sur la résolution de la DVC et donc sur l'observation des phénomènes mécaniques de faible amplitude (ouverture et propagation des fissures, déformations de la phase solide).

Ce montage permettra d'étudier l'influence de la pression d'injection d'un gaz sur la réponse mécanique et la fracturation d'une roche argileuse sous contrainte. J'envisage d'utiliser la H-DVC pour extraire les champs de déformations volumiques et la fracturation 3D.

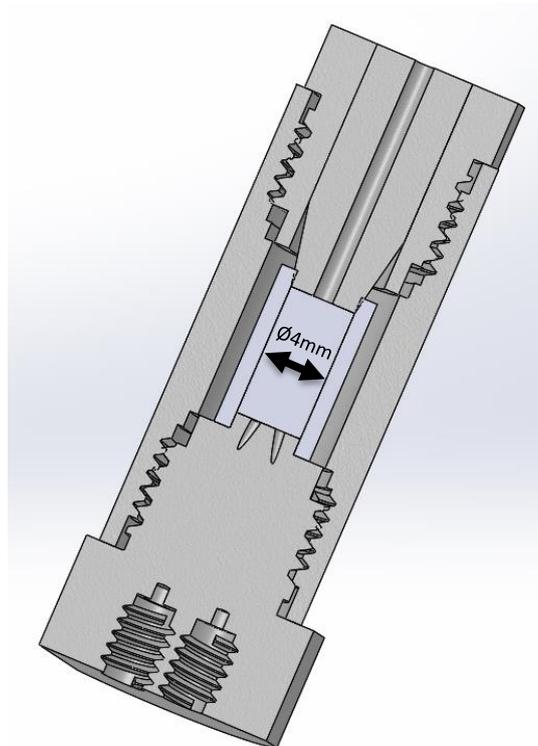


figure 1-65 : cellule triaxiale couplée à de l'injection de gaz.

Parallèlement à ces travaux, je développe et j'adapte le suivi de marqueurs à la mesure tridimensionnelle du retrait/gonflement des sols argileux (chapitre 2.2) dont les premiers tests ont été obtenus sur un site expérimental de l'Université de Poitiers (site du deffend). En effet, mes enseignements en géotechnique et les échanges avec les professionnels du secteur montrent qu'il n'existe pas d'outil *in-situ* simple de mesures *directes* de ce phénomène.

2 Projet de recherche.

Cette dernière partie porte sur les perspectives et les actions que je souhaite mener à court et moyen termes. Plusieurs perspectives ont déjà été évoquées dans les conclusions de mes activités de recherche présentées dans les sections précédentes. Je compte par exemple continuer à participer aux activités de mesures de champs en géotechnique, géomécanique et génie civil. Je souhaite également poursuivre les travaux entamés au cours des collaborations établies depuis quelques années au sein de mon institut et avec d'autres laboratoires. Mon projet de recherche peut se synthétiser en trois opérations centrées sur la thématique principale développée dans ce manuscrit : la caractérisation expérimentale du comportement (thermo)-hydromécanique de matériaux argileux (roches, sols, ...).

Le premier objectif est de poursuivre et d'étendre l'exploitation des méthodes de mesures de champs 2D à des échelles plus fines (micro, nano). Malgré de nombreux travaux de recherches dans ce domaine, peu de recherches se sont focalisées sur ce matériau en couplant les images reconstruites et les algorithmes de DIC. On peut citer les travaux de Wang et al. 2013 [38]. Ceci est principalement dû au matériel d'acquisition (MEB, MEBE) qui souffrait de nombreuses limitations (ex : dérive du faisceau au MEB), ce qui faisait apparaître des artefacts sur les images haute résolution reconstituées et entraînait des déformations sur les champs DIC qui ne sont pas associées au comportement du matériau, mais seulement à la qualité des images. Aujourd'hui, ces moyens d'acquisition ont favorablement évolué et limitent l'apparition de ces phénomènes. Il convient alors d'envisager de nouvelles études permettant de quantifier la fissuration et la déformation de l'argilite. Mais ces recherches devront aussi répondre au manque de textures locales (pas ou peu de variations des niveaux de gris) de l'argilite pour les modes électrons secondaires (topographie) ou rétrodiffusés (N° atomique). Un soin particulier de préparation de la surface d'étude devra être mené et pourrait faire l'objet d'un financement de thèse de doctorat. Comme prérequis, j'envisage de financer un stage de Master M2 pour évaluer la qualité d'images MEB-FEG sur la base des travaux menés par Younès Mammadi lors de sa thèse.

Le deuxième axe porte sur l'extension de mes travaux actuels aux essais 3D et volumiques mettant en œuvre les méthodes optiques (S-DIC, H-SDIC, DVC, H-DVC) pour mieux décrire le comportement de l'argilite. En effet, actuellement mes résultats de recherche sont exclusivement plans et donc excluent les informations hors-plan et au cœur de la matière. Aujourd'hui et avec mes techniques expérimentales mises en œuvre, il est impossible de quantifier expérimentalement la profondeur des fissures dans le massif et le déplacement hors-plan de front de galerie et des lèvres des fissures. Mes travaux expérimentaux ne répondent donc pas à la question de la profondeur de l'EDZ au sein du massif rocheux.

Toutefois des comparaisons avec des résultats numériques issus de la méthode des éléments finis (FEM, X-FEM, FEM², ...) peuvent être envisagées et ont déjà débutées [Act.1]. Il me paraît intéressant de poursuivre ces travaux et d'éteindre les modèles numériques au 3D.

A l'échelle de la galerie, il est impossible actuellement d'envisager des études volumiques pour accéder à la profondeur des fissures de dessiccation avec les outils métrologiques disponibles. Nous pourrions toutefois envisager d'ajouter une seconde caméra filmant la même surface et utiliser la H-SDIC. En plus des champs déjà mesurés par la H-DIC, quatre nouveaux champs seraient alors obtenus :

- le déplacement hors-plan (w),
- le déplacement hors-plan des lèvres des fissures de dessiccation (s_{\perp}), et
- deux champs gradient de déplacement (H_{zx} , H_{zy}).

Il est nécessaire de rappeler que je n'ai pas observé de la création et la propagation de nouvelles fissures pendant notre étude en galerie. C'est un point important qu'il me paraît nécessaire d'étudier dans le but de dissocier les fissures générées par la création de la galerie (minage, BRH, tunnelier, ...) de celle générées par les variations d'hygrométrie. L'ensemble de ces fissures contribuent à cette zone endommagée (EDZ). J'envisage donc de carotter (\varnothing 600mm) [72] depuis la galerie à une profondeur dépassant l'EDZ (>100cm). Ainsi le fond de cette alvéole serait en dehors de l'EDZ. J'installerai deux caméras filmant le fond et ainsi je pourrai suivre la création et la propagation des fissures de dessiccation (figure 2-1).

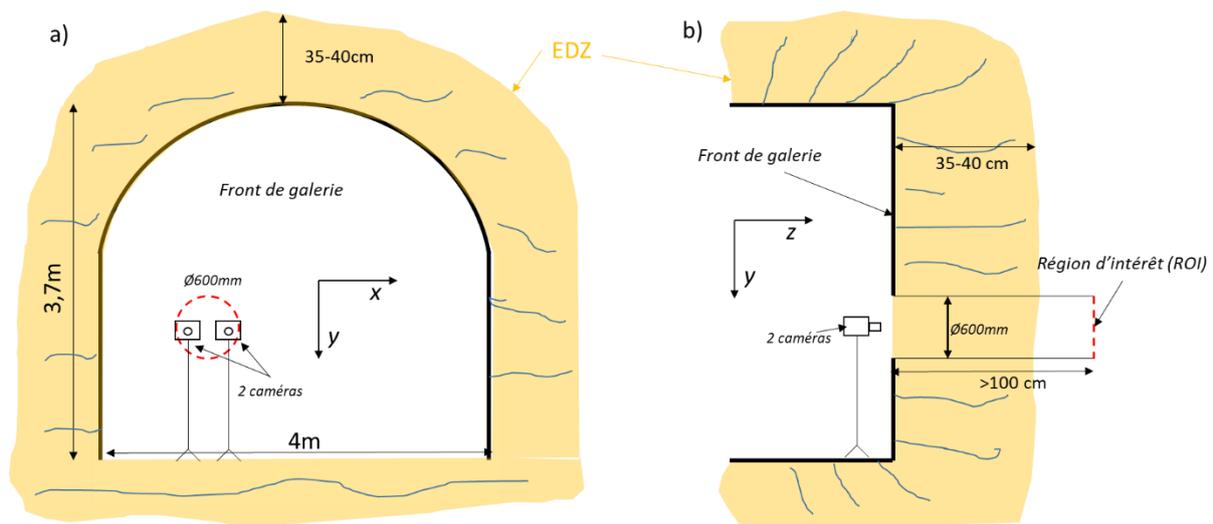


figure 2-1 : schémas de principe de la S-HDIC filmant le fond d'une alvéole à partir de la galerie suivant dans le plan (x,y) (a) et (y,z) (b). Les surfaces orange schématisent l'EDZ.

En laboratoire et en mettant en œuvre la μtomographie RX et la H-DVC, six nouveaux champs volumiques seraient ainsi obtenus et une description complète de la fracturation volumique :

- trois champs gradient de déplacement (H_{zz} , H_{xz} , H_{yz}).
- trois champs de déformations (ϵ_{zz} , ϵ_{xz} , ϵ_{yz}).

Dans ce cadre, une maquette à l'échelle réduite d'une galerie pourrait être créée et serait soumise à des variations humidités. Pour respecter des conditions aux limites satisfaisantes, avoir un contraste suffisant des volumes reconstruits et des temps d'équilibre courts, le diamètre extérieur de l'échantillon serait de 4mm et le diamètre de trou non débouchant et simulant la galerie, de l'ordre de 0,4-0,6mm (figure 2-2). La face supérieure et le perçage (i.e. la galerie) seraient les faces soumises aux variations d'humidité relative. Les autres faces de l'échantillon seraient résinées pour éliminer les échanges hydriques et bloquer leur déformation. L'échantillon serait placé dans une cellule de type œdométrique étanche. A chaque palier d'humidité relative, un volume de l'échantillon sera acquis par μtomographie, et les volumes seraient analysés par H-DVC. Cette maquette réduite d'une galerie permettrait de visualiser, quantifier et comprendre le comportement hydromécanique au cœur du matériau.

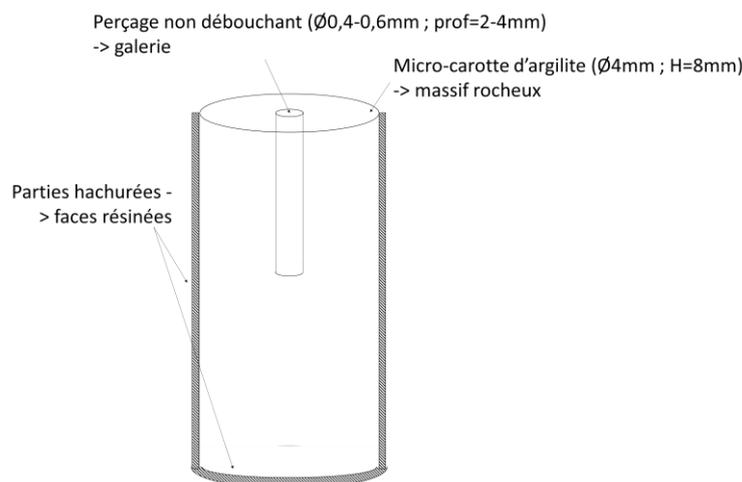


figure 2-2 : schéma d'un échantillon simulant une galerie soumise à des variations d'humidité relative.

Enfin, le troisième thème concerne le développement d'outils spécifiques de métrologie 3D in-situ. Les applications de ce dernier thème pourraient être l'étude tridimensionnelle des couches superficielles de sols (retrait/gonflement) ou la stabilité d'ouvrages (front rocheux, talus, pentes, bâtiment, ...). De part ces travaux exclusivement expérimentaux, il me paraît nécessaire d'initier et de développer des collaborations pour à minima comparer mes résultats à des modèles théoriques et/ou numériques pour mieux

contraindre les modèles numériques (ex : conditions aux limites en déplacements, loi de comportement). Dans les deux sections suivantes, je présente de nouvelles études expérimentales et numériques que je souhaite développer dans le cadre d'appels à projets régionaux (ex : projet de recherche « Nouvelle Aquitaine ») avec des acteurs professionnels (ex : bureaux d'études géotechniques), nationaux (ANR, fondations, institut de France...) et voire internationaux (projets européens).

2.1 Mesures cinématiques 2D/3D

2.1.1 Technique FIB-MEB-DIC à l'échelle nano-micrométrique.

Etude de la technique FIB-MEB-DIC [Act.3].

Les méthodes de mesure de champs permettent de quantifier les grandeurs cinématiques issues d'images optiques (ex : caméra, appareil photo, ...) ou reconstituées (ex : μ tomographe, MEB, ...). Les μ tomographes et MEB-FEG récents limitent l'apparition d'artefacts (rings, dérives du faisceau, ...), et ainsi augmentent la résolution de mesure des méthodes de mesure de champs. Ces images acquises à une résolution fine ($0,06\mu\text{m} < \gamma < 0,7\mu\text{m}$) permettent facilement de localiser les minéraux/phases des échantillons, au détriment de la qualité du marquage nécessaire à l'utilisation de la CIN. La figure 2-3, issue des travaux de Wang et al. (2013) et plus particulièrement la partie en pointillés noirs correspondant à un grain de quartz, illustre clairement un manque de texture mettant en défaut la CIN (pas de valeurs de la déformation ε_2 sur le grain).

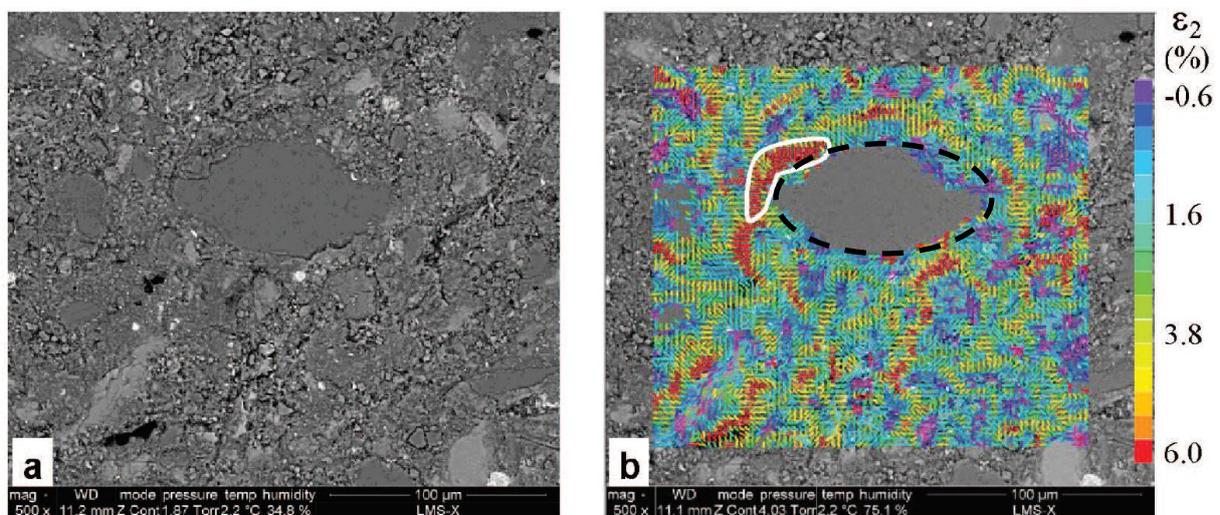


figure 2-3 : (a) Image BSE. (b) Champ de déformation ε_2 induit par un changement d'humidité relative de 35% à 99%. Extrait de Wang et al. 2013 [38]. La zone en pointillés noirs correspond à un grain de quartz.

Deux voies sont possibles pour quantifier l'information cinématique des grains sans texture initiale :

- La première consiste à isoler chaque grain par traitement d'images (segmentation, numérotation, géométrie) et suivre le mouvement de ces grains au cours de la transformation physique de l'échantillon. On peut citer les travaux de Smit [73] et sur les matériaux granulaires sableux ceux de Edward et al., 2012 [74,75].
- La seconde consiste à ajouter de la texture localement par marquage (i.e. gravure, fraisage) de la surface ou attaque chimique. On peut citer les travaux de Li et al. 2012 [76] qui ont mis en œuvre un FIB (focused Ion Beam) pour 'graver' un mouchetis à la surface d'un échantillon métallique et d'en quantifier sa qualité par la mesure des incertitudes de mesure par CIN.

Avant d'envisager une étude sur des roches argileuses, nous avons choisi de travailler sur des matériaux 'plus simples' (i.e. peu sensible au vide imposé par les microscopes) et spécifiques au LABEX « interactifs ». Ce travail a été effectué dans le cadre de la thèse de Younès MAMMADI (2016-2020) [7] (financé par le LABEX), que j'ai co-encadré (50%) avec Valéry VALLE et dont le sujet consistait à :

- Définir un processus de marquage et d'analyse des champs mécaniques à l'aide d'équipements FIB-MEB et MEB-FEG (figure 2-4),
- Evaluer les performances métrologiques de l'outil MEB-DIC,
- Décrire une procédure optimisée de séparation des déformations et de la fissuration,
- Etudier le comportement (déformations résiduelles, fissuration) d'un matériau composite métallique sollicité mécaniquement ex-situ par compression uniaxiale.

Ce LABEX, piloté par l'Université de Poitiers en partenariat avec l'ISAE-ENSMA et le CNRS s'appuie sur l'institut Pprime. C'est un programme de recherche pluridisciplinaire portant sur l'étude du couplage fluides-matériaux aux interfaces combinant la mécanique des matériaux et l'énergétique. Cette thèse avait pour ambition d'entreprendre des mesures métrologiques aux petites échelles. Cela passe par le développement et l'adaptation de techniques de mesures de champs cinématiques à cette échelle en vue d'investiguer le comportement de la microstructure des matériaux. En amont une phase très importante a porté sur l'étude de la qualité du marquage par 'gravage FIB', pour en optimiser sa fabrication dans le but d'améliorer la résolution et permettre la quantification de phénomènes locaux (déformations, fissuration) de faibles amplitudes.

Les aspects méthodologiques, les développements expérimentaux et d'autres résultats que ceux présentés ici sont exposés dans le manuscrit de thèse de Younès MAMMADI, dans une publication scientifique [Act.3] et dans une communication internationale [C.I.A.3].

Contrairement aux travaux de Wang et al. [38] qui ont utilisé le mode électrons rétrodiffusés pour obtenir des images SEM de l'argilite de l'Est (i.e. nature des éléments chimiques), les travaux de la thèse de Younès MAMMADI mettent en œuvre le mode électrons secondaires (principalement la topographie de la surface) pour obtenir des images texturées issues de surfaces initialement gravées par FIB. Ce manque de texture locale (mouchetis) locale du composite métallique dans les phases (α) et (ω) (figure 2-4.a) de l'échantillon a été résolu avec un FIB (Focused Ion Beam) (figure 2-4.a). Le modèle gravé à la surface de l'échantillon est issu d'une image BMP (figure 2-4.c), chargée dans le logiciel de pilotage de l'appareil. La figure 2-4.d montre clairement que ce processus de marquage utilisé sur le composite métallique (α - ω) permet d'obtenir une texture suffisante pour l'analyse des images avec la CIN, avec toutefois une voie d'amélioration de la texture dans la phase ω (de couleur gris clair sur la figure 2-4.d).

Cette étape de gravure a été répétée sur dix zones réparties sur la surface de l'échantillon. Une fois les 10 zones gravées, elles sont acquises avec un MEB-FEG (modèle : JEOL 7001F-TTL) avant et après déformation par compression uniaxiale ex-situ. Les déformations mesurées par CIN correspondent aux déformations résiduelles.

En amont de l'étude mécanique du matériau à l'échelle micrométrique, une étude des erreurs de mesure par CIN a été réalisée en imposant les translations suivant les directions horizontales (x) et verticales (y) et en faisant varier les paramètres d'acquisition (tension d'accélération, courant, contraste, luminosité, résolution) du MEB-FEG haute résolution. En effet, malgré l'amélioration de cet équipement, des phénomènes intrinsèques entraînent par exemples une dérive du faisceau ou une instabilité du faisceau d'électrons, ce qui provoque des images mal reconstruites (artefacts d'acquisition) influençant les erreurs de mesure par CIN.

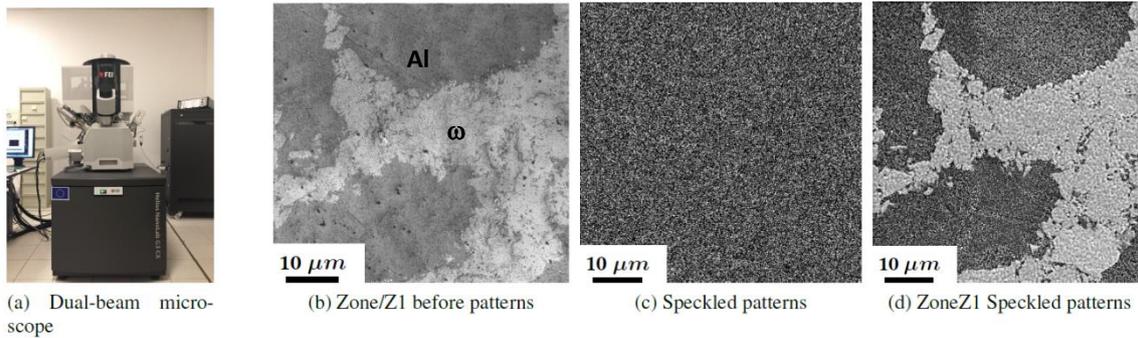


figure 2-4 : (a) Microscope FIB Helios field FIB-SEM. (b) zone Z1 avant gravure. (c) Image du mouchetis (format BMP). (d) zone Z1 après gravure du mouchetis. Extrait de [Act.3].

La figure 2-5 montre des champs de déplacements (U_x, U_y) d'un des six tests et les écarts-types des déplacements associés par CIN classique.

Le champ de déplacement de la figure 2-5 n'est pas uniforme suivant l'axe y et traduit le phénomène connu de dérive du faisceau. L'amplitude de ce phénomène peut être évaluée à moins de 0,4 pixels. Cependant, l'erreur locale (écart-type) indique une valeur inférieure ($<0,04$ pixel). Ce résultat montre que l'évaluation des déplacements par MEB-FEG reste une difficulté en raison des erreurs globales. Mais si l'on se concentre uniquement sur les déformations le phénomène est moins important. Rappelons qu'en métrologie optique, l'erreur locale en DIC est proche de l'erreur globale et, qu'elle est de l'ordre de 0,01-0,02 pixels [77].

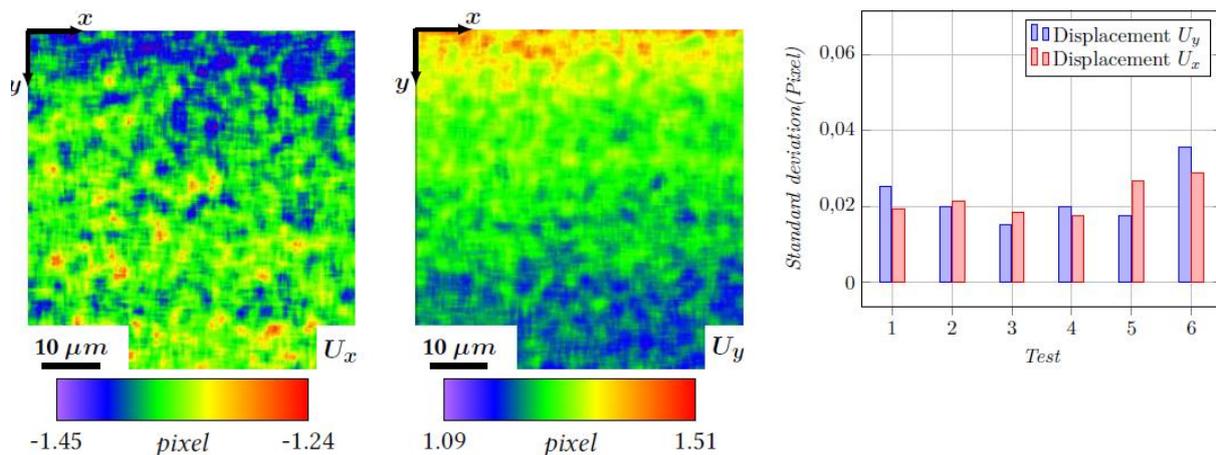


figure 2-5 : Champs de déplacements u_x, u_y et les écarts-types mesurées pour les 6 configurations. Extrait de [C.I.A.3].

Discussion pour la mise en œuvre de la technique FIB-MEB-DIC sur une roche argileuse.

Contrairement aux travaux de thèse d'Anne-Laure FAUCHILLE [7] ou Wang et al. 2013 [38], dont les images MEB ont été acquises en mode électrons rétrodiffusés, l'application envisagée en haute résolution sur des roches argileuses gravées par FIB permettra l'observation de la topographie de la surface de particules finement divisées. Le schéma de la figure 2-6 synthétise les étapes de la technique FIB-MEB-DIC. Il est à noter qu'une étude de sensibilité de la gravure (i.e. profondeur) sur l'endommagement locale de la roche devra être effectuée au préalable.

Pour limiter les perturbations (exemples : transfert des échantillons, sollicitations mécaniques ex-situ) pouvant entraîner l'endommagement des échantillons, l'utilisation d'un MEBE-FEG [78] permettrait de solliciter in-situ [38] les échantillons de roches argileuses et d'acquérir simultanément les différentes images. Cette perspective de recherche viendrait compléter l'approche expérimentale multi-échelle que je développe au sein de mon laboratoire, dans le but de mieux comprendre le comportement hydromécanique des roches argileuses.

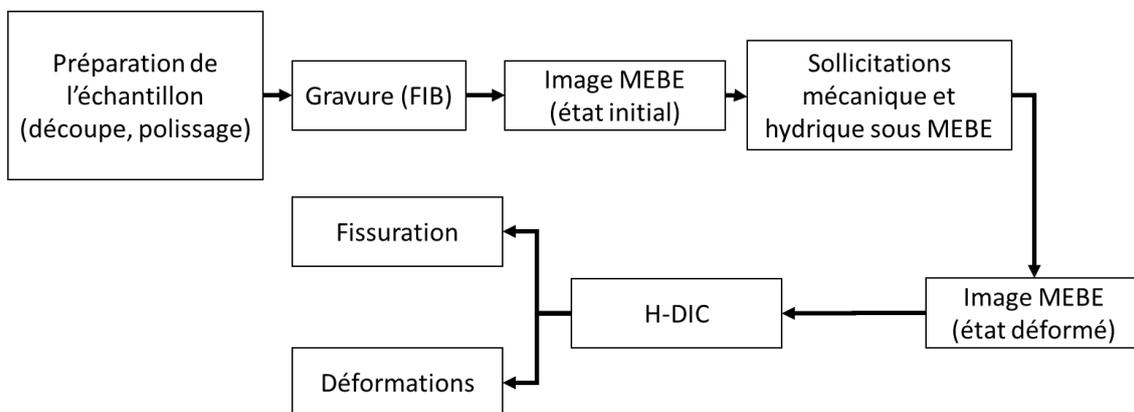


figure 2-6 : Procédure envisagée pour l'étude du comportement hydromécanique d'une roche argileuse avec la technique FIB-MEBE-DIC.

2.1.2 Modèle aux éléments finis [Act.1].

La diversité des amplitudes d'ouverture et de glissement des fissures de dessiccation ne permet pas d'identifier et de simplifier le comportement de ces fissures. Une des explications possibles de cette diversité d'amplitude est peut-être due à une pénétration (a) (i.e., profondeur de fissures) dans le massif et entraînant une diversité/hétérogénéité des résultats expérimentaux.

L'approche choisie a été de comparer les ouvertures expérimentales de trois 'grandes' fissures sub-horizontales aux résultats d'une modélisation par éléments finis. Ce travail a été réalisé et coïncide avec une nouvelle activité scientifique de l'équipe E2 d'IC2MP portée par Richard GIOT. Pour cela, nous avons utilisé le code aux éléments finis Code_Aster (EDF, [71]) et généré un modèle 2D en conditions de déformations planes et une loi de comportement de type poro-élastique isotrope [Act.1]. Ce modèle considère que la fissure a été créée lors d'une phase antérieure (creusement) et qu'elle ne fait donc que s'ouvrir et se refermer lors des sollicitations hydriques, sans toutefois se propager. Cette modélisation 2D (figure 2-7) correspond à un plan normal au front de la galerie. La longueur de pénétration (a) dans le massif et l'ensemble des dimensions sont imposées. Une étude de sensibilité du paramètre (a) a été réalisée en faisant varier conjointement a et les dimensions du modèle ($c \times c$) en respectant le critère ($c=5xa$) pour éviter les effets de bord.

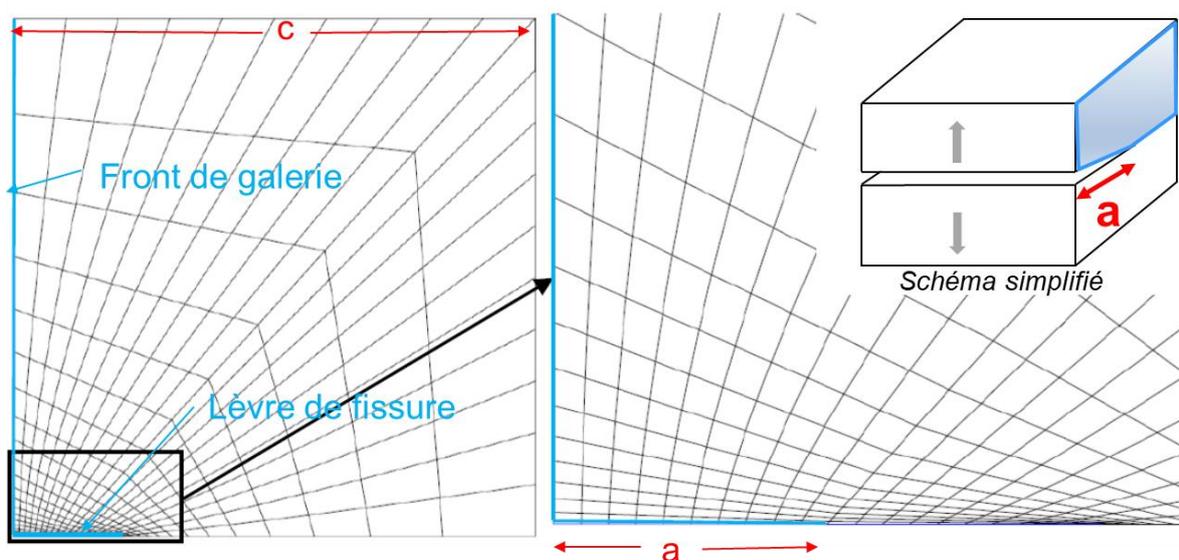


figure 2-7 : Modélisation FEM 2D déformations planes dans un plan normal à la paroi.

La figure 2-8 montre que les résultats numériques sont qualitatives proches des résultats expérimentaux avec une surestimation des ouvertures numériques maximales. En période estivale, l'expérience montre une fermeture complète des fissures alors que les résultats numériques concluent à une ouverture résiduelle de l'ordre de 0,1 à 0,2mm. Les causes possibles peuvent être dues aux paramètres imposés, voire aux expressions de l'isotherme de sorption et de perméabilité relative. Pour les trois fissures numériques, la valeur de pénétration (a) est respectivement de 12cm, 7cm et 4cm pour les fissures d_{12} , d_{23} et d_{34} .

Cette démarche de comparaison doit être programmée et étendue aux modèles HM isotrope transverse et au cas 3D. Dans un premier temps, les paramètres et les expressions de

l'isotherme de sorption et de la perméabilité relative devront être validées au travers un stage (ex : master 2). Je souhaiterais poursuivre ces travaux à travers un projet de doctorat qui pourrait être soutenu par l'agence nationale pour la gestion des déchets à vies longues (ANDRA).

Par la suite, on pourrait envisager deux orientations :

- Générer plusieurs fissures ayant une pénétration différente dans un modèle 2D déformations planes et évaluer le comportement de chacune d'entre elles et leurs interactions. Ce travail vise à étudier la réponse mécanique de l'ouverture des fissures vis-à-vis de leur proximité et de confirmer que les 'grandes' fissures dominent les 'petites' fissures (figure 1-48) et entraînent leur fermeture partielle voire totale (figure 1-49).

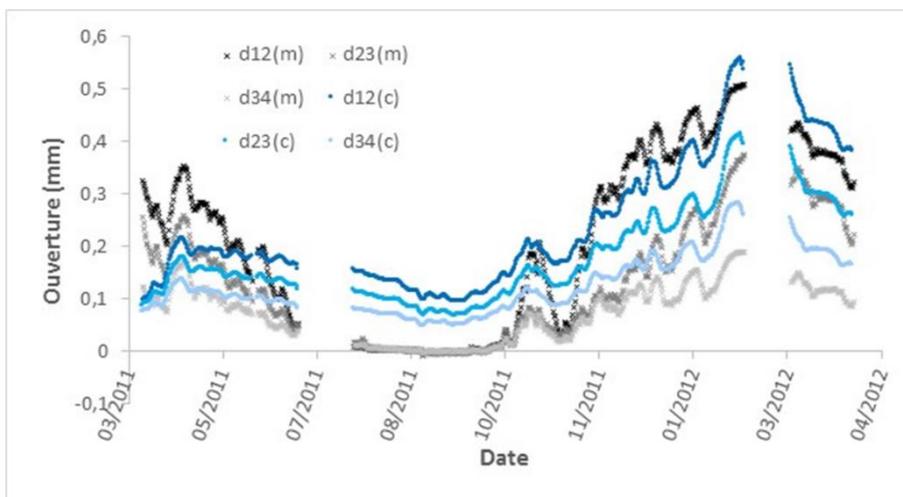


figure 2-8 : Ouvertures expérimentales ($d_{12}(m)$, $d_{23}(m)$ et $d_{34}(m)$) et numériques ($d_{12}(c)$, $d_{23}(c)$ et $d_{34}(c)$) sur une période d'un an.

- Etendre au volumique les résultats expérimentaux à partir de mesures par DVC ou H-DVC. Une piste de développement serait d'enrichir les conditions aux limites du modèle avec les informations fournies par les systèmes d'imagerie. Les applications actuelles se limitent aux essais de laboratoires (essais triaxial, oedométrique, brésilien, ...) car l'acquisition d'images volumiques est actuellement très bien maîtrisée en laboratoire (μ tomographie, synchrotron). Le travail collaboratif que je porte conjointement avec l'institut Pprime permet dorénavant de localiser finement des fissures 3D, en localisation leur position, leur ouverture, et leur glissement et aussi la position et la géométrie du front de fissure [Act.9]. Les applications permettraient d'améliorer la compréhension des phénomènes d'auto-colmatage ou de diffusion de gaz dans les roches fracturées. De plus, l'extension de la corrélation d'images volumiques au milieu fracturé permet de dissocier les parties déformations et fissurations.

Ce modèle numérique pourrait être étendu aux sols pour l'étude du retrait/gonflement, de la fissuration (réseaux, pénétration), ou de la stabilité des ouvrages (pentes talus, ...). Ces objets d'étude restent actuellement un axe de recherche important tant au niveau national que régional.

2.2 Développement d'un outil métrologique optique 3D in-situ.

Les enseignements en géotechnique que j'effectue à l'ENSI Poitiers et les discussions que j'ai très régulièrement avec les professionnels du domaine (bureaux d'ingénierie géotechnique) m'ont permis d'approfondir et de constater que peu de mesures faciles et directes existent pour quantifier les tassements et la déformation des sols et plus particulièrement les sols sujet au retrait/gonflement. En effet, en géotechnique 'classique' et suivant la mission géotechnique associée (G1 à G5), des questions reviennent très régulièrement :

Quelle est la portance des sols ou à quelle contrainte fait-on 'travailler' le sol ?

Quelles sont les valeurs des tassements ou de tassement différentiel ?

Quelles sont les limites de liquidité, plasticité, les valeurs de bleu ?

Quelle est la forme ('escalier', interface poutre/mur ou poteau mur, ...) des fissures sur le bâti ?

Quelle fondation a été choisie ?

De ce constat et fort de mon expérience en métrologie et plus particulièrement en métrologie optique, je me suis questionné sur le développement d'un outil de mesure direct et non invasif du comportement du sol. Dans la littérature des géosciences et à l'échelle de l'ingénieur, deux techniques de mesures des déformations verticales existent pour les sols.

La première technique est une tige instrumentée de capteurs positionnés à différentes profondeurs. Chaque capteur mesure un déplacement vertical (w). L'avantage de cette instrumentation est qu'avec un seul forage plus une tige, nous avons accès à l'information du déplacement en profondeur. Les inconvénients sont que les tiges doivent être scellées au sol au niveau de chaque capteur (difficile à réaliser) et que la course totale doit être de plusieurs centimètres, « *la position initiale ajustée suivant la saison d'installation* » et « *veiller à disposer d'un ancrage suffisamment profond pour garantir un niveau de référence supposé fixe (profondeur déterminée par les reconnaissances préalables)* » (Extrait de [79]).

Le second « *dispositif automatisé permet des mesures de déplacement par rapport à un scellement profond de référence pour une seule profondeur de suivi. Le suivi de plusieurs profondeurs nécessite donc l'installation d'autant de capteurs, d'où une nécessité* » non-

colocalisation » des points de mesure. » (Extrait de [79]). Cette approche nécessite, comme la technique précédente que « *le fond du sondage servant de référence à la mesure, ... suffisamment profond pour être supposé fixe* » (Extrait de [79]). Dans les deux méthodes précédentes, la mesure du déplacement correspond au retrait de la (des) couche(s) de sol entre le substratum (fixe) et la position des capteurs. A partir des limitations citées précédemment et des travaux de Coquet [80], j'ai envisagé un prototype de mesure du retrait/gonflement en profondeur d'un sol argileux et en se concentrant sur les couches superficielles de sol. Le dispositif, développé par Coquet [80], consiste à visser une tige dans le sol à la profondeur voulue (hypothèse : le vissage rend solidaire la tige et le sol). Pour mener cette première campagne de tests en laboratoire, j'ai proposé et encadré deux projets d'étudiant de 3^{ème} année du diplôme Génie de l'Eau et Génie Civil (ex Eau et Génie Civil) de l'ENSI Poitiers, donc les sujets portaient sur le couplage d'un système d'ancrage et une méthode optique nommée le suivi de marqueurs. Pour cela, nous avons adapté le système d'ancrage cité précédemment et ajouté une sphère (marqueur) à l'extrémité supérieure des tiges. Une caméra posée et fixe par rapport au terrain naturel (TN) enregistre les marqueurs au cours de la transformation. A l'inverse des méthodes utilisées dans le projet ARGIC [79], la mesure du déplacement correspond au retrait de la (des) couche(s) de sol entre la surface (T.N.) et la position de l'ancrage (sol remanié). Les premiers résultats prometteurs m'ont permis d'étendre le test sur le site expérimental de l'Université de Poitiers (site du Deffend) via deux nouveaux projets tutorés (étudiant du Master National Argile (M1) et un PIER (projet d'innovations d'études et de recherches composé de trois élèves ingénieurs de 3^{ème} année du diplôme Génie de l'Eau et Génie Civil de l'ENSI Poitiers). Ce site présente l'avantage d'être à proximité du laboratoire de recherche et il est équipé d'un abri électrifié indispensable pour les matériels nécessaires à l'expérience.

Sur la base de ce dispositif expérimental et du suivi de marqueurs [81], la première campagne expérimentale en laboratoire a été entreprise sur un sol non remanié argileux (carotte $\varnothing 400\text{mm}$ et $L=270\text{mm}$ de sol du marais Rochefortais, INRAe Saint-Laurent-de-la-Prée) sur une période de 28 jours pour trois tiges ancrées à 7, 14 et 23 centimètres. La figure 2-9a montre clairement une évolution différente et cohérente du déplacement vertical (w) en fonction de la profondeur d'ancrage des tiges, car plus la tige est proche ($z=7\text{cm}$) de la surface (surface d'échange) plus le déplacement vertical est important, donc la dessiccation importante. Les oscillations locales que l'on distingue ne sont pas dues au bruit de mesure mais à la sensibilité du sol dues aux variations journalières de température/humidité dans le laboratoire. Il faudra aussi menée une étude de sensibilité de la dilation thermique des tiges. En première approximation, l'allongement peut atteindre $60\mu\text{m}$ pour des tiges dépassant de 23 centimètres par rapport au terrain naturel

En plus du déplacement vertical (w), le suivi de marqueurs permet de mesurer le déplacement horizontal (u) (figure 2-9b) de chaque tige dû au retrait/gonflement latéral et à l'ouverture/fermeture des fissures de dessiccation sans toutefois les dissocier. Le déplacement hors-plan (v) (i.e. suivant l'axe de la caméra) ne peut être mesuré. Il faudrait pour cela envisager la version stéréo du suivi de marqueurs [82].

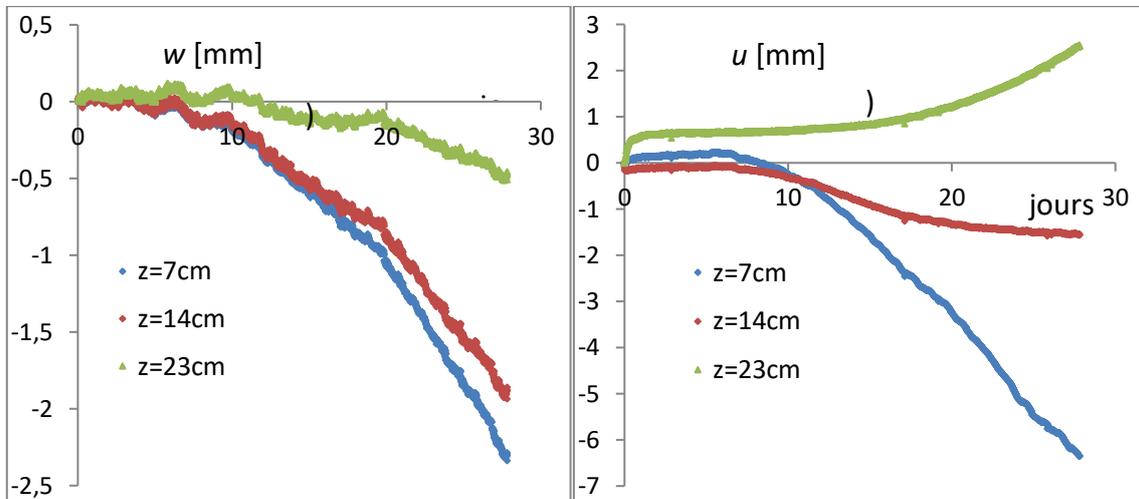


figure 2-9 : Evolution des déplacements (a) verticaux (w) et (b) horizontaux (u) pour $z=7\text{cm}$ (proche de la surface), $z=14\text{cm}$ et $z=23\text{cm}$ en fonction du nombre de jours.

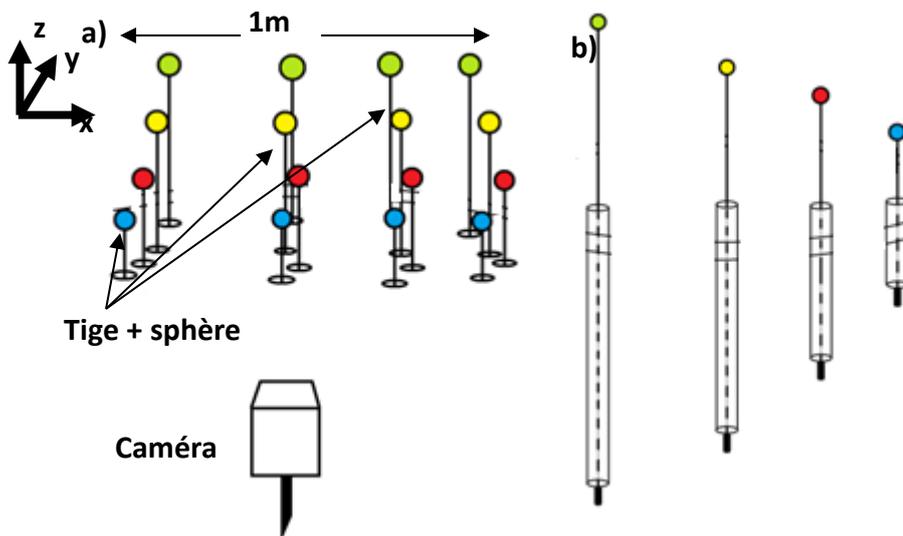


figure 2-10 : a) Schéma de principe d'une instrumentation in-situ pour le suivi du retrait tridimensionnel d'un sol argileux. b) schéma de la profondeur d'ancrage des tiges.

Les deux expériences en laboratoire montrent des résultats prometteurs sur l'utilisation de ce dispositif pour suivre le retrait vertical d'un sol argileux. Les campagnes in-situ d'une parcelle ($2 \times 2 \text{ m}^2$) (figure 2-11) ont permis d'obtenir des valeurs du déplacement vertical et de les comparer aux données météorologiques du site. Malgré quelques résultats

intéressants sur une période deux mois, les résultats préliminaires journaliers sont peu concluants car les images enregistrées présentent un fort contraste des niveaux de gris (jour/nuit) et ceci malgré l'utilisation d'une caméra évoluant dans le proche infra-rouge et l'utilisation de projecteurs et de marqueurs *ad-oc*. J'ai alors développé en interne un algorithme de suivi de marqueurs pour limiter l'influence de ces fortes variations de luminosité sur les valeurs de déplacements et la nouvelle campagne améliore significativement le bruit de mesure. L'autre axe d'amélioration porte sur la rigidification des tiges 'support de marqueurs' pour limiter les mouvements parasites (ex : le vent).

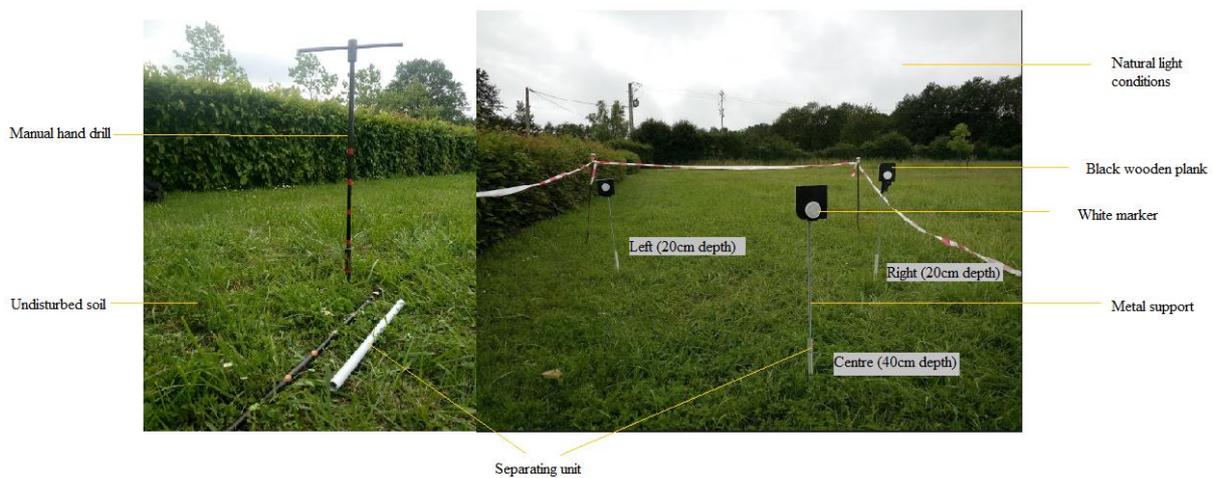


figure 2-11 : Exemple de trois marqueurs ancrés à trois profondeurs sur le site du deffend de l'Université de Poitiers. Extrait de [83]

Parallèlement à mon travail de développement, je me suis rapproché de l'INRAe de Saint Laurent de la Prée (17) pour leur présenter cet outil. Après discussion, cet outil métrologique les intéresse dans le but de quantifier les tassements annuels dus à la préparation des sols. Les chercheurs de l'INRAe se focalisent actuellement sur l'influence de la préparation des parcelles sur les rendements céréaliers. La préparation des sols évolue entre aucun labour jusqu'à des labours supérieurs à trente centimètres. Grâce à mon outil métrologique, une donnée quantifiable du comportement mécanique des sols pourraient aider à la compréhension de la réaction des sols vis-à-vis de la préparation, de la biodiversité et à une comparaison avec les rendements. Les principales difficultés identifiées résident dans la cohabitation entre les travaux d'agriculture, la hauteur des céréales (< à la hauteur des marqueurs) et l'outil métrologique in-situ.

Ce moyen de mesure original pourra également faire l'objet d'un dépôt de brevet et/ou faire l'objet d'une collaboration industrielle avec des partenaires des domaines de la géotechnique et du génie civil car cet outil peut facilement être étendu/ adapté à l'étude des mouvements d'une structure, d'un bâtiment (ex : expertise sur un bâtiment historique).

Références.

- [1] Darve F. Le GRECO « géomatériaux » : objectifs et programme de recherches. Rev Fr Géotechnique 1989;5–7. <https://doi.org/10.1051/geotech/1989046005>.
- [2] RAPPORT IRSN N°2014-00006 ; Projet de stockage Cigéo. Ouvrages de fermeture. Réunion du groupe permanent d'experts pour les «Déchets». 2014. http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_gp/Documents/Dechets/IRSN-GP_Cigeo-2014.pdf.
- [3] Rejeb A, Tijani M. Champ de contrainte dans les argilites de Tournemire. Mesures in situ et interprétation. Rev Fr Géotechnique 2003;75–84.
- [4] Rejeb A, Cabrera J. Time-dependent evolution of the excavation damaged zone in the argillaceous Tournemire site 2006.
- [5] Davy CA, Skoczylas F, Barnichon J-D, Lebon P. Permeability of macro-cracked argillite under confinement: Gas and water testing. Phys Chem Earth Parts ABC 2007;32:667–80. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.055>.
- [6] Cabrera J., Beaucaire C., Bruno G., De Windt L., Genty A., Ramambasoa N. et al. Synthèse des Résultats des Programmes de Recherche 1995/1999. IRSN Report 2001.
- [7] Fauchille AL. Déterminismes microstructuraux et minéralogiques de la fissuration hydrique dans les argilites de Tournemire : apports couples de la pétrographie quantitative et de la corrélation d'images numériques. Université de Poitiers, n.d.
- [8] Savatier F. Aux limites de l'être humain. Purlascience.fr n.d. <https://www.purlascience.fr/sd/biologie/aux-limites-de-letre-humain-7070.php>.
- [9] Wolf H, König D, Triantafyllidis Th. The influence of the stress–strain behavior of non-cohesive soils on the geometry of shear band systems under extensional strain. Eng Struct 2006;28:1760–73. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.11.008>.
- [10] Wang L-L, Tang C-S, Shi B, Cui Y-J, Zhang G-Q, Hilary I. Nucleation and propagation mechanisms of soil desiccation cracks. Eng Geol 2018;238:27–35. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.004>.
- [11] El Hajjar A, Ouahbi T, Eid J, Hattab M, Taibi S. Shrinkage cracking of unsaturated fine soils: New experimental device and measurement techniques. Strain 2020:e12352. <https://doi.org/10.1111/str.12352>.
- [12] Hall SA, Desrues J, Viggiani G, Bésuelle P, Andò E. Experimental characterisation of (localised) deformation phenomena in granular geomaterials from sample down to inter- and intra-grain scales. Procedia Iutam 2012;4:54–65.
- [13] Nguyen TL, Hall SA, Vacher P, Viggiani G. Fracture mechanisms in soft rock: Identification and quantification of evolving displacement discontinuities by extended digital image correlation. Tectonophysics 2011;503:117–28. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.09.024>.

- [14] Bornert M. X-ray micro CT for studying strain localization in clay rocks under triaxial compression. *Adv X-Ray Tomogr Geomater* 2010;118:35.
- [15] Besuelle P., Viggiani G., Desrues J., Bornert M. X-ray micro CT for studying strain localization in clay rocks under triaxial compression. *X-Ray Tomogr. Geomaterials*, London: ISTE Ltd; 2006, p. 35–52.
- [16] Lenoir N, Bornert M, Desrues J, Bésuelle P, Viggiani G. Volumetric digital image correlation applied to X-ray microtomography images from triaxial compression tests on argillaceous rock. *Strain* 2007;43:193–205.
- [17] IRSN n.d. <https://www.irsn.fr/dechets/recherche/outils/tournemire/Pages/1996-etudes-geomecaniques.aspx> (accessed February 20, 2019).
- [18] Sutton M, Wolters W, Peters W, Ranson W, McNeill S. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image Vis Comput* 1983;1:133–9. [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(83\)90064-1](https://doi.org/10.1016/0262-8856(83)90064-1).
- [19] Bruck HA, McNeill SR, Sutton MA, lii WHP. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction. *Exp Mech* 1989;29:261–7. <https://doi.org/10.1007/BF02321405>.
- [20] Grédiac M, Pierron F. Applying the Virtual Fields Method to the identification of elastoplastic constitutive parameters. *Int J Plast* 2006;22:602–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2005.04.007>.
- [21] Schreier HW, Sutton MA. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions. *Exp Mech* 2002;42:303–10. <https://doi.org/10.1007/BF02410987>.
- [22] Allais L, Bornert M, Bretheau T, Caldemaison D. Experimental characterization of the local strain field in a heterogeneous elastoplastic material. *Acta Metall Mater* 1994;42:3865–80.
- [23] BRÉMAND F, COTTRON M, DOUMALIN P, DUPRÉ J-C, GERMANEAU A, VALLE V. Mesures en mécanique par méthodes optiques 2011. <https://www-techniques-ingenieur-fr.ressources.univ-poitiers.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/grandeurs-mecaniques-42407210/mesures-en-mecanique-par-methodes-optiques-r1850/>.
- [24] Jin H, Bruck HA. Pointwise digital image correlation using genetic algorithms. *Exp Tech* 2005;29:36–9.
- [25] Poissant J, Barthelat F. A Novel “Subset Splitting” Procedure for Digital Image Correlation on Discontinuous Displacement Fields. *Exp Mech* 2009;50:353–64. <https://doi.org/10.1007/s11340-009-9220-2>.
- [26] Réthoré J, Roux S, Hild F. From pictures to extended finite elements: extended digital image correlation (X-DIC). *Comptes Rendus Mécanique* 2007;335:131–7. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2007.02.003>.

- [27] Valle V, Hedan S, Cosenza P, Fauchille AL, Berdjane M. Digital Image Correlation Development for the Study of Materials Including Multiple Crossing Cracks. *Exp Mech* 2015;55:379–91. <https://doi.org/10.1007/s11340-014-9948-1>.
- [28] Bourdin F, Stinville JC, Echlin MP, Callahan PG, Lenthe WC, Torbet CJ, et al. Measurements of plastic localization by heaviside-digital image correlation. *Acta Mater* 2018;157:307–25. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.013>.
- [29] Hedan S, Valle V, Cabrera J, Cosenza P. A new approach to quantify the anisotropy of hydromechanical strains in clay-rock at the gallery scale. *Int J Rock Mech Min Sci* 2018;111:45–53. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2018.07.004>.
- [30] Valle V, Laou L, Léandry I, Yotte S, Rossignol S, Hedan S. Crack Analysis in Mudbricks under Compression Using Specific Development of Stereo-Digital Image Correlation. *Exp Mech* 2018;58:475–86. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0363-2>.
- [31] Bokam P, Germaneau A, Rigoard P, Vendevre T, Valle V. Evaluation of fracture properties of cancellous bone tissues using digital image correlation/wedge splitting test method. *J Mech Behav Biomed Mater* 2020;102:103469. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103469>.
- [32] Berdjane MO. Investigations expérimentales et numériques, surfacique et volumique pour l'évaluation de la dimension de la zone plastique dans des éprouvettes fissurées et sollicitées en mode I : application aux polymères PEBD et PP. 2017.
- [33] Bornert M, Vales F, Gharbi H, Nguyen Minh D. Multiscale Full-Field Strain Measurements for Micromechanical Investigations of the Hydromechanical Behaviour of Clayey Rocks. *Strain* 2010;46:33–46.
- [34] Möri A., Bossart P., Matray JM., Franck E., Fatmi H., Ababou R. Mont terri project: cyclic deformations in the opalinus clay. *Proc. Int. Meet. Clay Nat. Eng. Barriers Radioact. Waste Confin.*, Nantes: 2010.
- [35] Mammadi Younès. Métrologie optique à petite échelle sous Microscope Électronique à Balayage: Mesures de champs cinématiques en présence de discontinuités, par couplage FIB-MEB-CIN. Université de Poitiers, 2020.
- [36] Roux S, Hild F. Digital Image Mechanical Identification (DIMI). *Exp Mech* 2008;48:495–508. <https://doi.org/10.1007/s11340-007-9103-3>.
- [37] Claire D, Hild F, Roux S. A finite element formulation to identify damage fields: the equilibrium gap method. *Int J Numer Methods Eng* 2004;61:189–208.
- [38] Wang LL, Bornert M, Chanchole S, Yang DS, Héripré E. Micro-scale experimental investigation of the swelling anisotropy of the Callovo-Oxfordian argillaceous rock. *Clay Miner* 2013;48:391–402.
- [39] Valès F, Nguyen Minh D, Gharbi H, Rejeb A. Experimental study of the influence of the degree of saturation on physical and mechanical properties in Tournemire shale (France). *Appl Clay Sci* 2004;26:197–207. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.12.032>.

- [40] Pham QT, Vales F, Malinsky L, Nguyen Minh D, Gharbi H. Effects of desaturation–resaturation on mudstone. *Phys Chem Earth Parts ABC* 2007;32:646–55. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.03.012>.
- [41] Coussy O. *Poromechanics*. John Wiley & Sons; 2004.
- [42] Cariou S, Duan Z, Davy C, Skoczylas F, Dormieux L. Poromechanics of partially saturated CO_x argillite. *Appl Clay Sci* 2012;56:36–47. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.11.021>.
- [43] Bishop AW. The principle of effective stress. *Tek Ukebl* 1959;39:859–63.
- [44] Christensen RM. *Mechanics of composite materials*. Courier Corporation; 2012.
- [45] Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs-ANDRA. Stockage réversible profond- Tome 2. Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne. Report C.RP.ADS.09.0007.B 2009.
- [46] Dewhurst DN, Siggins AF, Sarout J, Raven MD, Nordg\ a ard-Bol\ a as HM. Geomechanical and ultrasonic characterization of a Norwegian Sea shale. *Geophysics* 2011;76:WA101–11.
- [47] Sarout J, Guéguen Y. Anisotropy of elastic wave velocities in deformed shales: Part 1—Experimental results. *Geophysics* 2008.
- [48] Armand G, Noiret A, Zghondi J, Seyedi DM. Short- and long-term behaviors of drifts in the Callovo-Oxfordian claystone at the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory. *J Rock Mech Geotech Eng* 2013;5:221–30. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.05.005>.
- [49] Wakim J. Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses. phdthesis. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.
- [50] Sammartino S, Bouchet A, Prêt D, Parneix J-C, Tevissen E. Spatial distribution of porosity and minerals in clay rocks from the Callovo-Oxfordian formation (Meuse/Haute-Marne, Eastern France)—implications on ionic species diffusion and rock sorption capability. *Appl Clay Sci* 2003;23:157–66. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(03\)00098-X](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(03)00098-X).
- [51] Fauchille A-L, Hedan S, Valle V, Pret D, Cabrera J, Cosenza P. Multi-scale study on the deformation and fracture evolution of clay rock sample subjected to desiccation. *Appl Clay Sci* 2016;132–133:251–60. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.054>.
- [52] Hillel D. *Soil and Water: Physical Principles and Processes*, 1971. Academic Press; n.d.
- [53] Gasc-Barbier M. Etude des mécanismes de déformation de roches argileuses profondes: Apport de la microstructure et des analyses pétrophysiques. PhD Thesis. Paris 6, 2002.
- [54] Wang LL, Bornert M, Héripré E, Chanchole S, Tanguy A. Full-Field Measurements on Low-Strained Geomaterials Using Environmental Scanning Electron Microscopy and Digital Image Correlation: Improved Imaging Conditions. *Strain* 2014;50:370–80. <https://doi.org/10.1111/str.12076>.

- [55] Hallaire V, Bouma J, Raats PAC. Evolution of crack networks during shrinkage of a clay soil under grass and winter wheat crops. Proc ISSS Symp. Water Solute Mov. Heavy Clay Soils ILRI Wagening. Neth., 1984.
- [56] Grigc. Caractérisations expérimentales et modélisations multi-échelles des comportements couplés THMBC des roches poreuses : application aux ouvrages souterrains 2011.
- [57] Li JH, Zhang LM. Study of desiccation crack initiation and development at ground surface. Eng Geol 2011;123:347–58. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.09.015>.
- [58] Baer JU, Kent TF, Anderson SH. Image analysis and fractal geometry to characterize soil desiccation cracks. Geoderma 2009;154:153–63. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.008>.
- [59] Tang C, Shi B, Liu C, Zhao L, Wang B. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. Eng Geol 2008;101:204–17. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.05.005>.
- [60] Ramambasoa. Etude du comportement hydromécanique des argilites. Application au site de Tournemire. Thèse de l'École Polytechnique, 2001.
- [61] ROUX JL. La transformée de Fourier et ses applications (partie 1). Ref TIP052WEB - Mathématiques 2007. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/applications-des-mathematiques-42102210/la-transformee-de-fourier-et-ses-applications-partie-1-af1440/> (accessed March 3, 2020).
- [62] Bailly D, Matray J-M, Ababou R. Temporal behavior of a ventilated claystone at the Tournemire URL: Cross-spectral analyses focused on daily harmonics. Eng Geol 2014;183:137–58. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.005>.
- [63] Prêt D, Sammartino S, Beaufort D, Meunier A, Fialin M, Michot LJ. A new method for quantitative petrography based on image processing of chemical element maps: Part I. Mineral mapping applied to compacted bentonites. Am Mineral 2010;95:1379–88.
- [64] Prêt D, Sammartino S, Beaufort D, Fialin M, Sardini P, Cosenza P, et al. A new method for quantitative petrography based on image processing of chemical element maps: Part II. Semi-quantitative porosity maps superimposed on mineral maps. Am Mineral 2010;95:1389–98.
- [65] Fauchille AL, Hedan S, Prêt D, Cosenza P, Valle V, Cabrera J. Relationships between desiccation cracking behavior and microstructure of the Tournemire clay-rock by coupling DIC and SEM methods. Geomech Micro Macro Ed Soga K Kumar K Biscontin G Kuo M 2015:1421–4.
- [66] David C, Robion P, Menéndez B. Anisotropy of elastic, magnetic and microstructural properties of the Callovo-Oxfordian argillite. Phys Chem Earth Parts ABC 2007;32:145–53. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.11.003>.

- [67] Giot R, Granet S, Faivre M, Massoussi N, Huang J. A transversely isotropic thermo-poroelastic model for claystone: parameter identification and application to a 3D underground structure. *Geomech Geoengin* 2018;13:246–63.
- [68] Desrues J, Nguyen TK, Combe G, Caillerie D. FEM × DEM Multi-scale Analysis of Boundary Value Problems Involving Strain Localization. In: Chau K-T, Zhao J, editors. *Bifurc. Degrad. Geomaterials New Millenn.*, Springer International Publishing; 2015, p. 259–65.
- [69] Pardoën B, Pont SD, Desrues J, Bésuelle P, Prêt D, Cosenza P. Heterogeneity and variability of clay rock microstructure in a hydro-mechanical double scale FEMxFEM analysis. *Micro MACRO Math. Model. Soil Mech.*, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99474-1_25.
- [70] van den Eijnden AP, Bésuelle P, Chambon R, Collin F. A FE2 modelling approach to hydromechanical coupling in cracking-induced localization problems. *Int J Solids Struct* 2016;97–98:475–88. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.07.002>.
- [71] Code_Aster n.d. <https://www.code-aster.org/spip.php?rubrique1>.
- [72] Brevet IRSN n.d.
- [73] Smit RC. Discrete 3D digital image correlation (DIC) using particle reconnaissance. *Delft Univ Technol* 2010.
- [74] Andò E, Hall SA, Viggiani G, Desrues J, Bésuelle P. Grain-scale experimental investigation of localised deformation in sand: a discrete particle tracking approach. *Acta Geotech* 2012;7:1–13.
- [75] Andò E, Hall SA, Viggiani G, Desrues J, Bésuelle P. Grain-scale experimental investigation of localised deformation in sand: a discrete particle tracking approach. *Acta Geotech* 2012;7:1–13.
- [76] Li Y, Xie H, Luo Q, Gu C, Hu Z, Chen P, et al. Fabrication technique of micro/nano-scale speckle patterns with focused ion beam. *Sci China Phys Mech Astron* 2012;55:1037–44. <https://doi.org/10.1007/s11433-012-4751-4>.
- [77] Choi S, Shah SP. Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation. *Exp Mech* 1997;37:307–13. <https://doi.org/10.1007/BF02317423>.
- [78] Mazzoni A. Comportement thermomécanique d'un béton réfractaire: Effets du renforcement par des fibres minérales. PhD Thesis. 2009.
- [79] Projet ARGIC (Analyse du retrait-Gonflement et de ses incidences sur les constructions - Projet ANR-05-PRGCU-005 2009.
- [80] Coquet Y. In situ measurement of the vertical linear shrinkage curve of soils. *Soil Tillage Res* 1998;46:289–99. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00033-6).
- [81] Bretagne N, Valle V, Dupré JC. Development of the marks tracking technique for strain field and volume variation measurements. *NDT E Int* 2005;38:290–8. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.09.003>.

- [82] Germaneau A, Vendeuvre T, Saget M, Doumalin P, Dupré JC, Brémand F, et al. A novel approach for biomechanical spine analysis: Mechanical response of vertebral bone augmentation by kyphoplasty to stabilise thoracolumbar burst fractures. *J Mech Behav Biomed Mater* 2016;59:291–303. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.02.002>.
- [83] Saicharan Bolleni. Mark tracking software 3D soil deformation. 2018.

PARTIE B : INFORMATIONS ADMINISTRATIVES.

Cette partie a pour but de mettre en avant les éléments nécessaires à l'évaluation de ma candidature à l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches.

1 Curriculum vitae

Stephen HEDAN,

40 ans, Pacsé, 2 enfants (Lise, née le 25/06/2011 ; Valentine née le 19/06/2015)

Fonction actuelle	Maître de conférences (Section 60 des Universités) Institut de Chimie des milieux et Matériaux de POITIERS UMR 7285 CNRS –Université de POITIERS Bâtiment B1 ENSIP, 1 Rue Marcel Doré TSA41105 86073 POITIERS CEDEX 9 Tel : +33 (0)5 49 45 35 48 Mél : stephen.hedan@univ-poitiers.fr
--------------------------	--

Formation :

2005–2008 : **Thèse de Doctorat**, Laboratoire de Mécanique des Solides (LMS, Université de POITIERS). Direction : Professeurs COTTRON Mario et VALLE Valéry. *Mesures par voie optique de champs cinématiques pour l'étude du comportement des plaques élastiques fissurées et chargées en mode I : Formulation des déplacements 2D par confrontation numérique/expérience en statique. Analyse des effets 3D en dynamique.* Spécialité : Mécanique des solides, des matériaux, des structures et des surfaces.

2004–2005 : **Préparation à l'Agrégation** de Mécanique et au **CAPLP** de Génie mécanique Construction, Université et IUFM de Poitiers.

2003–2004 : **Diplôme d'Etudes Approfondies** en Mécanique des Solides, Université de Poitiers. Projet de recherche : *Conception d'un banc de mesure optique tridimensionnelle basée sur la technique de moiré de projection.*

2002–2003 : **Maîtrise de Technologie Mécanique**, Université de Poitiers.

Préparation au CAPET Génie Mécanique Construction, IUFM de Poitiers

2001–2002 : **Licence de Technologie Mécanique**, Université de Poitiers.

1999–2001 : **Brevet de Technicien Supérieur**, Lycée de Pons.

Carrière universitaire :

2009–... : **Maître de conférences** affecté au Laboratoire d'Hydrogéologie, Argile, Sols et Altérations (HydrASA, UMR CNRS-Université de POITIERS) devenu depuis le 01/01/2012 IC2MP, UMR 7285 CNRS-Université de POITIERS.

2008–2009 : **Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER)** à l'Université de POITIERS, au laboratoire de Mécanique des Solides (LMS) devenu depuis l'institut Pprime.

2005–2008 : Allocataire de recherche, Université de Poitiers, laboratoire de Mécanique des Solides (LMS), dans le cadre de la préparation d'une thèse de doctorat.

1.1 Résumé des travaux de recherche

Thèmes de recherche

L'originalité de mes travaux de recherche réside dans la mise en œuvre d'approches expérimentales non invasives, non destructives pour quantifier les champs mécaniques, hydromécaniques au sein des matériaux, géomatériaux sous différentes sollicitations (mécanique, hydrique et thermique).

Les méthodes de mesures de grandeurs expérimentales permettent d'acquérir à une caractérisation 2D ou 3D fine du comportement du milieu étudié qui sert de support à la formulation de schémas conceptuels du milieu et/ou à la validation de modèles numériques.

Je participe à différentes activités au sein de l'équipe E2 Hydrasa de l'IC2MP (institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers, UMR7285) qui nécessitent des avancées

métrologiques importantes. Mes activités s'orientent principalement autour de la thématique suivante :

Analyse du comportement (thermo)-hydromécanique d'une roche argileuse.

La partie importante de mes travaux de recherche concerne la détermination et l'analyse expérimentale de la réponse hydromécanique induite par une microstructure hétérogène, un chargement hygrométrique et un endommagement du milieu.

Les méthodes optiques ou photomécaniques sont très bien adaptées pour des travaux dans le domaine de la géomécanique. Par exemple, nous avons employé la CIN pour analyser la réponse hydromécanique d'un échantillon millimétrique ($5 \times 5 \times 2 \text{ cm}^3$), mais aussi une partie d'un front de galerie ($34,4 \times 27,5 \text{ cm}^2$). Afin d'appréhender au mieux ce genre de problème, l'utilisation de méthodes expérimentales s'avère indispensable. Ces techniques nécessitent l'acquisition d'images d'une même scène des matériaux analysées, mais aussi un couplage avec les variables d'état (température T , humidité relative (RH), degré de saturation (S), ...).

Parallèlement, nous avons réalisé plusieurs travaux pour améliorer les algorithmes de CIN afin d'offrir une analyse complète des problèmes mécaniques en tenant compte de discontinuités (fissures) du milieu. Cette étude a été à l'origine de relations fortes avec l'axe PEM de l'institut Pprime de Poitiers avec lequel je collabore pour le développement de nouveaux algorithmes de corrélation d'images (2D : H-DIC ; 2D1/2 : S H-DIC ; 3D : H-DVC). Ce travail de développement a fait l'objet de plusieurs publications internationales et me permet aujourd'hui de disposer d'algorithmes de corrélation pour des études surfaciques ($u(x,y)$, $v(x,y)$), stéréoscopiques ($u(x,y)$, $v(x,y)$, $w(x,y)$) et volumiques ($u(x,y,z)$, $v(x,y,z)$, $w(x,y,z)$).

L'objectif est d'apporter de meilleures connaissances spatiales en termes de fracturation, déformations, anisotropie, fracturation de la roche argileuse ou argilite, roche ayant été retenue pour la possible construction d'un site de stockage en géologie profonde.

Faits marquants

L'application et la mise en œuvre des techniques de mesure de champs sur des roches argileuses permettent d'aborder des problèmes fondamentaux liés à la présence d'une zone endommagée, provoquée par la création de galerie/alvéole souterraine, et dont le massif rocheux subit des changements (confinement, convergence, saturation) et sa mise au contact avec l'air ambiant. Sa description fine et temporelle à différentes échelles permet de décrire les mécanismes associés et de comparer mes résultats expérimentaux aux modèles numériques. Cela passe par des essais à différentes échelles à différentes sollicitations.

- Etude in-situ en paroi de galerie par CIN.

Une analyse pluri-annuelle a été faite de la réponse hydromécanique d'un front de galerie de la station expérimentale de Tournemire (IRSN) soumise à des variations naturelles d'hygrométrie. Le traitement des résultats a permis d'enrichir la compréhension de la fracturation de dessiccation, mais aussi de quantifier l'anisotropie des déformations hydriques et la porosité de fracturation sur cette même période. Les dernières analyses permettent dorénavant de mesurer localement les déplacements des lèvres de ces fissures et donc de déterminer les modes de fractures (mode d'ouverture, cisaillement) mis en jeu localement et temporellement. Cette fracturation permet aussi de quantifier la porosité de fractures.

- Couplage microstructure/champs mécaniques

L'étude de la fracturation des roches sédimentaires argileuses montrent une orientation privilégiée concomitante à sa stratification. Cette corrélation pourrait être en partie contrôlée par sa minéralogie. Des analyses multi-échelles (microscopique et mésoscopique) menées simultanément et couplées à des données minéralogiques spatialisées (cartographie minéralogie) ont permis de faire évoluer les modèles conceptuels sur la déformation et la fracturation de cette roche argileuse.

Les résultats montrent un taux de fracturation supérieur par rapport aux essais en galerie. Cette fracturation couplée au retrait de la phase solide de la roche correspond à la déformation totale des échantillons. La superposition des déformations et de la microstructure ne permet pas d'affirmer que la microstructure contrôle la déformation de la roche. Toutefois, les hétérogénéités microstructurales observées orientent le chemin des fissures de dessiccation mesurées.

1.2 Publications et communications

Publications internationales	22
Communications internationales	25
Communications nationales	30

1.2.1 Articles publiés dans des revues de rang A :

[Act.1] Giot R, Hédan S, Cosenza P. Hydro-mechanical numerical modelling of the opening and closing of desiccation cracks in clayey rock. Eur J Environ Civ Eng. 2020. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19648189.2020.1773320>.

- [Act.2] Hedan S, Valle V, Cosenza P (2020) Subpixel precision of crack lip movements by Heaviside-based digital image correlation for a mixed-mode fracture. *Strain* e12346. <https://doi.org/10.1111/str.12346>.
- [Act.3] Mammadi Y, Joseph A, Joulain A, et al (2020) Nanometric metrology by FIB-SEM-DIC measurements of strain field and fracture separation on composite metallic material. *Mater Des* 108665. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108665>.
- [Act.4] Cosenza P, Prêt D, Fauchille A-L, Hedan S (2019) Representative elementary area of shale at the mesoscopic scale. *Int J Coal Geol* 216:103316. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.103316>
- [Act.5] Fauchille A-L, Hedan S, Valle V, Cabrera J, Cosenza P. (2019) Effect of microstructure on hydric strain in clay rock: A quantitative comparison. *Appl Clay Sci* 182:105244. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105244>.
- [Act.6] Cosenza P, Fauchille A-L, Prêt D, Hedan S, Giraud A. Statistical representative elementary area of shale inferred by micromechanics. *International Journal of Engineering Science* 2019;142:53–73. doi:10.1016/j.ijengsci.2019.05.012.
- [Act.7] Hédan, S., Valle, V., Cabrera J., Cosenza P. « A new approach to quantify the anisotropy of hydromechanical strains in clay-rock at the gallery scale ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 111, (2018): 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.07.004>.
- [Act.8] Valle, V., Laou L., Léandry I., Yotte S., S. Rossignol, Hédan, S. « Crack Analysis in Mudbricks under Compression Using Specific Development of Stereo-Digital Image Correlation ». *Experimental Mechanics* 58(3), 2018: 475-86. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0363-2>.
- [Act.9] Valle, V., Bokam P., Germaneau A., Hédan, S. « New Development of Digital Volume Correlation for the Study of Fractured Materials ». *Experimental Mechanics*, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11340-018-0415-2>.
- [Act.10] Jia, L. Y., Al Farouha, Pinard L., Hédan, S., Comparot J.-D., Dufour A., Ben Tayeb K., Vezin H., Batiot-Dupeyrat C. « New routes for complete regeneration of coked zeolite ». *Applied Catalysis B: Environmental* 219 (2017): 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.07.040>.
- [Act.11] Fauchille, A-L., Hédan, S., Valle V., Prêt D., Cabrera J., Cosenza P. « Multi-scale study on the deformation and fracture evolution of clay rock sample subjected to desiccation ». *Applied Clay Science* 132–133 (2016): 251-60. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.054>.
- [Act.12] Hédan S., Hubert F., Ferrage E., Valle V., Cosenza P., « Measurement of the elastic properties of swelling clay minerals using the digital image correlation method on a single macroscopic crystal ». *Applied Clay Science* 116–117 (2015): 248-256. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.04.002>.

- [Act.13] Cosenza, P., Prêt D., Giraud A., Hédan S. « Effect of the local clay distribution on the effective elastic properties of shales ». *Mechanics of Materials* 84, 55-74 (2015). <https://doi:10.1016/j.mechmat.2015.01.016>.
- [Act.14] Valle, V., Hédan, S., Cosenza P., Fauchille A-L., Berdjane M., « Digital Image Correlation development for the study of materials including multiple crossing cracks », *Experimental Mechanics*, 55(2), pp 379-39,1 (2015). doi:10.1007/s11340-014-9948-1.
- [Act.15] Hédan, S., Fauchille A-L., Valle, V., Cabrera J., Cosenza P. « One-year monitoring of desiccation cracks at Tournemire experimental station using Digital Image Correlation », *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 68, pp 22-35, (2014)
- [Act.16] Hédan, S., Cosenza P., Valle, V., Dudoignon P., Fauchille A-L., Cabrera J. « Experimental investigation of the damage process induced by desiccation and heating in Tournemire argillite using Digital Image Correlation », *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 51, pp 64-75, (2012)
- [Act.17] Hédan, S., Valle, V., Cottron, M. « Calculation of J-integrals using experimental and numerical data. Influences of ratio (a/W) and the 3D structure », *Engineering Fracture Mechanics*, 78(9), pp 1976-1985, (2011).
- [Act.18] Hédan, S., Pop O., Valle, V., Cottron, M. « FE and experimental investigation with shadow optical method for measuring plastic zone in a ductile cracked plate », *Strain*, 47 (SUPPL. 1), pp. e142-e147 (2011)
- [Act.19] Hédan, S., Valle, V., Cottron, M. « In Plane Displacement Formulation for Finite Cracked Plates under Mode I Using Grid Method and Finite Element Analysis », *Experimental Mechanics*, 50(3), pp 401-412, (2010).
- [Act.20] Barranger, Y., Doumalin, P., Dupre, J-C., Germaneau, A., Hédan, S., Valle, V. « Evaluation of three-dimensional and two-dimensional full displacement fields of a single edge notch fracture mechanics specimen, in light of experimental data using x-ray tomography ». *Engineering Fracture Mechanics*, 76(15), pp 2371–2383, (2009).
- [Act.21] Hédan, S., Valle, V., Cottron, M. « Localisation expérimentale des effets 3D et transitoires en pointe de fissure pour différentes vitesses de propagation sur des matériaux fragiles », *C.R. de Mécanique*, 335(4), pp 238-244, (2007).
- [Act.22] Hédan, S., Pop O., Valle, V., Cottron, M. « Dynamic optical interferometry applied to analyse out-of-plane displacement fields for crack propagation in brittle materials », *Journal de Physique IV*, 134, pp 597-601, (2006).

1.2.2 Autres articles publiés :

[Act.23] Cosenza P., Hédan, S., Valle V. « Caractérisation non destructive de la zone endommagée des galeries souterraines excavées dans les roches argileuses ». Revue Française de Géotechnique, no 148 (2016): 4.

1.2.3 Article soumis(en préparation) dans des revues de rang A :

[Act.24] Hédan S., Cosenza P., Valle V. « Evaluation of the patterns and behavior in mixed-mode of desiccation cracks on a clayey rock front gallery », soumis à Rock Mechanics and Rock Engineering.

[Act.25] Hédan S., Cosenza P., Valle V. « Multi-scale hydromechanical behavior of a transversely isotropic argillaceous rock ». en préparation.

1.2.4 Conférences invitées :

[C.I.1] Présentation orale réalisée par : Hédan S. « Nouvelles techniques appliquées à la géotechnique pour l'étude du comportement mécanique par métrologie optique », Journée technique pour les 20 ans de la société EG SOL, 23 Novembre 2018

[C.I.2] Présentation orale réalisée par : Hédan S. « Suivi optique du comportement mécanique des ouvrages souterrains », Journée scientifique et technique du CFMR-AGAP, 2 Juin 2016

[C.I.3] Présentation orale réalisée par : Hédan S. « One-year monitoring and digital image analysis of in-situ desiccation cracks on Tournemire argillite rock », Symposium « Rock Mechanics and Rock Engineering of Geological Repositories in Opalinus Clay and similar Claystone Rocks, 14 Février 2014, ETH Zurich (Suisse)

[C.I.4] Présentation orale réalisée par : Hédan S. « Interférométrie dynamique pour l'étude de la propagation de fissures sur des matériaux fragiles. Etendue de la zone des effets tridimensionnels et transitoires en pointe de fissure », MESUREXPO, colloque ASTELAB : session Extensiométrie, 25-27 Septembre 2007.

1.2.5 Communications internationales avec actes :

[C.I.A.1] Cosenza P., Fauchille A-L., Prêt D., Hédan, S. « Statistical characterization of shale microstructures: determination of Representative Elementary Area », 14th International Congress on Rock Mechanics ISRM, Foz de Iguaçu (Brazil), 13-18 Sept. 2019.

[C.I.A.2] Hédan S., Fauchille A-L., Prêt D., Cosenza, P. « Deterministic inference of Representative Elementary Area of clay rock at the mesoscopic scale », EuroClay 2019 Conference, Paris, France, 1-5 Juillet 2019

- [C.I.A.3] Mammadi Y., Joseph A., Joulain A., Bonneville J. Tromas C., Hédan S., Valle V. « Development of Optical Technique For Measuring Kinematic Fields in Presence of Cracks, FIB-SEM-DIC », SEM Annual Conference & Exposition on Experimental & Applied Mechanics, Reno NV (USA), June 3-6, 2019
- [C.I.A.4] Giot, R., Hédan, S., Cosenza, P. « Hydro-mechanical numerical modelling of the opening and closing of desiccation cracks in claystone», Computational & Geoenvironmental Geomechanics for Underground and Subsurface Structures (COGGUS2), Nancy (France), 12-14 Feb. 2019
- [C.I.A.5] Cosenza P., Fauchille A-L., Prêt D., Hédan, S. « Determination of Representative Elementary Area of shale», 55th Annual Technical meeting, Madrid (Spain), 10-12 Oct. 2018.
- [C.I.A.6] Cosenza P, Prêt D, Giraud A, Hédan S. Geometric and Elastic Characterization of Clay-Rocks. POROMECHANICS VI: PROCEEDINGS OF THE SIXTH BIOT CONFERENCE ON POROMECHANICS, 2017, 1282-1290
- [C.I.A.7] Hédan, S., Valle, V., Armand, G., Cosenza, P. « Monitoring by 3D full-field measurements of the clay rock wall in the Meuse/Haute Marne underground research laboratory», 7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Davos (Switzerland), 24-25 Sept. 2017.
- [C.I.A.8] Fauchille A., Hédan, S., Prêt D., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. Strain overestimation due to cracking in clay rock. Conference: TSG Joint Assembly Liverpool January 2017
- [C.I.A.9] Berdjane M., Germaneau, A., Hédan, S., Valle, V. « Analysis of Kinematical fields near a crack tip in presence of plastic zone. Comparison between experimental and numerical results ». 17th International Conference on Experimental Mechanics», Rhodes (Greece), 3-7 July 2016.
- [C.I.A.10] Fauchille A., Hédan, S., Prêt D., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. Quantitative comparison between the crack apertures, strains and microstructure in Tournemire clay-rocks», 5th International Workshop of Young Doctors in Geomechanics, W(H)YDOC 15, 2-4 Dec. 2015, École des Ponts ParisTech, France
- [C.I.A.11] Hédan, S., Valle, V., Cabrera, J., Cosenza, P. « One-year monitoring of desiccation cracks in Tournemire experimental station using Digital Image Correlation », 6th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Brussels (Belgium), 23-26 March 2015.
- [C.I.A.12] Fauchille, A.L., Hédan, S., Prêt, D., Valle, V., Cabrera, J., Cosenza, P. Relationships between desiccation cracking behavior and microstructure of the Tournemire clay rock by coupling DIC and SEM methods, Proceedings of IS-Cambridge, Geomechanics from Micro to Macro, 1-3 Sept. 2014, volume 2, pages 1421-1424.
- [C.I.A.13] Fauchille A-L., Hédan, S., Prêt D., Valle, V., Cabrera J., Cosenza P.« Impact of microstructural and mineralogical heterogeneities on deformation and desiccation cracking of

the Tournemire clay-rock by coupling DIC and SEM methods », 10th Euroconference on Rock Physics and rock mechanics, IS- Aussois (France), 12-15 May 2014.

[C.I.A.14] Hédan, S., Cosenza P., Valle, V., Fauchille A-L., Cabrera J. « One-year monitoring and digital image analysis of in-situ desiccation cracks on Tournemire argillite rock », International Workshop on Geomechanics and Energy, Lausanne (Swiss), 26-28 November 2013.

[C.I.A.15] Hédan, S., Cosenza P., Valle, V., Dudoignon P., Fauchille A-L., Cabrera J. « Experimental analysis of deformation mechanisms induced by desiccation in Tournemire argillites using DIC method », 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Beijing (China), 18-21 October 2011.

[C.I.A.16] Hédan, S., Valle, V., Cottron, M. « Experimental and numerical in-plane displacement fields for determine the J-integral on a PMMA cracked specimen », 14th International Conference on Experimental Mechanics, Poitiers (France), 4-9 July 2010.

[C.I.A.17] Barranger, Y., Doumalin, P., Dupre, J-C., Germaneau, A., Hédan, S., Valle, V. « X-ray computed tomography coupled to Digital Volume Correlation applied to a stationary crack case ».14th International Conference on Experimental Mechanics, Poitiers (France), 4-9 July 2010.

[C.I.A.18] Barranger, Y., Doumalin, P., Dupre, J-C., Germaneau, A., Hédan, S., Valle, V. « Analysis of theoretical, numerical and experimental displacement fields in the bulk of a cracked specimen ».18th European Conference on Fracture, Dresden (Germany), 30 August-3 September 2010.

[C.I.A.19] Barranger, Y., Doumalin, P., Dupre, J-C., Germaneau, A., Hédan, S., Valle, V. « Analysis of theoretical, numerical and experimental displacement fields in the bulk of a cracked specimen ». International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials, 7-10 September, Tarbes (France), 2009.

[C.I.A.20] Hédan, S., Valle, V., Cottron, M. « Out-of-plane displacement measurement near the crack tip during a crack propagation: Validation of a 3D formulation for a specimen in PMMA loaded in mode I », 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM) session GAMM, Zurich (Swiss), 16-20 July 2007.

[C.I.A.21] Hédan, S., Valle, V., Cottron, M. « Experimental study of the out-of-plane displacement fields for different crack propagation velocities », 13th International Conference on Experimental Mechanics, Alexandroupolis (Greece), 1-6 July 2007.

1.2.6 Communications internationales sans actes :

[C.I.S.A.1] Arnold G., Hédan S., Auvray C., Ferrage E., Hubert F., Prêt D., Valle V., Giraud A., Cosenza P. « Challenging measurements of clays elastic properties in humidity controlled

conditions », V International Workshop on Layered Materials, 27-29 August 2014, Mulhouse, France.

[C.I.S.A.2] Hédan, S., Cosenza, P., Dudoignon, P., Valle, V., Cabrera, J., Laforest, C. « Investigation of the fracturing process induced by desiccation in Tournemire argilites using digital image correlation », ALERT Workshop 2010, 4-6 October 2010, Aussois.

[C.I.S.A.3] Giot, R., Hédan, S., Cosenza, P., Golfier F., Massin P. « Thermo-hydro-mechanical numerical modelling of the opening / closing of desiccation cracks », ALERT Workshop 2018, 1-3 October 2018, Aussois.

1.2.7 Communications nationales avec actes :

[C.N.A.1] Hédan, S., Valle V., Cosenza P. « Corrélation d'images numériques adaptée au milieu fracturé. Applications aux roches argileuses. », 24ème Congrès Français de Mécanique, Août 2019, Brest

[C.N.A.2] Mammadi, Y., Hédan, S., Valle V. « Métrologie à très petites échelles / Développement de techniques optiques de mesure de champs cinématiques en présence de fissures FIB-MEB-DIC », 24ème Congrès Français de Mécanique, Août 2019, Brest

[C.N.A.3] Giot R., Hédan, S., Cosenza P. « Modélisation numérique thermo-hydro-mécanique de l'ouverture/fermeture d'une fissure de dessiccation », JNGG 2018, Juillet 2018, Champs-sur-Marne.

[C.N.A.4] Hédan, S., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. « Etude de l'anisotropie des déformations de roches argileuses à l'échelle de la galerie », 23ème Congrès Français de Mécanique, Août 2017, Lille.

[C.N.A.5] Hédan, S., Berdjane M., Germaneau A., Valle V. « Etendue de la zone plastique par mesures expérimentales et numériques », 23ème Congrès Français de Mécanique, Août 2017, Lille.

[C.N.A.6] Hédan, S., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. Etude en galerie du comportement hydromécanique de l'argilite de Tournemire », 14ème Colloque Annuel du GFA, 18-20 Mai 2016, Poitiers

[C.N.A.7] Fauchille A-L., Hédan, S., Prêt D., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. « Etude multi-échelle de l'ouverture des fissures de dessiccation dans l'argilite de Tournemire », 14ème Colloque Annuel du GFA, 18-20 Mai 2016, Poitiers

[C.N.A.8] Hédan, S., Valle V., Noiret A., Armand G., Cosenza P. « Suivi des déformations mécaniques par extensométrie optique en paroi d'une galerie située à -445m du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne », JNGG 2016, Juillet 2016, Nancy.

[C.N.A.9] Giot R., Hédan, S., Cosenza P. « Modélisation numérique thermo-hydro-mécanique de l'ouverture/fermeture d'une fissure de dessiccation », JNGG 2016, Juillet 2016, Nancy.

- [C.N.A.10] Berdjane M., Germaneau A., Hédan, S., Valle V. « Analyse des champs cinématiques au voisinage de la pointe de fissure en présence de plasticité étendue : comparaison expérimentation, modélisation et numérique », 2ème Conférence internationale de Mécanique (ICM'15), Constantine, Algérie, 25-26 Nov. 2015.
- [C.N.A.11] Fauchille A-L., Hédan, S., Prêt D., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. « Impact des hétérogénéités minéralogiques sur la localisation des fissures de dessiccation de l'argilite de Tournemire. », JNGG 2014, Juillet 2014, Beauvais.
- [C.N.A.12] Fauchille A-L., Hédan, S., Prêt D., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. « Relations entre les déformations par dessiccation, la teneur en eau et la microstructure de l'argilite de Tournemire. », JNGG 2014, Juillet 2014, Beauvais.
- [C.N.A.13] Hédan, S., Fauchille A-L., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. « Suivi des fissures de dessiccation par extensométrie optique sur un front de galerie souterraine. », JNGG 2014, Juillet 2014, Beauvais.
- [C.N.A.14] Hédan, S., Fauchille A-L., Nabilla N., Valle, V., .Cabrera, J., Cosenza, P. Application de la Corrélation d'Images Numériques (CIN) à la spatialisation du comportement hydromécanique des roches et sols argileux, 38èmes Journées du GFHN, 18-21 novembre 2013, Poitiers.
- [C.N.A.15] Fauchille A-L., Hédan, S., Prêt, D., Valle, V., Cosenza, P., Cabrera, J. « Etude par couplage CIN-MEB de l'influence de la microstructure sur les déformations par dessiccation de l'argilite de Tournemire. », 21ème Congrès Français de Mécanique, Août 2013, Bordeaux.
- [C.N.A.16] Hédan, S., Fauchille A-L., Valle, V., .Cabrera, J., Cosenza, P. « Suivi des fissures de dessiccation dans la station expérimentale de Tournemire : Utilisation de la corrélation d'images numériques. », 21ème Congrès Français de Mécanique, Août 2013, Bordeaux.
- [C.N.A.17] Hédan, S., Cosenza P., Valle V., Fauchille A-L., Cabrera J. « Caractérisation par CIN de la fracturation liée au chauffage et à la désaturation d'une argilite. », JNGG 2012, Juillet 2012, Bordeaux.
- [C.N.A.18] Hédan, S., Valle, V., Cottron, M. « Calcul de l'intégrale J et détermination des zones 3D entourant la pointe de fissure. Application aux matériaux élastiques. », 20ème Congrès Français de Mécanique, Août 2011, Besançon.
- [C.N.A.19] Hédan, S., Cosenza P., Valle V., Cabrera J. « Caractérisation par extensométrie optique de la fracturation liée à la désaturation de l'argilite de Tournemire : Impact de l'hétérogénéité et de l'anisotropie structurale. », 20ème Congrès Français de Mécanique, Août 2011, Besançon.
- [C.N.A.20] Hédan, S., Valle, V., Cottron, M. « Métrologie interférométrique pour dimensionner la zone des effets tridimensionnels et transitoires en dynamique. Application à un matériau à comportement fragile à haute vitesse de propagation de la fissure. », 19ème Congrès Français de Mécanique, Août 2009, Marseille.

[C.N.A.21] Hédan, S., Valle, V., Cottron, M. « Développement d'une méthode hybride (expérimental et numérique) pour l'étude des champs de déplacements plans de plaques fissurées et chargées en mode I. », 19ème Congrès Français de Mécanique, Août 2009, Marseille.

[C.N.A.22] Barranger, Y., Doumalin, P., Dupre, J-C., Germaneau, A., Hédan, S., Valle, V. « Analyse à cœur des champs de déplacement obtenus sur une éprouvette fissure. », 19ème Congrès Français de Mécanique, Août 2009, Marseille.

[C.N.A.23] Hédan, S., Valle, V., Cottron, M. « Mesure du déplacement hors-plan en pointe de fissure lors de sa propagation : Validation d'une formulation 3D pour une plaque en PMMA sollicitée en mode I », 18ème Congrès Français de Mécanique, Août 2007, Grenoble.

1.2.8 Communications nationales sans actes :

[C.N.S.A.1] Hédan, S., Fauchille A-L., Prêt D., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. « Couplage des approches CIN (Corrélation d'Images Numériques) et MEB (Microscopie Électronique à Balayage) pour une meilleure compréhension des mécanismes élémentaires de déformation et de fissuration des roches argileuses. » Colloque NEEDS-MIPOR 8-9 décembre 2014, Paris (Jussieu)

[C.N.S.A.2] Hédan, S., Fauchille A-L., Prêt D., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. « Couplage des approches CIN (Corrélation d'Images Numériques) et MEB (Microscopie Électronique à Balayage) pour une meilleure compréhension des mécanismes élémentaires de déformation et de fissuration des roches argileuses. Étude préliminaire. » Colloque NEEDS-MIPOR 21-22 novembre 2013, Paris (Jussieu)

[C.N.S.A.3] Fauchille A-L., Hédan, S., Prêt, D., Valle, V., Cosenza, P., Cabrera, J. « Etude du rôle de la microstructure dans la fissuration par dessiccation de l'argilite de Tournemire, par couplage CIN - MEB », Journées Groupe Français des Argiles, 9-11 Avril 2013, Paris

[C.N.S.A.4] Hédan, S., Ferrage E., Hubert F., Prêt D., Valle V., Cosenza P. « Caractérisation Hydromécanique de systèmes modèleS Argileux (CHELSeA) – Contribution à la validation des modèles micromécaniques de géomatériaux argileux », Colloque de lancement du programme NEEDS-MIPOR 5-6 Décembre 2012, Paris (Jussieu)

[C.N.S.A.5] Obasa B., Hédan S., Dudoignon P., Cosenza P. « Digital image correlation to study the shrinkage and desiccation cracks of clay-rich march soils », Journées Groupe Français des Argiles, 11-13 Mai 2012, Paris

[C.N.S.A.6] Hédan, S., Valle, V., Cottron, M. « Etude de la zone des effets tridimensionnels et transitoires lors de propagation de fissure », Séminaire au Laboratoire de Mécanique et Modélisation des Matériaux et Structures du Génie Civil, 15 Mars 2007, Egletons.

1.2.9 Autres communications :

[A.C.1] **Hédan, S.**, « MEsures des modules éLastIques d'un SyStème modèle Argileux par nanoindentation et corrélation d'images numériques – MELISSA », L'interdisciplinarité au CNRS, (2015) p51, https://www.cnrs.fr/mi/IMG/pdf/interdisciplinarite.illustrations_et_temoignages_web.pdf

1.2.10 Rapports scientifiques :

[R.S.1] **Hédan S.**, Hubert F., Valle V., Prêt D., Ferrage E., Cosenza P., Auvray C., Giraud A., Arnold G. Rapport Final du projet NEEDS-MIPOR 2015 MEsures des modules éLastIques d'un SyStème modèle Argileux par nanoindentation et corrélation d'images numériques (MELISSA)

[R.S.2] **Hédan S.**, Fauchille A-L., Valle V., Prêt D., Cabrera J., Cosenza P. Rapport Final du projet NEEDS-MIPOR 2014 Couplage des Approches CIN (Corrélation d'Images Numériques) et MEB (Microscopie Électronique à Balayage) pour une meilleure compréhension des mécanismes ÉlémEntaires de Déformation et de fissuration des Roches Argileuses. Résultats préliminaires et interprétation. (CACENDRA)

[R.S.3] **Hédan S.**, Fauchille A-L., Valle V., Prêt D., Cabrera J., Cosenza P. Rapport Final du projet NEEDS-MIPOR 2013 Couplage des approches CIN (Corrélation d'Images Numériques) et MEB (Microscopie Électronique à Balayage) pour une meilleure compréhension des mécanismes élémentaires de déformation et de fissuration des roches argileuses.

[R.S.4] **Hédan S.**, Valle V., Cosenza P. Rapport final ; Contrat final ANDRA N°063686, Mesures temporelles des déformations mécaniques en paroi de galerie dans la niche à -445m.

1.3 Activités d'encadrement

1.3.1 Encadrements de thèse :

Depuis ma prise de fonction en tant que Maître de Conférences en 2009, j'ai co-encadré **trois thèses** :

Younès MAMMADI : « Métrologie optique à petite échelle sous Microscope Électronique à Balayage: Mesures de champs cinématiques en présence de discontinuités, par couplage FIB-MEB-CIN. »

- Taux de participation à l'encadrement : **50%** depuis 2018
- Thèse débutée en octobre 2016 et soutenue fin 2020.
- Thèse dirigée par Pr V. Valle (50%)

- Production scientifique associée à ce travail de thèse : 1 article dans une revue internationale [Act.3], 1 communication dans un congrès international [C.I.A.3] et 1 communication dans un congrès national [C.N.A.2].
- **Mohand Berdjane** : « Investigations expérimentales et numériques, surfacique et volumique pour l'évaluation de la dimension de la zone plastique dans des éprouvettes fissurées et sollicitées en mode I »
- Application aux polymères PEBD et PP »
 - Taux de participation à l'encadrement : **30%**
 - Thèse débutée en octobre 2013 et soutenue fin 2017.
 - Thèse dirigée par Pr V. Valle (40%) et co-encadrée avec Dr A. Germaneau (30%)
 - Production scientifique associée à ce travail de thèse : 1 article dans une revue internationale [Act.14], 1 communication dans un congrès international [C.I.A.9] et 1 communication dans un congrès national [C.N.A.10].
- **Anne-Laure FAUCHILLE**: « Déterminismes microstructuraux et minéralogiques de la fissuration hydriques dans les argilites de Tournemire : Apports couplés de la pétrographie quantitative et de la corrélation d'images numériques »
 - Taux de participation à l'encadrement : **30%**
 - Thèse débutée en octobre 2011 et soutenue en janvier 2015.
 - Thèse dirigée par Pr P. Cosenza (70%)
 - Production scientifique associée à ce travail de thèse : 2 articles dans une revue internationale [Act.5] [Act.11], 4 communications dans des congrès internationaux [C.I.A.8] [C.I.A.10] [C.I.A.12] [C.I.A.13] et 3 communications dans un congrès national [C.N.A.7] [C.N.A.11] [C.N.A.12].

1.3.2 Encadrement d'étudiants en master et licence :

Encadrements de stages de Master	
Master 2	4
Master 1	3
Encadrements de stages de Licence3/1 ^{ère} année Ingénieur	3

2017-2018 : - Encadrement à 100% de Mme Gueye KHADIDJA MICHELE **Stage de 1^{ère} année cycle d'ingénieur** (ENSI Poitiers/Université de POITIERS) : Etude de résistance en compression d'éprouvettes de mortier/argile modifiée.

- Encadrement à 100% de M Saicharan Bolleni, **M1 IMACS Erasmus Mundus** (Université de POITIERS) : Mark tracking software 3D soil deformation

2015-2016: - Encadrement à 50% (co-encadrement Philippe COSENZA 50%) de M Pablo Carvajal Artavia, **M1 IMACS Erasmus Mundus** (Université de POITIERS) : Comparison of the mechanical, physical and mineralogical properties of a bentonite polluted concrete.

2014-2015: - Encadrement à 100% de Mme Meron Ambelu, **M2 IMACS Erasmus Mundus** (Université de POITIERS) : Monitoring of strains induced by removing the support of an underground gallery excavated in clay-rocks

- Encadrement à 100% de Mme Marion BRUNEAU **L3 Terre et Environnement** (Université de POITIERS) : Suivi des déformations d'un front de galerie du laboratoire souterrain de Tournemire (IRSN)

2012-2013 : - Encadrement à 50% (co-encadrement Philippe COSENZA 50%) de Mme Nabilla **M2 IMACS Erasmus Mundus** (Université de POITIERS) : Monitoring of the Spatial Distribution of Desiccation Cracks on Marshy Clay Soil by Combining Electrical Resistivity Tomography and Digital Image Correlation

2011-2012 : - Encadrement à 100% de Mr Babajide OBASA **M1 IMACS Erasmus Mundus** (Université de POITIERS) : Digital image correlation to study the shrinkage and desiccation cracks of clay-rich marsh soils.

2010-2011 : - Encadrement à 50% de Mme Anne-Laure FAUCHILLE **M2 Matériaux naturels, Eaux et Expertises Environnementales** (Université de POITIERS) : Caractérisation par extensométrie optique de la fracturation liée à la désaturation de l'argilite de Tournemire.

2009-2010 : - Encadrement à 100% de Mme Sarah MAMOUDI **M2 Matériaux naturels, Eaux et Expertises Environnementales** (Université de POITIERS) : Etude des objets de Franceville au Gabon – Les discontinuités au micro-tomographe sont-elles des fissures ?

2008-2009 : - Encadrement à 100% de Mr Emmanuel NICOLAS **L3 Mécanique** (Université de POITIERS) : Etude numérique de l'influence des paramètres géométriques et mécaniques sur les coefficients de la série de Williams.

1.3.3 Autres encadrements :

En 1^{ère} (BAC+3) et 3^{ème} année (BAC+5) d'Ecole d'Ingénieurs, les étudiants doivent valider une UE à travers un travail par groupe de 3 ou 4 sur un sujet de projet encadré. Ils constituent une équipe pour répondre à un besoin proposé par un industriel ou par un enseignant-chercheur. Voici la liste des projets que j'ai encadrés depuis ces sept dernières années, parfois en collaboration avec des entreprises ou collectivités.

Niveau	Année	Sujet (Entreprise/collectivités)
3 ^{ème} année	2014-2015	Développement d'un prototype de mesure tridimensionnelle de retrait-gonflement
3 ^{ème} année	2015-2016	1. Suivi du retrait/gonflement du site du défend par méthode optique 2. Suivi des déformations de bâtiment B1 par méthode optique
3 ^{ème} année	2016-2017	Etude du comportement mécanique d'un géo-mortier
3 ^{ème} année	2018-2019	Utilisation BIM/MEP (plomberie-sanitaire – ventilation, électricité)
1 ^{ère} année	2019-2020	Scan de l'usine (SCHEINER ELECTRIC ; site de Carros (06))
3 ^{ème} année	2019-2020	1. SCANNER 3D +BIM d'un bâtiment avant rénovation énergétique (Association Le Local) 2. Mouvement de sol (INRAe Saint Laurent de la Prée)
3 ^{ème} année	2020-2021	1. Etude d'impact du démantèlement d'un parc éolien (SERGIES) 2. Numérisation de l'usine Schneider (SCHEINER ELECTRIC ; site de Carros (06)) 3. Numérisation des TP de Géotechnique 3 (vidéos + fiches) 4. Présentation des différents outils du BIM (Lycéens, DUT, ...)

En 3^{ème} année du cycle ingénieur (BAC+5), l'ENSI Poitiers offre la possibilité aux élèves-ingénieurs d'effectuer un contrat de professionnalisation. Les étudiants doivent alors trouver une entreprise d'accueil et il passe en moyenne de 2/3 du temps dans l'entreprise et un 1/3 à l'Ecole. L'élève est suivi individuellement par un tuteur 'Ecole' qui s'assure le lien entre l'entreprise, l'élève et l'ENSI Poitiers, qui s'assure que l'élève évolue dans des bonnes conditions et suit un projet proposé par l'entreprise. Voici la liste des contrats de professionnalisation que j'ai encadrés.

Année	Etudiants
2017-2018	EL OUAHABI Fatima (GTM)
2018-2019	MARTINEZ Clara (ICSEO)
2019-2020	GUEYE Khadidja Michèle (GEOLITHE)
2020-2021	PRAT Juliette (SOGEA SUD HYDRAULIQUE) ANG Patricia (ALIOS X.AM.SOL)

1.4 Responsabilités collectives :

1.4.1 Responsabilités pédagogiques

- **2018-2021** : Responsable du développement et la mise en place d'un complexe BIM pour la formation initiale et continue, sur le site de l'ENSI Poitiers/Université de Poitiers.
- **2016-** : Responsable du parcours Construction de Géotechnique du diplôme (3A) Eau et Génie Civil de L'ENSI Poitiers (environ 30 étudiants par an, gestion de l'emploi du temps, gestion des projets tutorés, contacts avec les industriels, intervenants extérieurs, ...)
- **2011-2013** : Responsable du parcours Construction de Géotechnique (2A et 3A) du diplôme Eau et Génie Civil de L'ENSI Poitiers (environ 60 étudiants par an, gestion de l'emploi du temps, gestion des projets tutorés, contacts avec les industriels, intervenants extérieurs, ...)
- **2010-2012** : Membre élu au Conseil d'Administration de l'ENSI Poitiers

1.4.2 Responsabilités administratives

- **2017-...** : Membre de la Commission d'expertise scientifique 60^e section de l'université de Poitiers
- **2012-2015** : Membre du conseil de laboratoire IC2MP

1.5 Responsabilité de projets/contrats :

Porteur de projet : Hédan, S., « Complexe BIM » financé par un projet 2018 Région Nouvelle Aquitaine Recherche, Enseignement Supérieur, Plateformes Mutualisées et Ouvertes, volet Plateformes mutualisées, (2019-2021). Montant : 106k€

Porteur de contrat : Hédan, S., autres membres : Valle V., Cosenza P. « Mesures temporelles des déformations mécaniques en paroi de galerie dans la niche DNC » Contrat ANDRA/IC2MP/Pprime (2014-2015). Montant : 18k€

Porteur de projet : Hédan, S., autres membres : Auvray C., Arnold G., Hubert F., Ferrage E., Prêt D., Valle V., Giraud, A., Cosenza P. « MESures des modules éLastIques d'un SyStème modèle Argileux par nanoindentation et corrélation d'images numériques (MELISSA) » Projet financé par NEEDS (MIPOR)) (2014). Montant : 22k€

Porteur de projet : Hédan, S., autres membres : Fauchille A-L., Prêt D., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. « Couplage des Approches CIN (Corrélation d'Images Numériques) et MEB (Microscopie à Balayage Electronique) pour une meilleure compréhension des mécanismes ElémeNtaires de Déformation et de fissuration des Roches Argileuses. Résultats préliminaires et interprétation. (CACENDRA) » Projet financé par NEEDS (MIPOR) (2013). Montant : 14k€

Porteur de projet : Hédan, S., autres membres : Fauchille A-L., Prêt D., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. « Couplage des approches CIN (Corrélation d'Images Numériques) et MEB (Microscopie Électronique à Balayage) pour une meilleure compréhension des mécanismes élémentaires de déformation et de fissuration des roches argileuses. Étude préliminaire. » Projet financé par NEEDS (MIPOR) (2012). Montant : 8,5k€

Porteur de projet : Hédan, S., autres membres : Ferrage E., Hubert F., Prêt D., Valle V., Cosenza P. « Caractérisation HydromécaniquE de systèmes modèLeS Argileux (CHELSeA) – Contribution à la validation des modèles micromécaniques de géomatériaux argileux » Projet financé par PACEN (FORPRO) (2011). Montant : 32k€

Porteur de projet : Hédan, S., autres membres : Valle V., Cabrera J., Cosenza P. « Caractérisation in situ par extensométrie optique de la fracturation liée à la désaturation de l'argilite de Tournemire : Impact de l'hétérogénéité et de l'anisotropie structurale de la roche argileuse. » Projet financé par GNR TRASSE (2011). Montant : 8,5k€

Porteur de projet : Hédan, S., autres membres : Valle V., Cabrera J., Cosenza P. « Localisation des fissures de retrait de l'argilite de Tournemire : Impact de l'hétérogénéité et de l'anisotropie structurale de la roche argileuse » Projet financé par Actions incitatives de l'Université de Poitiers (ACI) (2010). Montant : 10 k€

1.6 Participations à des jurys de thèse, de comités de sélection et d'expertises diverses

1.6.1 Jurys de thèse

2020 : Examineur de la thèse de Younès MAMMADI, intitulée : *Métrologie optique à petite échelle sous Microscope Électronique à Balayage: Mesures de champs cinématiques en présence de discontinuités, par couplage FIB-MEB-CIN.*

2017 : Examineur de la thèse de Mohand BERDJANE, intitulée : *Investigations expérimentales et numériques, surfacique et volumique pour l'évaluation de la dimension de la zone plastique dans des éprouvettes fissurées et sollicitées en mode I.*

2015 : Examineur de la thèse d'Anne-Laure FAUCHILLE, intitulée : *Déterminismes microstructuraux et minéralogiques de la fissuration hydriques dans les argilites de Tournemire : Apports couplés de la pétrographie quantitative et de la corrélation d'images numériques.*

1.6.2 Comités de sélection

2020 : Participation au jury de sélection au titre de membre de la CES60 pour un poste PRAG (CNU 60) de l'Université de Poitiers, rattaché à l'ENSI Poitiers.

2019 : Participation au jury de sélection, au titre de membre local, pour un poste de maître de conférences (CNU 60) de l'Université de Poitiers, rattaché à l'UFR SFA et l'institut PPRIME.

2019 : Participation au jury de sélection au titre de membre de la CES60 pour un poste PRAG (CNU 60) de l'Université de Poitiers, rattaché à l'IUT 16.

1.6.3 Expertises d'articles

Je suis régulièrement sollicité pour examiner des articles soumis à différentes revues :

- Examineur d'articles proposés dans les revues 'Engineering Fracture Mechanics', 'International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences', 'Engineering geology', 'International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics' et 'Rock Mechanics and Rock Engineering'.

1.6.4 Participations à des comités scientifiques de conférences internationales.

- Membre du comité scientifique du congrès international ICEM14 '14th International Conference on Experimental Mechanics', 4-9 juillet 2010, Poitiers.

1.6.5 Participations à des comités scientifiques de conférences nationales

- Membre du comité d'organisation des 38^{èmes} journées du GFHN (Groupe Francophone d'Humidimétrie et TraNsferTs en Milieux Poreux), organisées par l'Institut de Chimie

des Milieux et Matériaux de Poitiers (UMR 7285) et l'ENSI POITIERS en partenariat avec le Centre INRA Poitou-Charentes, le Parc Interrégional du Marais Poitevin, Poitiers, 18-21/11/2013.

1.7 Activités nationales

1.7.1 ANR

De 2018 jusqu'en 2022, je participe au **projet ANR HydroGeoDam**. Ce projet, mené en collaboration entre Georessources, IMSIA, ISTerre et l'IRSN porte sur ***une meilleure évaluation de l'impact de l'endommagement hydraulique sur l'aménagement et l'exploitation du sous-sol***. Ma recherche porte sur la réponse mécanique de l'argilite de Tournemire soumise à une fracturation en mode d'ouverture.

1.7.2 CPER/FEDER

De 2015 jusqu'en 2020, j'ai participé au **programme CPER Bâtiment durable, axe matériaux de construction performants, à faible impact environnemental, durables et résilients (MADUR)**. Ce projet, mené en collaboration entre les instituts Pprime et IC2MP de l'Université de Poitiers, l'Université de La Rochelle, l'ENSMA, des CRITs, et le CNRS souhaite apporter une réponse aux problèmes engendrés par la recherche de performance accrue du bâti en termes d'efficacité énergétique, de qualité des environnements habités (habitat et micro-climat urbain), de durabilité et résilience des matériaux de construction et des structures aux agressions environnementales (pollution, environnement marin, changement ou aléas climatiques). Ma recherche porte sur l'étude de matériaux bio-sourcés (chaux-chanvre, terre crue, ...) en vue d'une utilisation comme matériaux de construction. A ce titre, l'institut s'est doté d'une enceinte climatique à température et humidité contrôlée dotée de 3 fenêtres de visualisation pour y quantifier la réponse hydromécanique par métrologie optique.

1.7.3 Collaborations

Depuis mon recrutement en 2009 à l'institut IC2MP, j'ai mis en place et participé à une forte collaboration avec l'institut Pprime pour le développement de la H-DIC conduisant à la production scientifique de 3 articles dans des revues internationales [Act.8] [Act.9] [Act.14].

1.8 Activités en enseignements

- **Formation continue :**

2018-... : Formateur en formation continue (1 journée). UP-Pro/Université de Poitiers. Logiciels (viewers) orientés BIM.

○ **Formation initiale :**

Service complet assuré depuis 2009 hormis en 2010-2011 où pour cette année universitaire, j'ai bénéficié d'une décharge jeune maître de conférences par l'Université de POITIERS. J'effectue un service d'enseignement qui oscille entre 220 à 300 H éq TD.

Le tableau ci-dessous récapitule mes principales activités d'enseignements réalisées à l'Université de POITIERS depuis 2012.

Niveau	UE	Activités d'enseignements
1 ^{ère} année du diplôme d'ingénieurs de l'ENSI POITIERS	DAO/CAO/ BIM	TD/TP : Initiation au dessin industriel, lecture de plan, réalisation de plan Logiciel : Autocad 2008/2014 BIM (Revit)
1 ^{ère} année du diplôme d'ingénieurs de l'ENSI POITIERS	Résistance des matériaux	CM/TD : Elasticité, statique, Principe Fondamental de la Statique, torseur de cohésion, traction, compression, torsion, flexion, flambement
2 ^{ème} année du diplôme Génie de l'Eau et Génie Civil de l'ENSI POITIERS	Géotechnique 3I	CM/TD : Rappel de MMC, mécanique des sols, compressibilité et tassement des sols, calcul et dimensionnement des fondations superficielles (FOXTA), stabilité des pentes et talus (TALREN) TP : Essais de laboratoire : cisaillement, triaxial, oedomètre
2 ^{ème} année du diplôme Eau et Génie Civil de l'ENSI POITIERS	BIM	-Lecture de plans papier + reconstruction sous REVIT d'une partie d'une station d'épuration

3 ^{ème} année du diplôme Eau et Génie Civil de l'ENSI POITIERS	Béton armé et précontraint	CM/TD : RDM, théorème de Clapeyron Utilisation de RDM6
3 ^{ème} année du diplôme Eau et Génie Civil de l'ENSI POITIERS	Modélisation en Génie Civil	TD : Utilisation de PLAXIS
3 ^{ème} année du diplôme Eau et Génie Civil de l'ENSI POITIERS	Matériaux et techniques de construction	CM/TD : 2 nd œuvre

- **VAE/IDPE :**

(2014-2015) : **membre du jury** de VAE pour l'obtention du diplôme Eau et Génie Civil de l'ENSI POITIERS. Nombre de jury : **2**.

(2016) : **membre du jury** d'un IDPE (Ingénieur diplômé par l'Etat) pour l'obtention du diplôme Eau et Environnement. Nombre de jury : **1**

1.9 Informations scientifiques, techniques et vulgarisation

Dans le cadre de vulgarisations scientifiques ou d'informations techniques, j'ai été amené à faire des présentations scientifiques pour des lycéens. Je peux citer les portes ouvertes du lycée EMILE COMBES de PONS (17), mais aussi le lycée Nelson MANDELA de Poitiers dans le cadre de la fête de la science. Lors de cette même manifestation, j'ai réalisé une conférence à l'Espace Mendès France de Poitiers (centre de culture scientifique de la région Nouvelle Aquitaine) (28/09/2019) sur le thème « les bâtiments passent au numérique ». Sur le même sujet, lors de l'assemblée générale de la CAPEB 86, j'ai présenté les enjeux de logiciels développant des maquettes 3D orientées BIM.

Sur mes travaux de recherches, j'ai été sollicité par la société EGSOL (entreprise en ingénierie géotechnique), lors de leur assemblée annuelle, organisée par l'agence de l'OUEST, basée à Mignaloux-Beauvoir. A cette occasion et devant une cinquantaine d'employés répartis dans dix agences nationales, j'ai exposé l'apport de mes recherches dans leurs missions d'ingénierie géotechnique.

Annexes.

A1 Hedan, S., Fauchille A-L., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. « One-year monitoring of desiccation cracks in Tournemire argillite using digital image correlation ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 68 (2014): 22–35.

A2 Valle, V., S. Hedan, P. Cosenza, A. L. Fauchille, et M. Berdjane. « Digital Image Correlation Development for the Study of Materials Including Multiple Crossing Cracks ». *Experimental Mechanics* 55, n° 2 (février 2015): 379-91. <https://doi.org/10.1007/s11340-014-9948-1>.

A3 Fauchille, A-L., Hedan, S., Valle V., Prêt D., Cabrera J., Cosenza P. « Multi-scale study on the deformation and fracture evolution of clay rock sample subjected to desiccation ». *Applied Clay Science* 132–133 (2016): 251-60. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.054>.

A4 Hedan, S., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. « A new approach to quantify the anisotropy of hydromechanical strains in clay-rock at the gallery scale ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 111 (2018): 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.07.004>.

A5 Valle, V., Bokam P., Germaneau A., Hedan S. « New Development of Digital Volume Correlation for the Study of Fractured Materials ». *Experimental Mechanics*, (2018). <https://doi.org/10.1007/s11340-018-0415-2>.



Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijrmms

One-year monitoring of desiccation cracks in Tournemire argillite using digital image correlation

Stephen Hedan^{a,*}, Anne-Laure Fauchille^a, Valéry Valle^b, Justo Cabrera^c, Philippe Cosenza^a^a Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, Poitiers, France^b Université de Poitiers, Chasseneuil Cedex, France^c DInstitute for Radiological Protection and Nuclear Safety, Fontenay-aux-Roses Cedex, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 February 2013
 Received in revised form
 25 October 2013
 Accepted 18 February 2014
 Available online 15 March 2014

Keywords:

Desiccation cracks
 Clay minerals
 Hydric strains
 Tournemire argillite
 Digital image correlation
 Underground gallery

ABSTRACT

Digital image correlation (DIC) was used for the first time in an underground gallery to monitor desiccation cracks during an annual climatic cycle. This experimental *in situ* investigation was carried out on a study area of 344×275 mm², located on the East96 gallery front at the Tournemire experimental station, during which the relative humidity and temperature were continuously measured for more than one year, from March 2011 to March 2012.

Our results demonstrate the ability of the non-invasive DIC method to monitor clay–rock strains for at least four months, and to monitor the opening and closing of desiccation cracks for more than one year. Moreover, our study provides the following phenomenological results. As observed in the laboratory, the hydric strains were anisotropic; the strains perpendicular to the desiccation cracks were almost homogeneous and much larger than those parallel to the same cracks. The changes in crack apertures calculated from the displacement fields (at an accuracy of approximately $26.9 \mu\text{m}$) and the strain fields were clearly correlated and concomitant with changes in relative humidity and temperature (with $25\% < RH < 99\%$ and $6^\circ\text{C} < T < 14^\circ\text{C}$). Contrary to direct measurements acquired at the Mont-Terri site, the crack apertures of the desiccation cracks were reversible after one year of data acquisition. Moreover, although the main desiccation cracks were sub-horizontal and associated with the direction of bedding planes, our work demonstrates the existence of sub-vertical cracks. The qualitative interpretation of our entire dataset has emphasized the need for a multi-scale approach to understand the desiccation cracking mechanisms at the scale of an underground facility.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Clay rocks are considered in several industrial countries as potential repositories for high-level radioactive wastes. Among the critical issues related to the long-term safety assessment of such geological repositories, the study of the so-called excavation damaged zone (EDZ) is of particular importance. The initiation and extension of the EDZ are governed by many parameters [1–3]: the material properties of the rock (e.g., material anisotropy), the initial stress field, the existence of natural fracture zones in the rock mass, the geometry of the gallery, and the hydric state existing in the gallery. With regard to the latter, fractures associated with the desaturation of argillaceous medium have been observed on gallery fronts in several underground research laboratories, e.g., in the experimental platform at Tournemire [4,5] and in the Mont Terri

laboratory [6]. This hydric fracturing process is evidenced *in situ* by sub-horizontal cracks spaced at several decimeters on all vertical walls in contact with ambient air. In winter (dry state), the corresponding crack apertures can reach a few millimeters; in summer (wet state), these cracks are closed. These cracks induced by drying are parallel to the bedding planes, suggesting that they are partially controlled by sedimentological patterns (e.g., vertical differences in sediment granulometry and/or mineral composition).

These observations of clay–rock damage induced by drying have been obtained in the field using conventional crackmeters or jointmeters, and one may wonder whether similar observations could have been made using non-invasive optical methods, such as the digital image correlation (DIC) technique. The ability of the DIC technique, a full-field measurement method, to monitor the hydromechanical strains and rock failure of clay–rock samples has been demonstrated in the laboratory under various loadings [7–12]. Moreover, the maps of strain fields obtained using DIC have provided some physical insights into deformation mechanisms at the microscopic scale, typically from a spatial scale of a few centimeters [9–11]. However, despite the growing interest in using

* Correspondence to: Université de Poitiers, CNRS UMR 7285 IC2MP, HydrASA, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de POITIERS, 1 rue Marcel Doré, 86022 Poitiers Cedex. Tel.: +33 5 49 45 35 48; fax: +33 5 49 45 36 34.
 E-mail address: stephen.hedan@univ-poitiers.fr (S. Hedan).

the DIC method to study rock mechanics, this optical technique has not been used in underground galleries to monitor *in situ* cracking processes.

This paper presents an application of the DIC method in the East1996 underground gallery at the experimental platform of Tournemire; during this study, the Relative Humidity (*RH*) and temperature (*T*) were measured for more than one year. The objectives of this experimental investigation were (a) to assess the ability of the DIC method to measure strain fields and crack apertures induced by climatic changes in an underground gallery, (b) to correlate the measured strain fields and crack apertures with climatic fluctuations (*RH* and *T*) in the gallery, and (c) to discuss our results in the light of current knowledge of hydromechanical behavior of clay materials.

2. Geological, geomechanical, and climatic contexts

The Tournemire experimental station of the French Institute for Radioprotection and Nuclear Safety (IRSN) is located in a Mesozoic basin on the southern border of the French Massif Central and at the western limit of the "Causse du Larzac". The Tournemire massif is a monocline structure and is affected by a main fault (the Cernon fault) and secondary sub-vertical faults of hectometric extension. The studied argillaceous formation is 250 m thick and corresponds to sub-horizontal consolidated argillaceous and marly layers of Toarcian and Domerian age [4,5,13,14]. This formation is sandwiched between two carbonated and karstified aquifers. The upper Toarcian, corresponding to a 160 m thick layer of argillite, is crossed by a 1885 m long, century-old railway tunnel that was excavated between 1882 and 1886.

The mineralogical composition of the upper Toarcian formation shows that clay minerals (kaolinite, illite, and illite/smectite mixed-layer minerals) represent approximately 40 wt% of the bulk-rock composition [15,16]. The clay fraction is mainly composed of illite (5–15 wt%), illite/smectite mixed-layer minerals (5–10 wt%), chlorite (1–5 wt%), and kaolinite (15–20 wt%). The Tournemire argillite also contains 10–20 wt% of quartz grains, 10–40 wt% of carbonates (mainly calcite), and 2–7 wt% of pyrite [4,15,16]. The water content is between 3.5 and 4.0 wt%.

Geomechanical investigations [17,18] have shown that Tournemire argillite consists of a transverse isotropic geomaterial. Some physico-chemical and mechanical properties of Tournemire argillite are listed in Table 1.

Three different types of cracks are observed at the Tournemire experimental station [4,5]: (i) fractures at the gallery walls induced by the stress redistribution during excavation (millimeter-scale width and meter-scale extension), (ii) pre-existing tectonic fractures in the rock mass (same dimensions as the previous fractures *i.e.*, mm-scale width and m-scale extension) and (iii) networks of regularly spaced (of approximately 20 cm) sub-horizontal cracks parallel to the bedding planes. These sub-horizontal cracks, which are easily observed on the vertical walls of the Tournemire galleries, are each several decimeters deep with a sub-millimeter aperture.

The set of sub-horizontal cracks are directly linked to seasonal variations in atmospheric properties (hygrometry and *T*) at the Tournemire experimental station that result in variations in the chemical potential of the interstitial solutions under wetting/drying cycles [4,13]. The *RH* recorded since 1999 shows seasonal variations (typically 40% in *RH* and 8 °C in winter and 99% in *RH* and 14 °C in summer), and the mean annual *y* value of 77% leads to partial evaporation of the interstitial water. A clear correlation was measured between the aperture of these sub-horizontal cracks and the measured *y* with a lag time of approximately 60 h between the fracture aperture and *y* variations measured using capacitive thermohygrometers [19].

Table 1

Physico-chemical and mechanical properties of Tournemire argillite (from [4,14]).

Density	$2.5\text{--}2.6 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
Grain density	$2.7\text{--}2.8 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
Pore size	Centered around 2.5 nm
Total porosity	6–9%
Gravimetric water content	3.5–4%
Specific surface area	23–29 m ² /g
Cation exchange capacity	9.5–10.8 meq/100 g
Hydraulic conductivity	$10^{-14}\text{--}10^{-15}$ m/s (laboratory) $10^{-11}\text{--}10^{-14}$ m/s (in situ)
In situ stress state	
Minimal vertical stress	3.8 MPa
Minimal horizontal stress	2.1 MPa
Maximal horizontal stress	4.0 MPa
Elastic properties	
Horizontal Young modulus	27680 MPa
Horizontal Poisson ratio	0.17
Vertical Young modulus	9270 MPa
Vertical Poisson ratio	0.2
Uniaxial compressive strengths	
Horizontal compressive strength	32 MPa
Vertical compressive strength	13 MPa

This experimental investigation was performed in the East96 gallery front of the Tournemire experimental station. The East96 gallery was excavated in 1996. Two reasons guided this choice: (a) the EDZ is less developed in this gallery than in the old railway tunnel, and (b) the clay–rock can be directly observed on the gallery wall because no concrete lining exists on the surface of the gallery. The cross-section of the East96 gallery has a horseshoe shape with a height of 3.7 m, a width along the floor of the gallery of 4 m, and a length of 30 m. Its mechanical stability is ensured by steel supports that are regularly spaced every 2 m.

Our experimental investigation focused on the aperture kinetics of desaturation cracks and the deformation of clay rocks.

3. Experimental setup and procedure

3.1. Digital image correlation (DIC)

Full-field optical methods are widely used in experimental mechanics to obtain direct access to the kinematical data issued from mechanical studies [20,21]. Among these optical metrologies, DIC is a non-invasive and non-destructive approach that allows full-field displacement to be obtained [20–25]. The method is very simple to use and can be applied in many experiments on materials and for industrial structures. Nevertheless, because of its large measurement base, this method requires specific developments to analyze kinematical displacement fields when cracks or high gradients are present [21].

In geomechanics, the ability of the DIC method to successfully observe strain localization in geomaterials [26] and to detect cracks in clay rocks [11] has been demonstrated.

To obtain the displacement field of an area undergoing mechanical transformation, the DIC method monitors the positional changes of a speckle pattern located on the sample surface. The speckle pattern is typically the result of a random spatial variation of light intensity. This speckle can be obtained artificially by painting the surface of the sample, but the natural roughness existing on the gallery front was used in this work.

To obtain the full-field displacements (*u,v*) from DIC, two images are necessary, a first gray-level function $f(x,y)$ acquired at the initial state t_0 and a second gray-level function $g(x,y)$ at an actual state t . The principle of this method is to minimize a

correlation function, CF , on a given subset S [22]:

$$CF(u, v) = 1 - \frac{\int_S f(x, y)g(x^*, y^*)dx dy}{\sqrt{\int_S [f(x, y)]^2 dx dy \int_S [g(x^*, y^*)]^2 dx dy}} \quad (1)$$

with $x^* = x - u$ and $y^* = y - v$.

Components of displacement vector (u, v) are obtained in the center of the considered subset S . This procedure is repeated for all subsets constituting the image. Due to the large dimension of the subset, this procedure is not adapted to the presence of discontinuities in the displacement field and cannot be used in the presence of cracks. Some recent studies have been designed [27–29] to solve this problem. A new version of DIC software based on the same principle was recently developed at the PPRIME Institute (CNRS-Poitiers University) to determine full-field displacement. This software allows for measurements in the presence of multiple cracks in the subsets and is efficient even when the speckle pattern is natural.

The strain fields were calculated from displacement fields by considering a first-order finite difference scheme, and subsets of 40×40 pixels². This choice was based on several tests made *a posteriori* with various sizes (16×16 pixels², 32×32 pixels², 40×40 pixels², and 64×64 pixels²) [11]. The results obtained with subsets of 40×40 pixels² offered the best compromise between achieving good spatial resolution and high measurement accuracy.

Errors in DIC measurement arise from various sources, including image noise, image contrast (black or saturated pixels), optical distortions, and parasitic motions during the transformations (out-of-plane, magnification fluctuations). The accuracy of the measurements was estimated as follows: a camera was translated by 1 pixel (0.269 mm), and the resulting displacements were measured by considering 1000 independent subsets. The resulting standard deviation of the measured displacements was considered here as the global experimental error for the displacements (including all possible sources) [e.g., [28]]. For the strain components, the global experimental error is derived from that calculated for the displacements and depends on the gauge length (L_j) and the number of pairs of independent displacement measurements (N) used [30].

The general relationships were simplified into the following expression for the standard deviation of the strains, σ_{Gij} :

$$\sigma_{Gij} = \alpha \frac{\sqrt{2}\sigma_{ui}}{\sqrt{NL_j}} \quad (2)$$

where σ_{ui} is the displacement standard deviation (< 0.1 pixel) for a rigid transformation, N is the number of pairs of independent displacement measurements used to compute the gradient G_{ij} (the indices i and j are related to directions x or y , respectively), and α is a coefficient equal to one (for details, see [30]).

For the local strain measurement, using $N=4$ and $L=21.5$ mm (corresponding to $L=2d$ with $d=40$ pixels) and with regard to the particular speckle used in this work, the standard deviation, σ_{Fij} , was calculated to be 0.1%. This estimation of the global experimental error does not account for the transient evolution of a natural speckle pattern that is associated with the dust existing on the gallery front. This aspect is controlled with difficulty in the field and was considered *a posteriori*, as discussed below.

3.2. Experimental setup

The experimental setup in the East96 gallery (Fig. 1) comprised four parts:

1. The study area (344×275 mm²) was located on the gallery front. At the beginning of the test, the area was in an open crack state, and four desiccation cracks were observable (crack

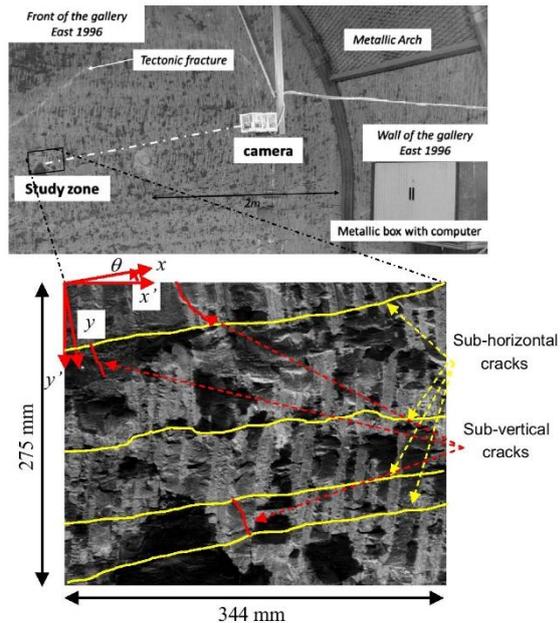


Fig. 1. Experimental setup in the East96 gallery of the Tournemire experimental station. Yellow and red arrows indicate the initial desiccation cracks. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

apertures of a few hundreds of micrometers were estimated *a posteriori*).

2. Images were acquired every 30 min using an IDS μ Eye SE (complementary metal-oxide semiconductor, CMOS, 1/2" sensor) camera (1280×1024 pixels²; IDS Imaging Development Systems GmbH, Obersulm, Germany) equipped with a 50-mm lens and a 400-W spotlight. The camera was installed in an open polyvinyl chloride (PVC) box to prevent dust from accumulating on the optical lens. The open box that enclosed the camera was itself fixed by steel tubes (one vertical and one horizontal) on a support (steel arches) used for the mechanical stability of the gallery. The angle between the camera coordinates (coordinate system: (x', y')) and the orientation of the bedding planes (coordinate system: (x, y)) was 10° ($\theta = 10^\circ$).
3. A personal computer (PC) in which the images were stored, the connections, and a light control system were installed in a metallic box. To increase the lamp life expectancy, the spotlight was automatically switched on 20 s before the acquisition of an image and switched off 10 s later using the PC and the associated electronic card.
4. Climatic data (RH and T) were recorded every 15 min using sensors placed at a distance of 2 m from the study zone (Fig. 1).

This experimental setup allowed a spatial resolution and subset size of approximately $269 \mu\text{m}$ and 10.8 mm, respectively, to be used in this study.

3.3. Acquisition parameters

Images were acquired every 30 min. Data were acquired for one year to obtain DIC measurements representing a complete climatic seasonal cycle (i.e., a dry season and a wet season) in the gallery. This climatic cycle was fully natural: RH and T were not controlled in the gallery.

The first recorded image at t_0 (2011/03/30 12 h 47 min 40 s GMT) was considered the reference image. As mentioned previously, the advantage of choosing this date in March is that three visible sub-horizontal desiccation cracks were present that were parallel to the bedding planes on the gallery front (aperture > a few hundred micrometers). As explained in Section 3.1, the displacements at time t are obtained by comparing the reference image and the image acquired at time t . As mentioned previously, the speckle pattern used in this study was the natural roughness existing on the gallery front.

4. Results

4.1. Climatic data

The climatic data (RH and T) measured during our experimental investigation are presented in Fig. 2. No significant increase of the local temperature was observed after the beginning of the DIC acquisition.

The seasonal changes in RH and T clearly show three general trends. First, at the beginning of the test (March 30, 2011), the state variables, RH and T were approximately 70% and 11 °C, respectively. RH and T increase slowly with some short weekly peaks until the end of August 2011 to reach values of approximately 90% and 13 °C, respectively. Then, at the beginning of autumn, RH and T decrease rapidly, in a more chaotic manner, to minima of approximately 25% and 6 °C in the middle of February 2012, respectively. Finally in a third step, RH and T begin to increase again and reach values of approximately 58% and 11 °C on March 26, 2012, respectively.

4.2. Displacements and displacements gradients during a climatic seasonal cycle

The spatial measurements of in-plane displacements, $u'(x',y')$ and $v'(x',y')$, obtained during the entire seasonal cycle (the dry season plus the wet season) are presented in Figs. 3 and 4, respectively. The number of days after the beginning of data acquisition, RH , and T are indicated for each map of the displacement fields given in both figures. The time intervals between each map have been chosen in order to display our results for two characteristic periods: (a) just after the beginning of the DIC acquisition (dry season) (b) during the period of high values of HR (wet season, see Fig. 2). Apart from these two periods, this time interval is monthly.

These figures clearly illustrate that both displacements are concentrated in narrow zones and bands associated with the sub-horizontal ($d_{k,k+1}$) and sub-vertical (d_A , d_B , and d_C) desiccation cracks (Figs. 3 and 4) Ten months after the test began, when the

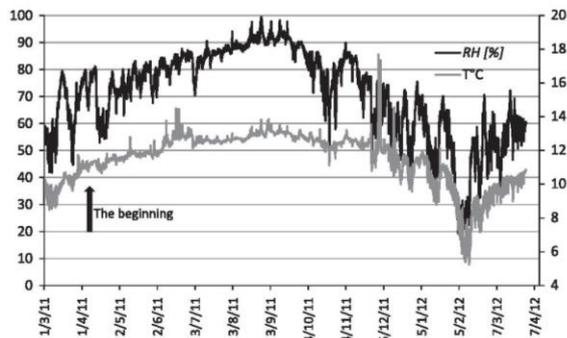


Fig. 2. Seasonal changes in RH and T during the DIC acquisition in the East96 gallery of the Tournemire experimental station.

RH and T values were at a minimum, the displacement field $u'(x',y')$ and $v'(x',y')$, appear almost homogenous. Figs. 3 and 4 do not show the initiation of new sub-horizontal and sub-vertical desiccation cracks during the entire seasonal cycle.

Moreover, the horizontal displacement field $u'(x',y')$ provided new result that is poorly documented in the literature: our measurements have shown the existence of small but significant sub-vertical discontinuities (in the top left of Fig. 3a) associated with sub-vertical desiccation cracks that are perpendicular to the bedding planes. These sub-vertical cracks were not clearly visible at the beginning of the data acquisition (March 30, 2011) on the gallery front.

To confirm the localization of the main (horizontal) desiccation cracks, a v' -profile (shown as a dotted line in Fig. 4b) was extracted and plotted in Fig. 5. The corresponding vertical displacement (u), values were calculated in the crack coordinate system following the associated rotation matrix.

$$\begin{bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'(x',y') \\ v'(x',y') \end{bmatrix} \quad (6)$$

where θ is the angle between the camera coordinates (coordinate system: (x',y')) and the orientation of cracks (coordinate system: (x,y)). Three discontinuities of $v'(x',y')$ can be observed at $y' = 52, 149.6,$ and 214.1 mm (Fig. 5). A comparison with the locations of the visible cracks on the images confirms that these three discontinuities were located at the three desiccation cracks.

Figs. 3 and 4 also indicate that the mean value of the displacement fields, $u'(x',y')$ and $v'(x',y')$ associated with each map evolve during the entire seasonal cycle: the color in the background of each map in Figs. 3 and 4 significantly change for the considered period. This change in the mean value of the displacement field was interpreted as the consequence of additional translations or motions of the camera itself. These anomalous motions which can be named rigid-body displacements were likely associated with small but measurable thermal dilation of the apparatus (the metallic tubes of the experimental setup). This interpretation was confirmed by calculating the displacement gradients (defined by

$$G'_{ij} = \frac{\partial u'_i}{\partial x'_j} \quad (7)$$

where $u'_1 = u', u'_2 = v', x_1 = x', x_2 = y'$. The G'_{ij} maps are presented in Fig. 6. Since G'_{ij} is calculated from two displacement measurements following a first-order difference finite scheme, the values of G'_{ij} cannot be calculated on the edges of the associated maps of displacements. As a matter of fact, the G'_{ij} maps are smaller than the maps of displacements.

An extracted vertical G'_{yy} profile presented in Fig. 5 do not show dissymmetrical fields on both sides of the discontinuities associated with the locations of desiccation cracks. Instead, the maps indicate quasi-homogeneous strains between the observed discontinuities. Moreover, these maps confirm four results. First, hydric strains are clearly anisotropic [e.g., [31]]. In our case, the component G'_{xx} , which is approximately parallel to the desiccation cracks, is much lower than component G'_{yy} after 3.8 months of data acquisition. Second, the amplitudes of the strains associated with the cracks do not evolve monotonically. Some changes can be observed that are related to changes in RH , as explained in Section 4. Third, our measurements demonstrate the existence of sub-vertical desiccation cracks (in the top left of the G'_{xx} maps), as observed in some laboratory cases [32]. Fourth, no new sub-vertical desiccation cracks were created during the entire seasonal cycle.

However, although G'_{ij} maps are insensitive to rigid body displacements, they are significantly affected by speckle evolution during the experiment. This speckle evolution, which is associated

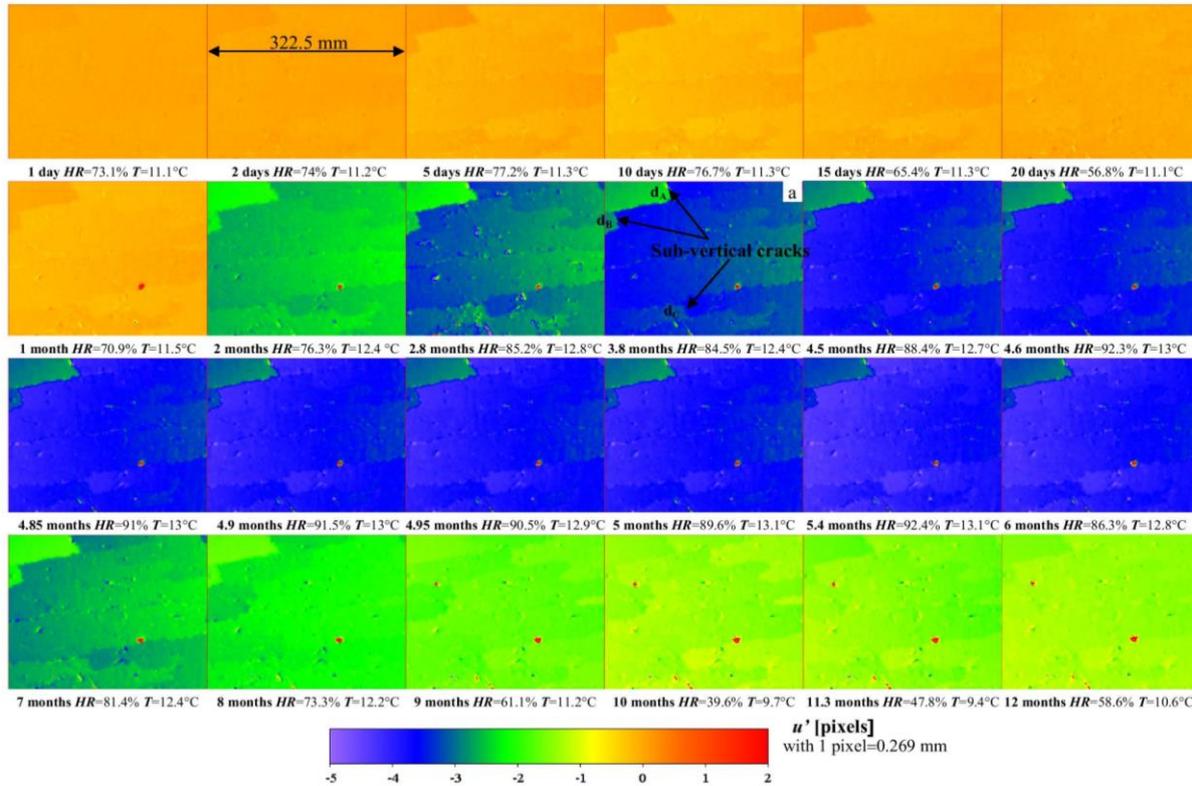


Fig. 3. Maps of the x' -displacements u' (recorded in the camera coordinate system) during the entire seasonal cycle. The numbers of days after the beginning of acquisition, RH, and T values are indicated for each map of the displacement field. The sub-vertical cracks (d_a , d_b , and d_c) are also presented in (a). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

with the presence of dust and the loss of small argillite particles, led to a significant numerical noise in the derivative calculations [Eq. (4)]: all G'_{ij} maps calculated after 3.8 months of data acquisition are very noisy and difficult to use (Fig. 6).

4.3. Mean strains during a climatic seasonal cycle

As mentioned previously, the fields of displacement gradients and thus the strain fields appeared to be homogeneous between the desiccation cracks (Fig. 6). Consequently, it appears useful to introduce five blocks in which mean strains can be calculated, as defined in Fig. 7. In Fig. 7, the five blocks, indicated by different gray levels, are delimited by the image contours, and the sub-horizontal and sub-vertical crack localizations are defined by black and red pixels, respectively (see Section 4.4 for details).

Below, mean strains in the (x,y) coordinate system are calculated using

$$\varepsilon_{ij}^k = \frac{1}{Z_k} \sum_{z_k} \varepsilon_{ij}^k(x,y) \quad (5)$$

where $\varepsilon = R\varepsilon'$, where R is the rotation matrix appearing in Eq. (3), ε_{ij}^k is the mean strain of each block k ($=1-5$), $(i,j)=(x,y)$, and Z_k is the number of subsets of a given block k ($=1-5$).

Fig. 8 displays the calculated mean vertical strain for the largest block ($k=2$), $\varepsilon'_{yy,2}$, as a function of time and RH. The mean strain $\varepsilon'_{yy,2}$ reflects the hydromechanical strain of the non-cracked clay rock, which is perpendicular to the two boundary desiccation cracks of block 2. Fig. 8 shows the following results, which were also observed on the other blocks ($k=1, 3$, and 4, not shown), (a) As observed in

laboratory studies [e.g., [31]], the mean vertical strain both increased with RH (swelling behavior, Fig. 8a) and decreased with RH (shrinkage behavior, Fig. 8b). (b) The clay-rock responded instantaneously to changes in RH. No significant delay or effect of viscosity was observed. (c) However, the relationship between $\varepsilon'_{yy,2}$ and RH was non-linear and irreversible. In fact, clear hysteretic loops were observed (Fig. 8c'–f). Irreversible hydromechanical strains were evident after RH loading–unloading (Fig. 8a'–c'): mean strain did not return to its initial value after a hydric cycle. (d) A memory effect existed: during hydric reloading, the mean vertical strain repeated a portion of the previous path (compare Fig. 8d'–f). The mean vertical strain–RH relationship determined based on our one-year measurements is bounded by a wrapping curve, which defines an upper bound (see the red dotted line in Fig. 8g).

The relationships between mean vertical strain and T exhibited more complex patterns: main strain values were less sensitive to changes in T. This aspect is discussed in further detail below.

4.4. Crack apertures during a climatic seasonal cycle

In Fig. 7, the black pixels between two blocks delimit the crack localizations or “crack zones”, for which the vertical displacement values are used to calculate the crack apertures. For all perpendicular displacement data and for each “crack zone”, an automatic extraction of extrema was performed. A “crack zone” is defined as the zone located around two extrema of perpendicular displacements on both sides of the crack (see the example illustrated in Fig. 5, where each “crack zone” is defined by two dotted lines). Positive values of displacements perpendicular to the crack in

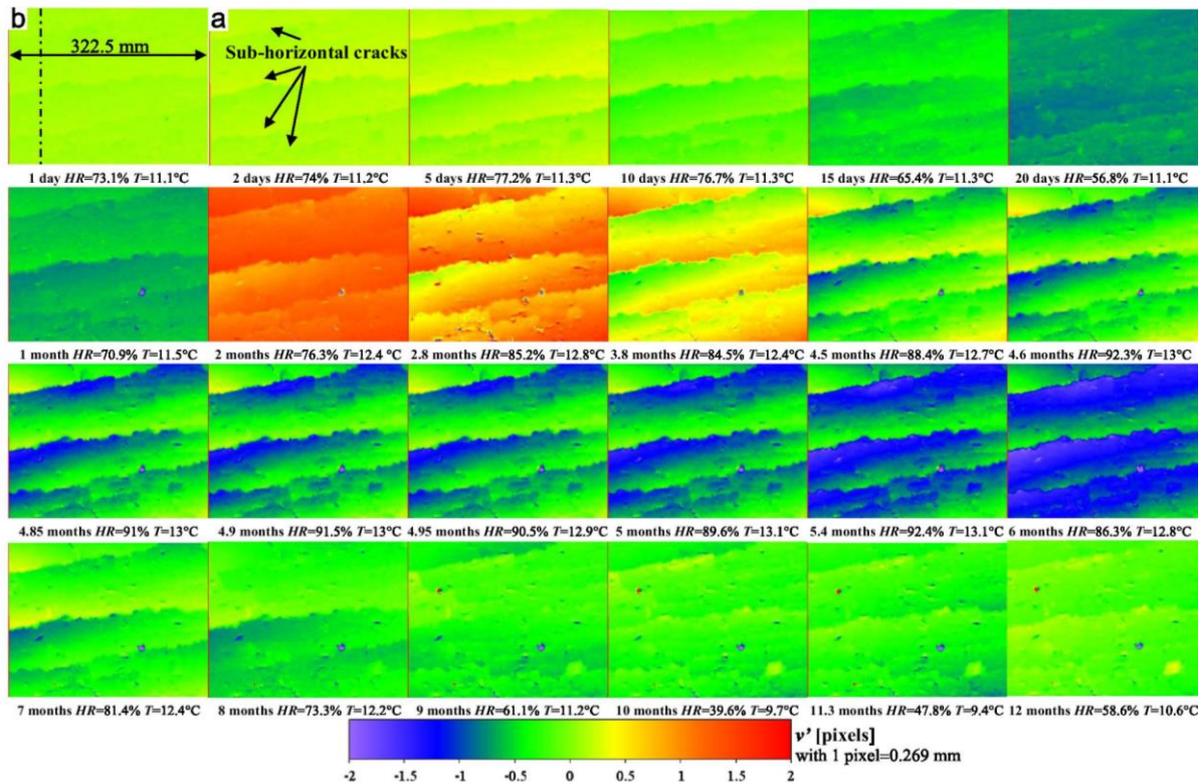


Fig. 4. Maps of the y' -displacements v' (recorded in the camera coordinate system) during the entire seasonal cycle. The numbers of days after the beginning of acquisition, RH , and values are indicated for each map of the displacement field. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article)

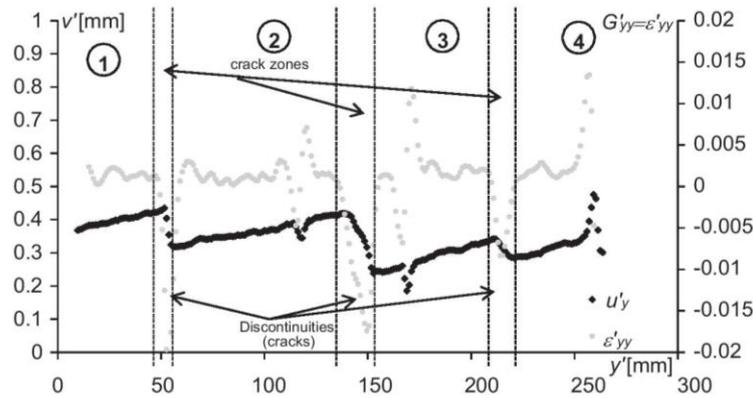


Fig. 5. Profiles of vertical displacement v' and vertical displacement gradients G'_{yy} at time 2011/05/31 14 h 47 min 17 s GMT.

these “crack zones” indicate a crack opening (extension), whereas negative values indicate a crack closing (compression).

The opening values $d^{k,k+1}$ (with block number k , $k=1-5$) were calculated by (a) subtracting the extrema of perpendicular displacements on both sides of the crack and (b) averaging this subtraction over all subsets defining the “crack”:

$$d^{k,k+1} = \frac{1}{w_{k,k+1}} \sum u_y^k(x,y) - u_y^{k+1}(x,y) \quad (6)$$

where $w_{k,k+1}$ is the number of subsets defining each “crack” and $u_y^k(x,y)$ and $u_y^{k+1}(x,y)$ are extrema of absolute perpendicular

displacements on both sides of the cracks. Unlike the displacements, these values of $d^{k,k+1}$ are not affected by rigid-box movements of the camera.

The results in Fig. 9a and b are associated with the three sub-horizontal desiccation cracks that were visible at the beginning of the test and are presented for two reference images. First, the image acquired at time t_0 (at the beginning of data acquisition) which is associated with open desiccation cracks, was considered (Fig. 9a). In this case, the crack apertures were calculated with regard to an initial crack aperture. Second, a reference image recorded at time $t=2011/08/23$, 17 h 49 min 25 s GMT ($RH=91.11$

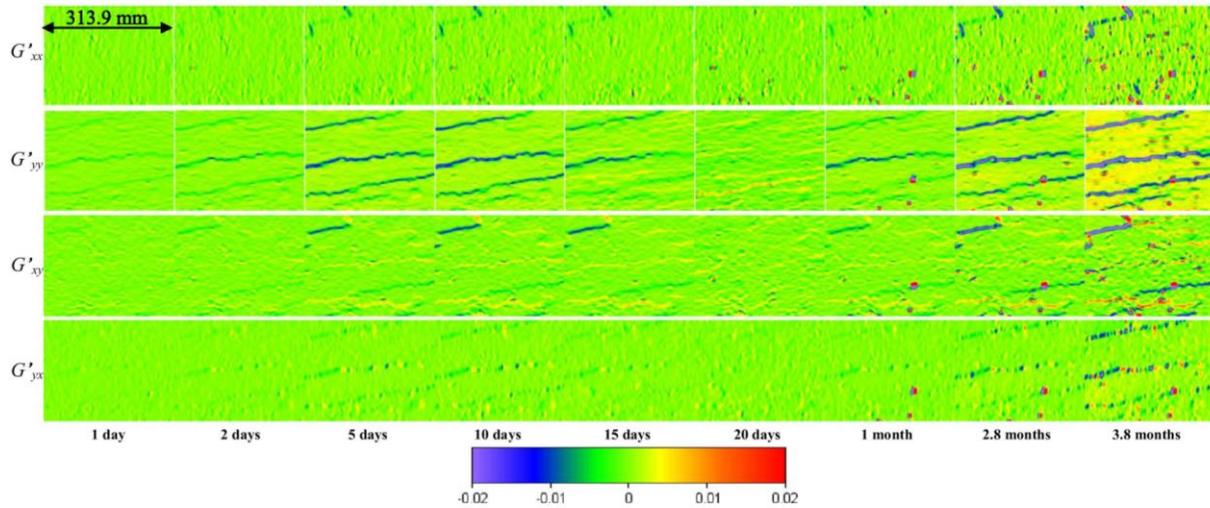


Fig. 6. Maps of the displacement gradients G'_{ij} (recorded in the camera coordinate system) during 3.8 months.

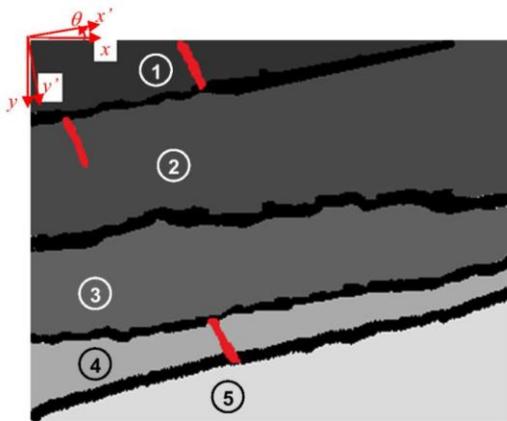


Fig. 7. Spatial definition of four homogeneous blocks used to calculate mean strains and crack apertures. Back, red and gray level areas are for sub-horizontal, sub-vertical cracks and each block k , respectively. The camera coordinate system (x, y) and that of the desiccation cracks (x', y') are also indicated in red. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

$T = 13.05\text{ }^{\circ}\text{C}$), was used to calculate absolute opening values (*i.e.*, only the presence of an opening) because aperture $d^{k,k+1}$, d_A , d_B , and d_C were minimal (*i.e.*, closed cracks) at this time (Fig. 9b and c). In Fig. 9a–c, periods for which there are no data correspond to spotlight or PC dysfunctions.

The results presented in Fig. 9 show that the closure of desiccation cracks is effective during at least three months in summer. The maximum aperture for the three sub-horizontal cracks is visible in February and exhibits values in the range of 0.1–0.5 mm. The results presented in Fig. 9c show the same feature of sub-vertical desiccation cracks (d_A , d_B , and d_C), and the crack apertures exhibit the same order of magnitude as those of the sub-horizontal cracks.

The temporal relationship between the crack apertures and the climatic data appears complex and will be discussed below. However, the two transient peaks of aperture, referred to as A and B in Fig. 10, are clearly associated with a decrease in RH (see Fig. 1).

Focusing on the two peaks reveals that a delay or phase lag exists between the change in RH and the corresponding change in crack aperture, when the variation and duration of RH are greater than 15% and 6 h, respectively (Fig. 10).

However, although crack apertures exhibit the same order of magnitude, significant differences in amplitude can be observed. These differences cannot be explained easily; however, several experimental studies performed on clay rocks [6] and clay soils [33,34] have shown that geometrical features, such as the apertures, depth, and spacing of cracks, are strongly linked each other. These studies indicate that the older and the deeper the crack, the larger the opening. This finding suggests that the crack associated with the aperture $d^{2,3}$ would be the deepest desiccation crack and the first to have appeared in the studied area. Clearly, direct observations of these geometrical crack parameters are needed to test these points.

5. Discussion

5.1. Comparison with previous observations in underground facilities

Although our investigation confirms the strong dependence of desiccation crack behavior on climatic changes [4,6], it also provides at least two new results or features that have not previously been documented in studies performed in underground facilities.

First, although the main desiccation cracks are sub-horizontal and clearly associated with the direction of bedding planes, our work shows that climatic changes can also induce some initiation of sub-vertical cracks. In comparison with sub-horizontal cracks, these sub-vertical cracks appear to exhibit lower crack aperture values. In the same manner, the sub-vertical cracks are also correlated with the measured climatic changes: their apertures increase in winter and decrease in summer. Moreover, the sub-vertical crack observed in our studied area was clearly connected to a sub-horizontal crack with a larger crack aperture ($d^{1,2}$); the initiation of this sub-vertical crack would have been dependent on the present sub-horizontal crack. This association of sub-vertical and sub-horizontal cracks could initiate a flaking effect.

Second, although the crack openings measured at both sites (Tournemire experimental station and Mont Terri laboratory [6])

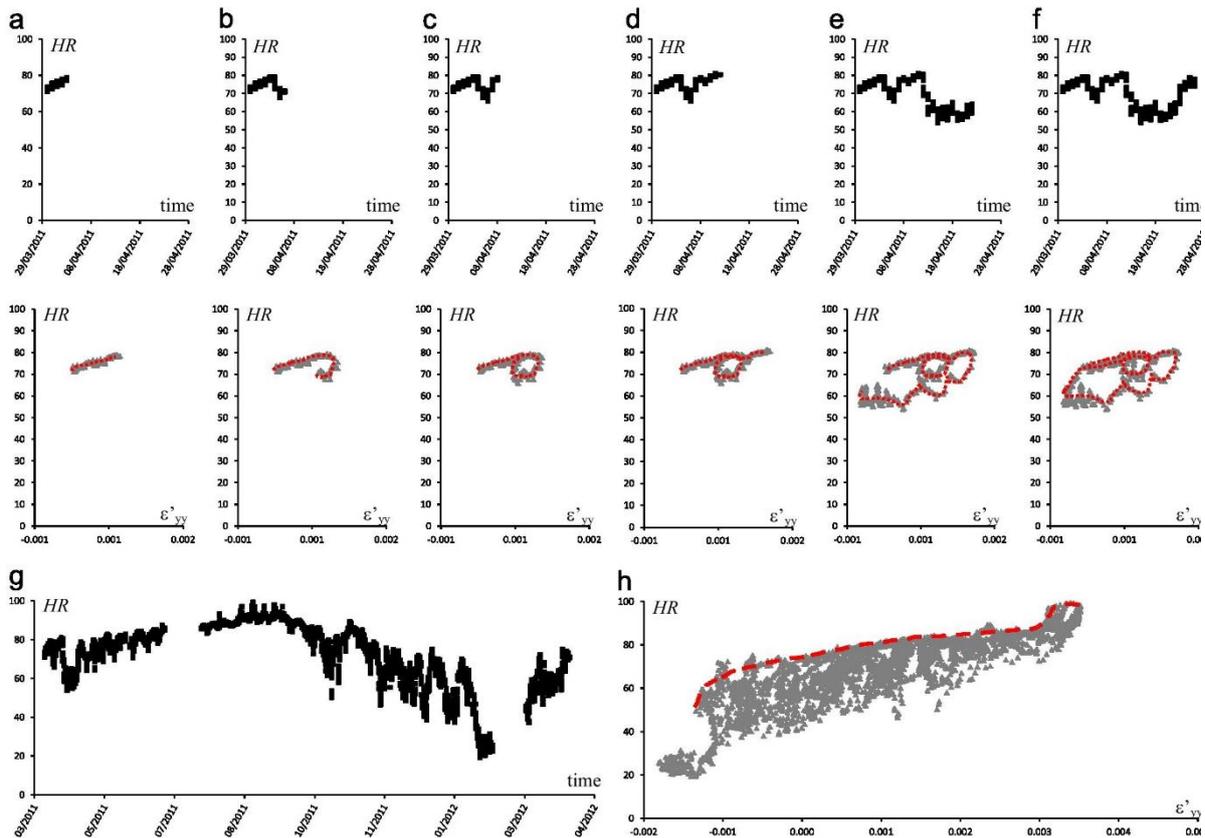


Fig. 8. RH measured during the first month of the experiment (a, b, c, d, e, f). The corresponding transient relationship between RH and the vertical mean strain of the large block ($k=2$), $\epsilon'_{yy,2}$ (a', b', c', d', e', f). RH measured during the entire seasonal cycle (one year) (g). The corresponding transient relationship between RH and $\epsilon'_{yy,2}$ observed over the entire seasonal cycle (h). The red dashed line indicates a wrapping curve. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

were of the same order of magnitude (i.e., several tenths of a millimeter), the evolution of crack aperture at Mont Terri exhibited a negative trend that was not observed at Tournemire using the DIC method. At Tournemire, the crack aperture returned to its initial value after a one-year data acquisition period. The negative trend in displacement data observed at the Mont Terri site led to a total crack closure of approximately 1 mm after almost four years of monitoring [6]. The authors interpreted this negative trend based on two hypotheses: (a) a global vertical convergence at the gallery scale or (b) a reduction of mechanical strength due to the difference between the disjoining pressure existing in the swelling clay minerals and the high suction values applied by the gallery air during winter.

In our case, because the East96 gallery of the Tournemire experimental station was not subject to vertical convergence and was subjected to similar climatic changes to those experienced in the Mont-Terri laboratory, it is safe to confirm that the negative trend in displacement data observed at Mont-Terri is likely due to a convergence effect at the gallery scale. This negative trend would not be due to any hydromechanical loading.

Moreover, compared to the previously mentioned studies conducted in underground research laboratories where conventional methods are used to measure displacements and rock strains, our DIC-based approach presents a simple method of calculating strains arising from hydric loading, as discussed below.

5.2. A simple method for calculating the strains induced by hydric loading

As mentioned previously, rock strain is difficult to measure over several months due to the increasing noise associated with speck pattern evolution. However, it was observed that strains could be almost homogenous in blocks between cracks (at least those perpendicular to the desiccation cracks). Based on this observation we propose to calculate perpendicular strains in a given block using a three-step approach. This approach allows one to calculate strain without using eq. (4) which requires cumbersome numeric calculations.

First, for a given block k , a set of contiguous parallel profiles perpendicular to a crack is defined (at a spacing of four pixels (1.08 mm)). Second, because the spatial evolution of perpendicular displacement (i.e., along a line and outside of the “crack zone”) is almost linear (see, e.g., Fig. 5), this displacement (referred to as U_{wy}^k) can be fitted profile-by-profile using a linear function:

$$U_{wy}^k = A_{wy}^k y + B_{wy}^k \quad (5)$$

where w is the index of a profile perpendicular to the crack, A_{wy}^k is the gradient of the line w , and B_{wy}^k is the U_{wy}^k -intercept of the line indexed by w . In this case, parameters A_{wy}^k and B_{wy}^k are unknown which are estimated profile by profile, by a least squares method. The

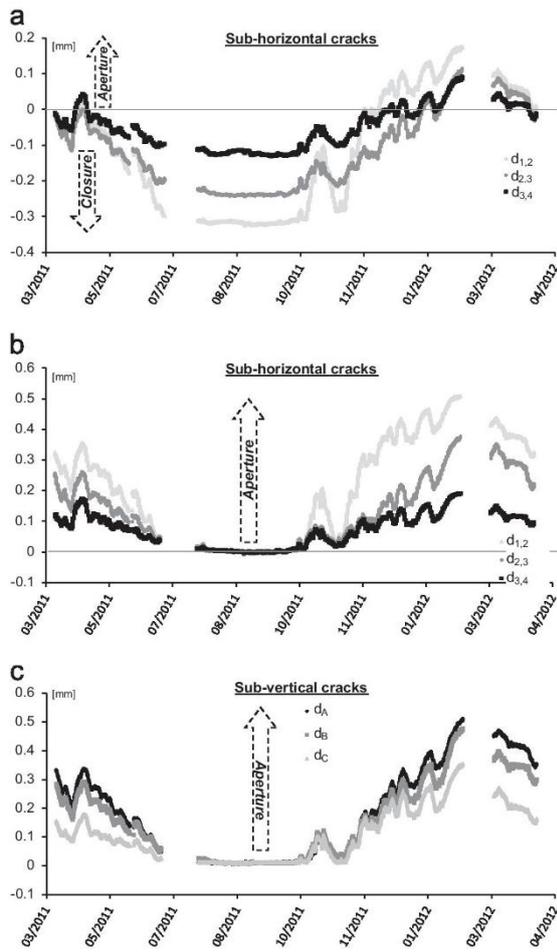


Fig. 9. Sub-horizontal and sub-vertical crack apertures as a function of time. Two reference times, t_0 , are considered: (a): t_0 is the initial instant of the data acquisition (i.e., 30/03/2011 12 h 47 min 00 s GMT); (b) and (c) t_0 is the date 2011/08/23 (17 h 49 min 25 s GMT when $RH=91.11\%$ and $T=13.05\text{ }^\circ\text{C}$), at which time the desiccation cracks are closed.

latter consists in minimizing a gap between displacement data and estimates given by Eq. (7).

Third, for each block k , the mean gradient E_{yy}^k is calculated by averaging all gradients A_{wy}^k over all considered lines:

$$E_{yy}^k = \frac{1}{w_{tot}^k} \sum A_{wy}^k \quad (8)$$

Fig. 11 compares (for each block k ($k=1,2$, or 3)) the mean vertical gradient E_{yy}^k and the mean strain $\langle \epsilon_{yy}^k \rangle$ obtained by averaging all of the local strain ϵ_{yy}^k in the same block using the DIC method (with a first-order finite difference scheme). A good agreement between both calculations is obtained. Consequently, Fig. 9 confirms two results indirectly: (a) the homogeneity of the perpendicular hydric strains in each blocks, i.e., between desiccation cracks and, thus (b) the low values of the distortional components ϵ_{ij}^k .

5.3. On the desiccation cracking mechanisms in Tournemire clay-rocks

This section focuses on the desiccation cracking mechanisms and the related deformation mechanisms evident in our experiment.

Only crack aperture and mean vertical strains $\langle \epsilon_{yy}^k \rangle$ on the studied zone will be considered mechanical observables. Moreover, the physical processes involved at the sub-micrometric scale (i.e., at the scale of the silicate sheets) will not be considered here because the spatial resolution and sizes of the subsets used here were approximately $269\text{ }\mu\text{m}$ and 10.8 mm , respectively.

The starting points used in this discussion are two fundamentals curves often used to study the hydromechanical behavior of clay geomaterials [35–37]: (a) the “swelling–shrinking” curve that presents the specific volume (expressed in cm^3/g) as a function of water content (in %) and (b) the retention curve or, as often termed in geomechanics, the soil–water characteristic curve showing the suction (in MPa) applied to the sample as a function of water content (in %). This curve represents the ability of a porous medium to retain water at various suction values [35].

Both curves have been partly measured on clay–rock samples collected from the Tournemire site [38] (Fig. 12a–c). The theoretical swelling–shrinking curve presented in Fig. 12b displays three typical domains of clay geomaterials. In domain A, the clay sample swells or shrinks in a saturated state (no air is in the pores) following the “saturation line”. In domain B, the clay sample continues to swell or shrink in an unsaturated state. The limit between domains A and B is typically called the air entry value [35]. Finally, in domain C, the very dry sample exhibits almost negligible swelling or shrinkage. The limit between domains B and C is typically referred to as the shrinkage limit. Moreover, Fig. 12a and c confirm that these curves are not reversible during hydric loading (at least in the unsaturated state); they clearly depend on the hydric path (i.e., the drainage or imbibition path).

Although it is difficult to accurately identify the two limits between these three domains from Fig. 12a, a comparison between Fig. 12a and c shows two thresholds. A first threshold is located in the range of water content value [3–3.5%] for which (a) the water content evolves linearly and almost reversibly with the logarithm of suction (Fig. 12c) and (b) a saturated swelling starts or a saturated shrinkage ends (Fig. 12a). This limit would correspond to the limit between domains B and C. In Fig. 12c, this range is associated with a suction value of approximately 30 MPa or an RH value of approximately 80% using Kelvin’s law [35]:

$$RH = \exp\left[\frac{M_w}{RT\rho_w s}\right] \quad (9)$$

where $M_w=18.016 \times 10^{-3}\text{ kg mol}^{-1}$; $R=8.314\text{ J mol}^{-1}\text{ K}^{-1}$; s is suction in Pa; ρ_w is the water density equal to 1 g cm^{-3} ; and the mean temperature gallery $T=11\text{ }^\circ\text{C}$.

A second threshold is located approximately in the water content range of 2–2.5 wt%; below this range, volumetric strains, swelling, or shrinkage are each very small, with almost negligible values (Fig. 12a). Consequently, this range of water content values likely contains the shrinkage limit. The latter exhibits a wide scattering, which may due to several origins, such as the textural and mineralogical heterogeneity of the samples and the dependence of the shrinkage limit on hydric loading. In Fig. 12b, this range of water content values, 2–2.5 wt%, is associated with suction values in the range of 40–100 MPa or RH values of 43–73% using Kelvin’s law and a mean temperature gallery of $11\text{ }^\circ\text{C}$.

These two thresholds, $RH=80\%$ and $RH=60\%$ (an average of 43–73% corresponding to suction values of 40–100 MPa) are reported in Figs. 13 and 14, where the evolution of crack aperture and mean strain $\langle \epsilon_{yy}^k \rangle$ are presented as functions of the state variables RH and T . These thresholds allow for the identification of three domains in Figs. 13 and 14 that are summarized in Fig. 15.

For RH values greater than 80%, cracks were closed or their apertures were less than the DIC accuracy ($\approx 27.0\text{ }\mu\text{m}$) (domain 1). The mean strain $\langle \epsilon_{yy}^k \rangle$ evolved slightly with RH . Domain 1 can be

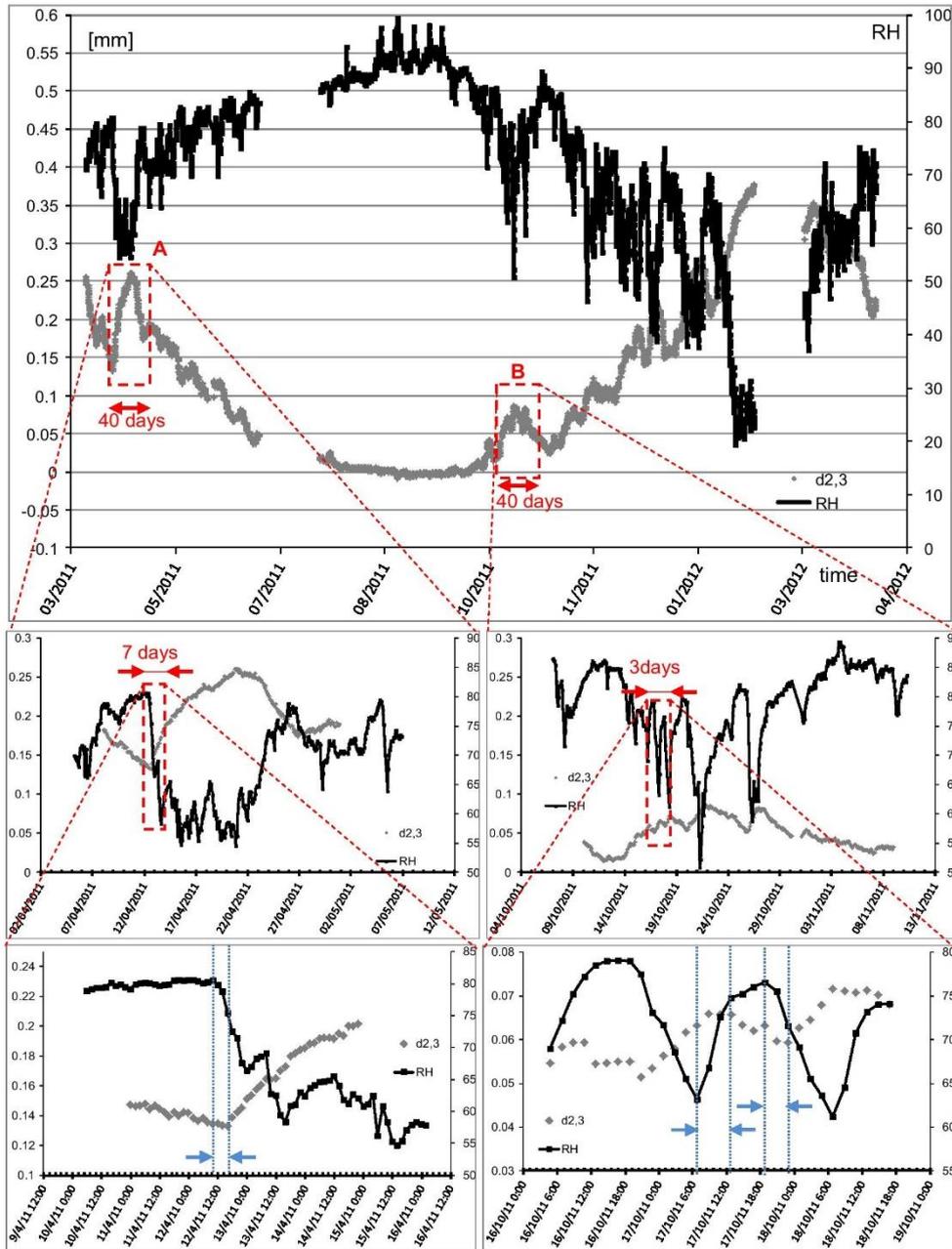


Fig. 10. Sub-horizontal ($d_{2,3}$) crack apertures as a function of time and seasonal changes in RH. A zoomed region of two transient peaks of aperture, referred to as A and

approximately identified with domain A of the swelling–shrinking curve.

RH values between 60% and 80% show a “wrapping curve” (shown in red), which defines an upper bound. From this wrapping curve, the relationships $d^{k,k+1}$ –RH or $\langle \epsilon_{yy}^k \rangle$ –RH will describe complex and hysteric loops (domain 2) (see the zoomed-in region in a monotonic drying path (Fig. 16 on $\langle \epsilon_{yy}^2 \rangle$ only)). This wrapping curve appears to be an intrinsic feature of clay rock because it is observed for the three cracks at the same location in the $d^{k,k+1}$ –RH and $\langle \epsilon_{yy}^k \rangle$ –RH planes. In this domain, apertures $d^{k,k+1}$ and

mean strains $\langle \epsilon_{yy}^k \rangle$ evolved significantly and exhibited irreversible values.

RH values lower than 60% represent the domain of hysteric loop. This domain is characterized by high slopes ($(\partial RH / \partial d^{k,k+1})_T \gg 1$ or $(\partial RH / \partial \langle \epsilon_{yy}^k \rangle)_T \gg 1$) (domain 3): large changes in RH induce small changes in $d^{k,k+1}$ and $\langle \epsilon_{yy}^k \rangle$. Domain 3 can be approximately identified with domain C of the swelling–shrinking curve. When RH reaches 20%, the large hysteric loops disappear.

Note that the previous thresholds (i.e., $RH=80\%$ and $RH=60\%$) can also be related with less accuracy to T . The limit between

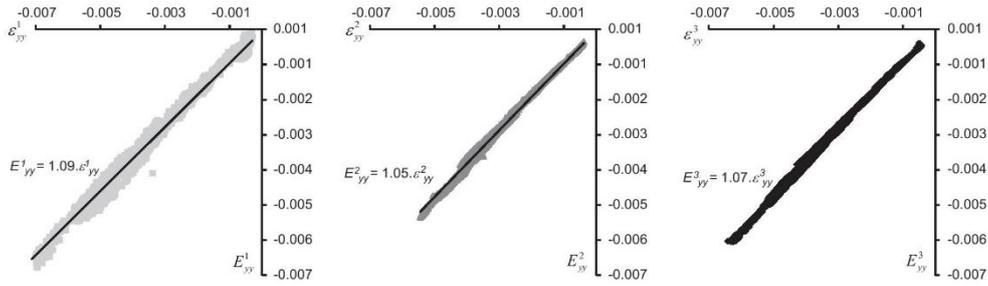


Fig. 11. Mean gradient E^k_{yy} for each block k ($k=1, 2$ or 3) as a function of the mean strain $\langle \epsilon^k_{yy} \rangle$. Mean gradient E^k_{yy} is calculated from a linear approximation (Eq. 8) independently of $\langle \epsilon^k_{yy} \rangle$. Mean strain $\langle \epsilon^k_{yy} \rangle$ is obtained by averaging all of the local strain ϵ^k_{yy} in the same block using the DIC method.

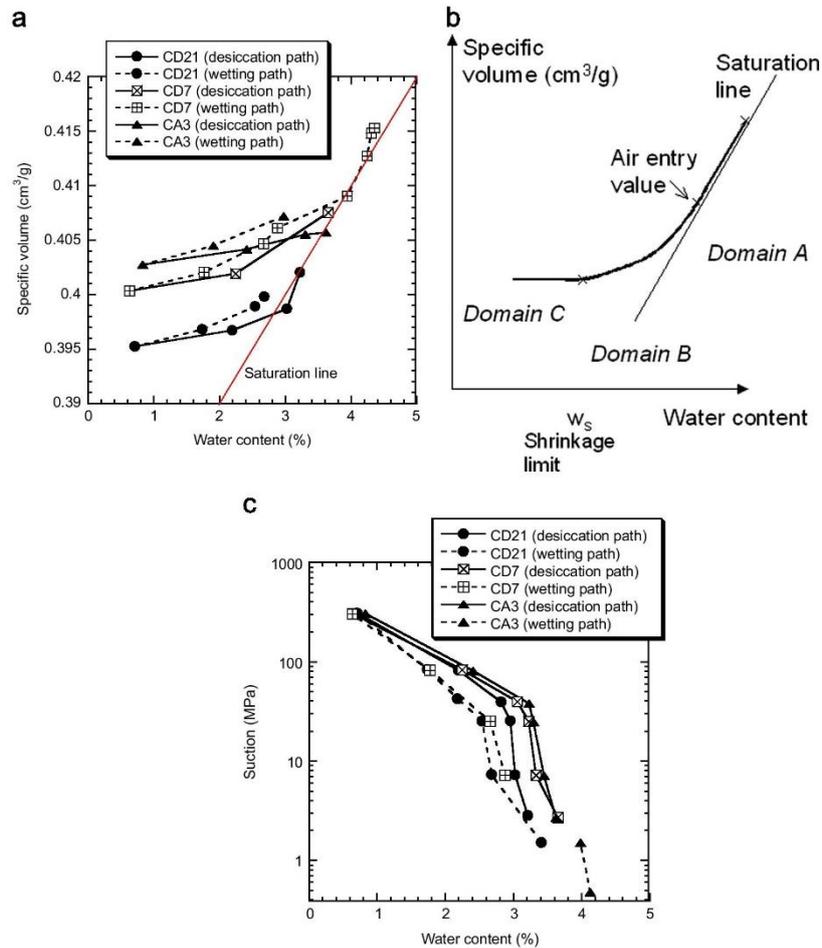


Fig. 12. (a) Swelling–shrinking curves. (b) Theoretical swelling–shrinking curve of a measured on Tournemire clay–rock samples clayey geomaterial [modified from [38]]. (c) The retention curve measured on the same Tournemire samples [modified from [38]].

domains 1 and 2 and that between domains 2 and 3 are approximately equal to 13 °C and 11 °C, respectively (Figs. 13b and 14b).

At this stage, based on the orders of magnitude of the characteristic thresholds provided in Fig. 12a and c, Figs. 13 and 14 allow for the proposal of a conceptual model for the desiccation cracking mechanisms summarized in Fig. 15. To comment on Fig. 15 and for the sake of simplicity, let us consider a saturated state (i.e., closed cracks in summer) as the initial state (point I in

the $d^{k,k+1}-RH$ plot and the swelling–shrinking curve). During a first drainage path, the studied zone on the gallery front evolves in domain 1: no crack is visible, and the clay rock shrinks in a near-saturated state.

At point A, domain 2 starts. In domain 2, the desiccation cracks open and propagate; the crack aperture drastically increases up to point B, whereas the mean clay–rock strain $\langle \epsilon^k_{yy} \rangle$ is related to an important shrinkage of the clay–rock.

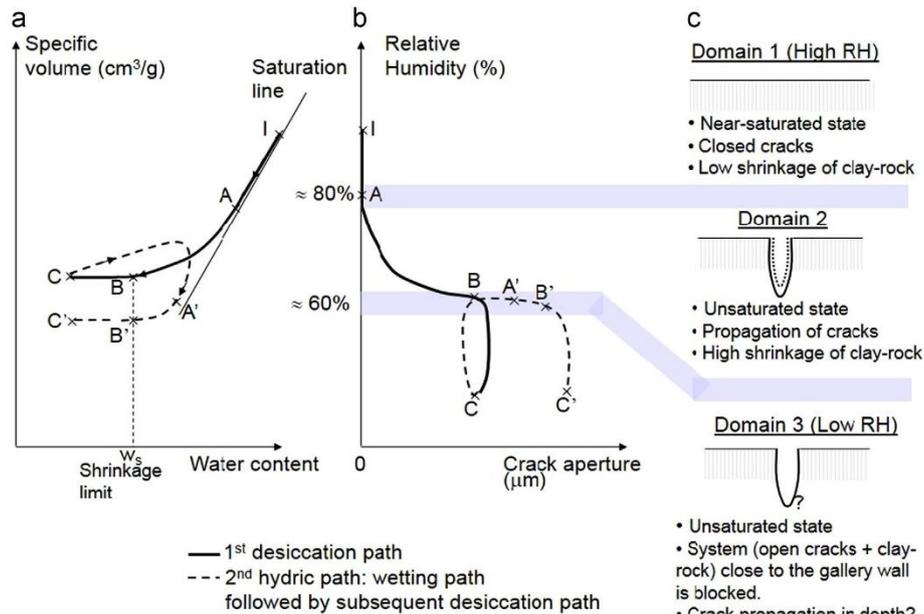


Fig. 15. Conceptual model of the cracking mechanism involved in our experiment. (a) shrinkage–swelling curves of a monotonic desiccation path and a second hydic path (desiccation path+wetting path). (b) The corresponding evolution of crack aperture as a function of RH. (c) Description of the three domains involved in the cracking mechanism (for the sake of clarity, the sole shrinkage path is considered).

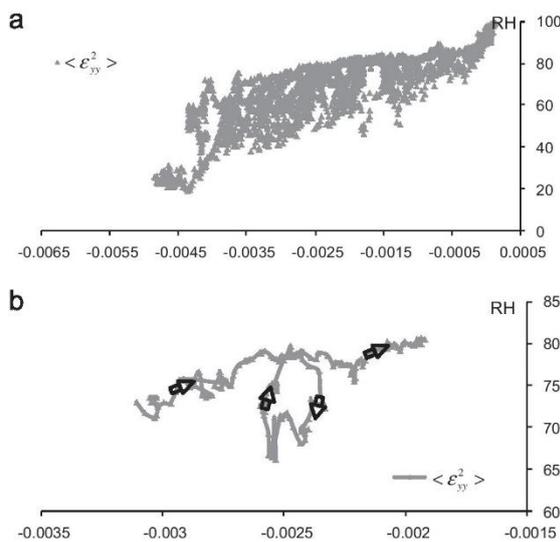


Fig. 16. (a) Mean strain $\langle \epsilon_{yy}^2 \rangle$ as a function of RH. (b) Mean strain $\langle \epsilon_{yy}^2 \rangle$ at the time 2011/03/30 13 h 47 min 40 s to 2011/04/01 21 h 47 min 40 s.

correlated to changes in RH and T. A delay or viscous effect was observed; the mechanical responses of clay rock began after approximately 8 h when the variations of RH were greater than 15% of the same period (Fig. 10).

As observed at the Mont-Terri site, desiccation cracks close in summer and open in winter. However, contrary to the measurements acquired at the Swiss site, the crack apertures of the desiccation cracks were reversible after one year of data acquisition. Our work has shown that climatic changes can also induce some sub-vertical cracks.

The interpretation of our entire dataset has emphasized the need for a multi-scale approach to understand the desiccation cracking mechanisms. In other words, the initiation, propagation and evolution of desiccation cracks induced by ventilation at the scale of an underground facility can be understood if both macroscopic observables (the apertures, spacing and depths of desiccation cracks) and microscopic processes (microcracking induced by drying/wetting paths) are considered together.

Acknowledgments

We thank Paul Bossart and Andreas Moeri for their helpful comments and suggestions. The authors would like to express their acknowledgment to the GNR TRASSE (Transfert des Radionucléides dans les Sols, les Sous-sols et vers les Ecosystèmes) and NEEDS program (Nucléaire, Energie, Environnement, Déchets, Société), and to the French Institute for Nuclear Safety and Radioprotection (IRSN) for supporting and funding this work. We also thank C. Laforest, P. Desveaux, and F. Hesser for their technical help.

References

- [1] Blümling P, Bernier F, Lebon P, Martin CD. The excavation-damaged zone in clay formations – time-dependent behaviour and influence on performance assessment. *Phys Chem Earth* 2007;32:588–99.
- [2] Bossard P, Meier MP, Moeri A, Trick T, Major JC. Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the opalinus clay of the mont terri rock laboratory. *Eng Geol* 2002;66(1–2):19–38.
- [3] Tsang CF, Bernier F, Davies C. Geohydromechanical processes in the excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays – in the context of radioactive waste disposal. *Int J Rock Mech Min Sci* 2005;42(1):109–25.
- [4] Cabrera J, Beaucaire C, Bruno G, De Windt L, Genty A, Ramambasoa N, et al., *Projet Tournemire: Synthèse des Résultats des Programmes de Recherche 1995/1999*. IRSN Report; 2001.
- [5] Matray JM, Savoye S, Cabrera J. Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire’s argillite (Aveyron, France). *Eng Geol* 2007;90:1–16.

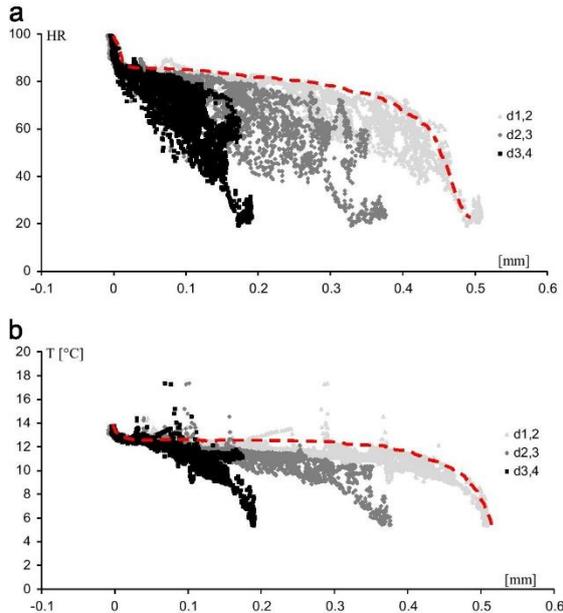


Fig. 13. (a) crack apertures as a function of RH. (b) crack apertures as a function of T. Wrapping curves (red dashed line) plotted only for $d_{1,2}$. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

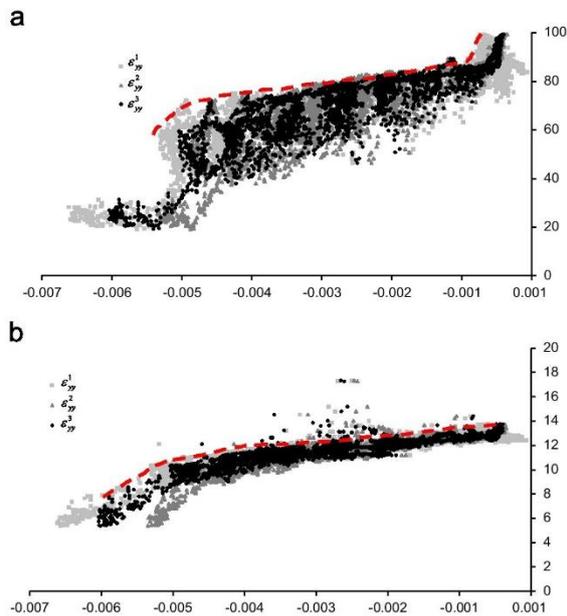


Fig. 14. (a) Mean strain $\langle \epsilon_{yy}^k \rangle$ as a function of RH. (b) Mean strain $\langle \epsilon_{yy}^k \rangle$ as a function of T. Wrapping curves (red dashed line) plotted only for $\langle \epsilon_{yy}^1 \rangle$. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

At point B (associated with the shrinkage limit w_s), as the values of RH continue to decrease significantly, the crack aperture and mean clay–rock strains evolve very slightly up to point C; in

this domain (domain 3), the system (crack plus clay rock) appears to be blocked close to the gallery–air interface.

However, contrary to the results obtained in laboratory studies [37,39], when a new wetting path begins, the crack aperture and mean clay–rock strains describe a new hysteric loop up to point A'. This point A' is close to a new equivalent air entry value and is associated with the shrinkage limit reached at a new point B'. When the shrinkage limit, w_s , is reached once again, the crack aperture and mean clay–rock strains do not evolve significantly. The points B, A', and B' in the $d^{k,k+1}$ –RH plane describe a part of the wrapping curve observed in Fig. 13.

In our case, the irreversibility of the shrinkage–swelling loop and thus the irreversibility of the $d^{k,k+1}$ –RH loop is interpreted as a microcracking process induced during the first wetting–drying path for at least two reasons. First, Gasc-Barbier and Tessier [37] measured the shrinkage–swelling curve of small samples (volumes on the order of cubic centimeters) and demonstrated that their superimposed shrinkage–swelling curves resulting from wetting–drying cycles are not associated with the initiation of new microcracks, as made evident by mercury intrusion porosimetry measurements. Second, Montes et al. [40] clearly observed textural changes leading to additional microcracking during wetting–drying cycles using an environmental scanning electron microscope (ESEM).

Consequently, it is assumed that a microcracking process would have occurred in our *in situ* experimental investigation during the drying path of winter, and this process could explain the numerous complex non-superimposed loops observed in Figs. 13 and 14. However, this microcracking process, which can be identified as a damage process, would be reversible at the year temporal scale because our experimental data show that the crack apertures and mean strains did not exhibit residual values during the involved seasonal cycle.

Finally, we are aware that the conceptual model proposed in Fig. 15 may be too simple because the amplitudes in RH changes were chaotic and highly variables (see Fig. 2); the slopes and amplitudes of the hysteretic loops associated with the $d^{k,k+1}$ –RH relationship should also be variable. Nevertheless, we are convinced that the simple sketches presented in Fig. 15 can help in understanding the general shapes and trends of the $d^{k,k+1}$ –RH and $\langle \epsilon_{yy}^k \rangle$ –RH curves presented in Figs. 13 and 14.

6. Conclusions

The non-invasive DIC method was used for the first time in an underground gallery at Tournemire, during which time the RH and T were continuously measured for more than one year. This *in situ* experimental investigation has demonstrated the ability of the DIC method to monitor (a) spatial clay–rock deformations for at least four months and (b) openings and closures of desiccation cracks during a natural seasonal variation; *i.e.*, for one year.

From a phenomenological perspective, the following conclusions have been reached:

A few hours after the data acquisition began, strains concentrated rapidly into narrow zones or bands indicating typical strain localization as also observed in the laboratory. These narrow zones or bands were desiccation cracks (typical aperture ≤ 0.5 mm) that were observable from the displacement fields. The strain fields between these desiccation cracks were homogeneous at the spatial resolution used in this study (269 μm).

The hydric strains were anisotropic: the strains perpendicular to desiccation cracks were much higher than those parallel to the same cracks.

The crack apertures calculated from the displacement fields and the mean strain perpendicular to the cracks were clearly

- [6] Mōri A, Bossart P, Matray JM, Franck E, Fatmi H, Ababou R, Mont terri project: cyclic deformations in the opalinus clay. In: Proceedings of the international meeting of clay in natural and engineered barriers for radioactive waste confinements, Nantes; 29 March–01 April 2010, p. 103–24.
- [7] Bésuelle P, Viggiani G, Desrues J, Bornert M. X-ray micro CT for studying strain localization in clay rocks under triaxial compression. *Advances in x-ray tomography for geomaterials*. London: ISTE Ltd.; 2006; 35–52.
- [8] Lenoir N, Bornert M, Desrues J, Viggiani G. 3D digital image correlation applied to X-ray micro tomography from triaxial compression tests on argillaceous rock. *Strain* 2007;43:193–205.
- [9] Bornert M, Valès F, Gharbi D, et al. Multiscale full-field strain measurements for micromechanical investigation of the hydromechanical behaviour of clayey rocks. *Strain* 2010;46(1):33–46.
- [10] Yang D, Bornert M, Chanchole Wang L, Valli P, Gatmiri B. Experimental investigation of the delayed behavior of unsaturated argillaceous rocks by means of digital image correlation techniques. *Appl Clay Sci* 2011;54:53–62.
- [11] Hedan S, Cosenza P, Valle V, Fauchille AL, Dudoignon P, Cabrera J. Investigation of the damage induced by desiccation and heating of Tournemire argillite using digital image correlation. *Int J Rock Mech Min Sci* 2012;51:64–75.
- [12] Yang DS, Bornert M, Chanchole S, Gharbi H, Valli P, Gatmiri B. Dependence of elastic properties of argillaceous rocks on moisture content investigated with optical full-field strain measurement techniques. *Int J Rock Mech Min Sci* 2012;53:45–55.
- [13] Valès F, Nguyen Minh D, Gharbi H, Rejeb A. Experimental study of the influence of the degree of saturation on physical and mechanical properties in Tournemire shale (France). *Appl Clay Sci* 2004;26:197–207.
- [14] Bonin B. Deep geological disposal in argillaceous formations: studies at the tournemire test site. *J Contam Hydrol* 1998;35:315–30.
- [15] De Windt L, Cabrera J, Boisson JY. Hydrochemistry in an indurated argillaceous formation (Tournemire Tunnel Site, France). In: Arehart GB, Hulston JR, editors. *Water–rock interaction*. Rotterdam: Balkema; 1998. p. 145–8.
- [16] Charpentier D, Mosser-Ruck R, Cathelineau M, Guillaume D. Oxidation of mudstone in a tunnel (Tournemire, France): consequences for the mineralogy and chemistry of clays minerals. *Clay Miner* 2004;39:135–49.
- [17] Niandou H, Shao JF, Henry JP, Fourmaintraux D. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale. *Int J Rock Mech Min Sci* 1997;34:3–16.
- [18] Cosenza P, Ghoreychi M, de Marsily G, Vasseur G, Violette S. Theoretical prediction of poroelastic properties of argillaceous rocks from in situ specific storage coefficient. *Water Resour Res* 2002;38:10.
- [19] Fatmi H. Méthodologie d'analyse des signaux et caractérisation hydrogéologique: application aux chroniques de données obtenues aux laboratoires souterrains du Mont Terri, Tournemire et Meuse/Haute-Marne [Ph.D. thesis], University of Toulouse, France; 2004.
- [20] Ritter R. Strain measurement in material testing by optical methods, Local strain and temperature in non-uniform fields at elevated temperatures. In: Proceedings of the symposium held at Berlin, Germany; 14–15 March 1996. p. 1–12.
- [21] Grédiac M. The use of full-field measurement methods in composite material characterization: interest and limitations. *Compos A: Appl Sci Manuf* 2004;751–61.
- [22] Bruck H, McNeill S, Sutton M, Peters W. Digital image correlation using Newton–Raphson method of partial differential correction. *Exp Mech* 1989;29:261–7.
- [23] Lagarde A, Cottron M. Optical methods applied to the investigations of fracture mechanics. In: Proceedings of SPIE international society for optical engineering, vol. 2342; 1994:p. 188–200.
- [24] Jacquot P, Rastogi Pramod K. Speckle motions induced by rigid-body motions movements in free-space geometry: an explicit investigation and extension to new cases. *Appl Opt* 1979;18(12):2022–32.
- [25] Hedan S, Valle V, Cottron M. In plane displacement formulation for finite cracked plates under mode I using grid method and finite element analysis. *Exp Mech* 2010;50(3):401–12.
- [26] Desrues J, Lanier J, Stutz P. Localization of the deformation in tests on sand sample. *Eng Fract Mech* 1985;21(4):909–21.
- [27] Bares J, Gelebart L, Rupil J, Vincent L. A joined finite element based method to simulate 3D crack network initiation and propagation in mechanical and thermal fatigue. *Int J Fatigue* 2012;44:279–91.
- [28] Rethore J, Roux S, Hild F. Optimal and noise-robust extraction of fracture mechanics parameters from kinematic measurements. *Eng Fract Mech* 2011;78:1827–45.
- [29] Besnard G, Hild F, Roux S. Finite-element displacement fields analysis from digital images: application to portevin-le châtelier bands. *Exp Mech* 2006;46:789–803.
- [30] Allais L, Bornert M, Bretheau T, Caldemaison D. Experimental characterization of the local strain field in a heterogeneous elastoplastic material. *Acta Metal Mater* 1994;42:3865–80.
- [31] Pham QT, Vales F, Malinsky L, Nguyen Minh D, Gharbi H. Effects of desaturation–resaturation on mudstone. *Phys. Chem. Earth Parts A/B/C* 2007;32: 646–55.
- [32] Valès F. Modes de déformation et d'endommagement des roches argileuses profondes sous sollicitations hydro-mécaniques [Ph.D thesis]. Ecole Polytechnique, Palaiseau, France; 2008.
- [33] Konrad JM, Ayad R. Desiccation of as sensitive clay: field experimental observations. *Can Geotech J* 1997;34:929–42.
- [34] Peron H, Hueckel T, Laloui L, Hu LB. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification. *Can Geotech J* 2009;46:1177–201.
- [35] Fredlund DG, Rahardjo H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: Wiley; 1993.
- [36] Delage P, Howat MD, Cui YJ. The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Eng Geol* 1998;50:31–48.
- [37] Gasc-Barbier M, Tessier D. Structural modifications of a hard deep clayey rock due to hygro-mechanical solicitations. *Int J Geomech* 2007;7(3):227–35.
- [38] Boisson JY, Bertrand L, Heitz JF, Moreau-Le Golvan Y. In situ and laboratory investigations of fluid flows through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, southern France. *J Hydrogeol* 2001;9:108–23.
- [39] Tripathy S, Subba Rao KS, Fredlund DG. Water content–void ratio swell–shrink paths of compacted expansive soils. *Can Geotech J* 2002;39:938–59.
- [40] Montes HG, Duplay J, Martinez L, Escoffier S, Rousset D. Structural modifications of Callovo-Oxfordian argillite under hydration/dehydration conditions. *Appl Clay Sci* 2004;25:187–94.

Digital Image Correlation Development for the Study of Materials Including Multiple Crossing Cracks

V. Valle · S. Hedan · P. Cosenza · A.L. Fauchille · M. Berdjane

Received: 21 March 2014 / Accepted: 2 September 2014 / Published online: 23 September 2014
 © Society for Experimental Mechanics 2014

Abstract This study reports on the digital image correlation (DIC) procedure and its limitation in the case of fracture analysis. A comparison of three different algorithms was carried out for the case of crossing cracks. An improvement of the DIC procedure was proposed to solve the uncertainty problems at the vicinity of the junction of two cracks. This procedure was proposed to perform an evaluation of the displacement when multiple cracks are present in the subset. It was developed using classical minimization process, including Heaviside functions in the kinematical field representation. Some tests were performed to demonstrate the performances of this new algorithm. An application of the multiple fractures on Argillite rock is shown to validate the efficiency and the robustness of the proposed method.

Keywords Digital image correlation · Fracture · Multiple cracks · Crack crossing · Full field measurement · Rock

Introduction

Optical measurement methods are widely employed in experimental mechanics to characterize the behavior of materials. Some of these methods provide direct access to the experimental kinematical field without contact [1–5]. Moreover, for some of these methods, it is not even necessary to prepare the

specimen surface [6]. Among such optical methods, the digital image correlation (DIC) procedure was developed to provide more accurate measurements [7–10], and studies have been conducted to offer an assessment of this method [11]. Many studies have employed this method in the field of fracture mechanics [12–20]. To determine precisely kinematical fields in the neighborhood of the crack and to evaluate its position, some methods have been specially developed. Some of them use a local approach like the point-wise method [21] which uses a genetic algorithm to treat each pixel separately, and the subset splitting method [22] which cuts the subset in two parts. Another method, the eXtended DIC method [23] is based on X-FEM developments using a global approach. In this last development, the properties of Heaviside functions are employed to solve the problem of kinematical discontinuities. Other developments have been fulfilled in the aim to perform an accurate determination of the crack position [18–20]. However the experimental study of multiple growing and crossing cracks localization is generally treated using a classical DIC algorithm and discarding data near discontinuities [14].

In this paper, it is proposed to use Heaviside function properties in the case of a local approach (subset based), and in the aim to determine both kinematical field and crack position when multiple discontinuities are in one subset and to bring an answer for the multiple crossing cracks localization issue.

The aims of this paper can be developed as:

- A novel approach is proposed, the Heaviside-based DIC method (H^k -DIC where k is the number of cracks in one subset), to address the cases of multiple cracks and crack crossing in a subset.
- A comparison between a classical DIC method, and the new algorithm (H^1 -DIC) is proposed on synthetic images representing a single crack (opening Mode I and sliding Mode II).

V. Valle (✉) · M. Berdjane
 Institut PPRIME, Université de Poitiers, CNRS, ENSMA, UPR
 3346, Bd Marie et Pierre Curie, 86962 Chasseneuil Cedex, France
 e-mail: valery.valle@univ-poitiers.fr

S. Hedan · P. Cosenza · A.L. Fauchille
 IC2MP, HydrASA, Université de Poitiers, CNRS, ENSIP, UMR
 7285, 1 rue Marcel Doré, 86073 Poitiers Cedex 9, France



- A validation of the crack localization with H^1 -DIC is presented on synthetic images representing a circular single crack.
- A comparison between the new proposed algorithms (H^1 -DIC and H^2 -DIC) is shown on synthetic images representing a crack crossing.
- An application on the study of fractured clay rock in underground gallery is presented using a natural speckle. The crack network is connected and composed of two types of fractures: (a) sub-horizontal cracks and (b) sub-vertical cracks.

Heaviside-Based DIC (H^k -DIC)

The proposed method is an extension of the classical DIC method. It has been chosen to develop this process using a local approach to clearly separate metrological problems from finite element ones. Actually, two methods based on local approach have been described in literature. The point-wise method [21] which can capture cracks but is computationally expensive due to a large number of unknowns. The subset-splitting technique [22] which is simpler, cannot handle more than one crack. The proposed method has been established using classical developments [7–9] (i.e. a minimization process on a subset). For sub-pixel evaluation, the bi-cubic image interpolation algorithm was selected. The correlation function S is described using a classical representation where F and G are the initial and the final images respectively.

$$S\left(u, v, \frac{du}{dx}, \frac{du}{dy}, \frac{dv}{dx}, \frac{dv}{dy}\right) = 1 - \frac{\int_s F(x, y)G(x^*, y^*) dx dy}{\sqrt{\int_s (F(x, y) - \bar{F}_s)^2 dx dy \int_s (G(x^*, y^*) - \bar{G}_s)^2 dx dy}} \tag{1}$$

$$x^* = x - u - \frac{du}{dx}x - \frac{du}{dy}y \text{ and } y^* = y - v - \frac{dv}{dx}x - \frac{dv}{dy}y \tag{2}$$

The kinematical transformation is defined by simple in-plane translations (u, v) and the first gradients $\left(\frac{du}{dx}, \frac{du}{dy}, \frac{dv}{dx}, \frac{dv}{dy}\right)$

To be able to accurately determine displacements in presence of a crack in the subset, the kinematical field was enriched by adding Heaviside functions as in the spirit of the

extended digital image correlation method [23]. However the algorithm was developed as a local approach and offers a treatment on a subset. The kinematical field was defined to represent kinematical jumps along a straight line following the development of the subset splitting method [22]. However, the proposed technique differs from the previously cited by many points.

- The kinematical field can be described by:

$$\begin{aligned} x^* &= x - u - \frac{du}{dx}x - \frac{du}{dy}y - \sum_k u_k H_k(x, y) \\ y^* &= y - v - \frac{dv}{dx}x - \frac{dv}{dy}y - \sum_k v_k H_k(x, y) \end{aligned} \tag{3}$$

Figure 1, equations (4) and (5) show the description of the two-dimensional Heaviside function. When k is equal to 1, the proposed field is adapted to analyze subsets with one crack. For $k=2$, the field is well adapted to represent two cracks, with or without crossing or branch. $k>2$ can be used to retrieved kinematical field in particular cases like multiple branch crack studies.

- To ensure a correct measurement in any crack orientations, the straight line representing the crack was defined by its polar coordinates and can be described in Fig. 1 and by:

$$\begin{aligned} H_k(x, y) &= H_k(r_k, \theta_k, r) \\ H_k(x, y) &= H_k(x \cos(\theta_k) + y \sin(\theta_k) - r_k) = H_k(r - r_k) \end{aligned} \tag{4}$$

And

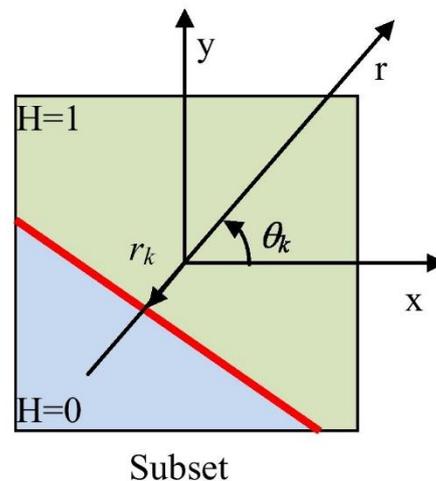


Fig. 1 2D Heaviside function description in the subset base



$$\begin{aligned} H_k(x,y) &= 0 \text{ if } r \leq r_k \\ H_k(x,y) &= 1 \text{ if } r > r_k \end{aligned} \tag{5}$$

where r_k and θ_k define the position and the orientation of the two-dimensional Heaviside function H_k .

- The subset was treated as a unique field using a set of k two-dimensional Heaviside functions $H_k(x, y)$ associated with k jump vectors (u_k, v_k) . All subsets were enriched. u_k and v_k approach zero when there is no discontinuity in the subset. Contrarily to standard DIC algorithm which cannot ensure solution unicity when a discontinuity is present in the subset, this approach gives a unique global solution by subset. This property allows conserving equivalent metrological performances with or without discontinuity in the subset.
- Parameters $(u, v, \frac{du}{dx}, \frac{dv}{dy}, \frac{du}{dy}, \frac{dv}{dx}, u_k, v_k, \theta_k, r_k)$ were minimized in a single process. As other DIC algorithms, before optimization, initial values were calculated by a minimization process to ensure an optimization start near the global solution.
- The optimization process, based on a Newton algorithm, was employed to retrieve the displacement at the center of the subset.
- Each subset was treated separately and didn't depend on a "nearest well correlated" subset. Because of displacement discontinuity presence, two spatially nearest data could have displacement values far from each other. The chosen procedure ensures the convergence independency of the algorithm and gives a better robustness (i.e. no a-priori solution). Moreover, the algorithm can be implemented in "Massive Parallel Computation" with a GPU card. In Table 1, a comparison of computation rates (Msubset/hour and subset/s) was made using GPU and CPU implementations for a subset dimension of 32×32 pixels². This method was implemented in a software (XCorrel) using a simple graphical interface as in classical DIC software.

A first comparison is proposed using one Heaviside function ($k=1$). It allows analyzing problems with a single crack in a subset. In a second time, the crack

crossing problem is studied using a description with two Heaviside functions ($k=2$).

Testing Conditions

As in other works [11], synthetic images were created from different widths of speckle grains, wherein each speckle grain was defined by a half cosine function (Fig. 2(a)). To accommodate the integration phenomenon of the charge-coupled device (CCD) camera, the initial images were created with a dimension of $3,200 \times 3,200$ pixels², a displacement was applied to these images, and then, the final images of 320×320 pixels² were generated by sub-sampling (Fig. 2(b)). Each pixel of the final images was calculated by averaging 10×10 pixels² of the initial pixels such that a displacement of one pixel is equivalent to 0.1 pixel in the final image. This classical procedure offers a good comparison between algorithms even if it is far from experimental conditions.

To evaluate the quality of the results, the classical local error indicator Φ was employed [24] and described as follow:

$$\Phi^2 = [F(x,y) - G(x^*,y^*)]^2 \tag{6}$$

A pseudo strain indicator $\langle \epsilon \rangle$ was calculated for crack detection evaluations and it was defined as a strain in the spirit of Tresca [24]:

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{|\langle \epsilon_1 \rangle - \langle \epsilon_2 \rangle|}{2} \tag{7}$$

where ϵ_1 and ϵ_2 are the principal strains calculated from the displacements field using finite differences between neighborhood subsets.

To show both resolution and spatial resolution at the same time (see Figs. 3 and 4), Δu and Δv errors (root mean square: RMS) were calculated by comparing the actual displacement value to the calculated displacement at the center of the subset using:

$$\Delta u = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (u_r - u_c)^2} \quad \text{and} \quad \Delta v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (v_r - v_c)^2} \tag{8}$$

where n is the number of pixels along the y axis of the image, u_r and u_c are respectively real and calculated displacements for opening Mode I, v_r and v_c are respectively real and calculated displacement, for sliding Mode II.

To evaluate the effect of subset sizes, Δu and Δv errors were calculated on two zones using eq. 8, where n is the number of pixels on each zone (see Fig. 5).

U and V are respectively the perpendicular and parallel displacement jumps at the discontinuity. Last, all results are calculated using a grid step equal to 1 pixel.

Table 1 Comparison of computation rates vs. implementation for various algorithms

Implementation	Algorithm	Computation rate (Msubsets/hour)	Computation rate (subsets/second)
GPU (2688 cores)	Classical DIC	11.3	3140
	H ¹ -DIC	6.2	1720
	H ² -DIC	4	1110
CPU (1 core)	Classical DIC	0.1	30



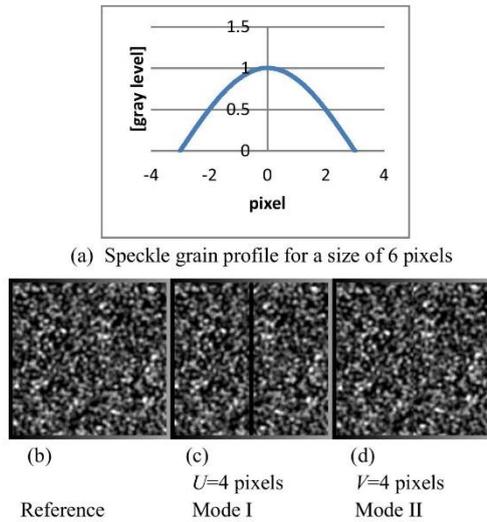


Fig. 2 Simulated images for speckle grain size equal to six pixels, **a**) speckle grain profile, **b**) reference image, **c**) image obtained using a displacement of four pixels representing a mode I, **d**) image obtained using a displacement of four pixels mimicking a mode II

H¹-DIC Evaluations on a Single Crack

For Different Discontinuity Jumps

To quantify the accuracy of each method, the synthetic images corresponding to Fig. 2 were chosen. It was corresponding to a sliding Mode II (Fig. 2(c)) and an opening Mode I (Fig. 2(d)) analyzed with a subset dimension equal to 32×32 pixels².

It was proposed to compare the classical DIC algorithm, defined by equations (1) and (2), and the H¹-DIC procedure represented by equations (1) and (3). For this last, k equal to one was chosen.

Figure 3 (a) and (b) show the evolution of the measurement error for a sliding mode (Mode II) and for parallel displacement jumps V , varying between 0.2 and 2.0 pixels. In these plots, the constant values of errors from each side of the discontinuity (zones 1) can be observed. These different values illustrate the evolution of the well-known systematic errors of the DIC algorithms [11, 25]. For Fig. 3 (a), the central region (zone 2) near the jump has a width equal to the dimension of the subset (32 pixels) and the error depends of the value of the jump V .

Figure 3(b) presents the results obtained using the H¹-DIC algorithm in the same conditions. The spatial resolution is equal to one pixel, and the resolution is equivalent to those

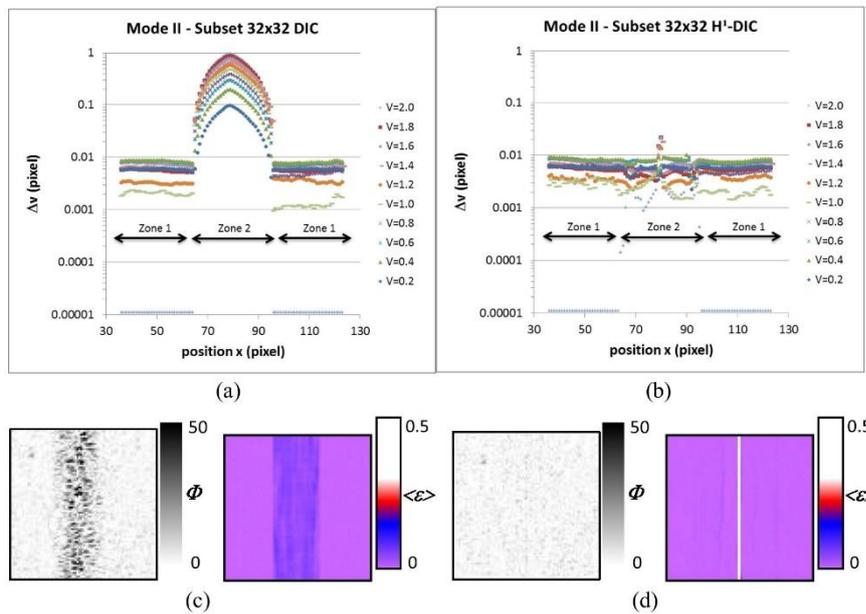


Fig. 3 Displacement errors Δv for a sliding Mode II, calculated using images with a subset of 32×32 pixels² and imposed displacement jumps of $0.2 \leq V \leq 2$ pixels, using **a**) the classical DIC algorithm, **b**) the H¹-DIC algorithm. Local error map ϕ in gray levels and pseudo strain map $\langle \epsilon \rangle$ for $V=1.2$ pixels using **c**) classical DIC algorithm, and **d**) H¹-DIC algorithm



obtained with the classical DIC algorithm out of the central region (zone 2).

Figure 3(c) and (d) give the contribution of the proposed algorithm for a chosen displacement jump V equal to 1.2 pixels in the case of a sliding Mode II. The local error map ϕ shows that the algorithm convergence is better using an appropriate kinematical field. And finally, the pseudo strain map, $\langle \epsilon \rangle$ demonstrates that using H^1 -DIC algorithm, data are valid near the jump. Moreover, the discontinuity is well retrieved.

Figures 4(a) and (b) give the evolution of the measurement error for an opening mode (mode I) and for perpendicular displacement jumps U , varying between 0.2 and 2.0 pixels. Errors from each side of the discontinuity (zones 1) have the same values than those obtained for the sliding mode. The central region near the jump (zone 2) has still a width equal to the dimension of the subset (32 pixels) and the error also depends of the value of the jump U . It can be observed that data near the jump (zone 2) are less accurate in this case comparatively to the sliding Mode II (Fig. 3(b)). This can be connected to the effect of the optical flow violation along the crack. This effect is generated by the appearance of new gray levels constituting the crack.

Figures 4(c) and (d) show the contribution of the proposed algorithm for a chosen displacement jump U equal to

1.2 pixels in the case of an opening Mode I. The local error map ϕ shows that the algorithm convergence is better using an appropriate kinematical field but less good than for the sliding mode. On Fig. 4(d), the effect of the optical flow violation can be better observed. However, the pseudo strain map $\langle \epsilon \rangle$ demonstrates that using H^1 -DIC algorithm, data are always valid near the jump.

With this first test, it can be concluded that the proposed algorithm gives results with the same quality than others specific developments [21–23].

For Different Subset Sizes

In a second test, it was proposed to evaluate the measurement errors for different subset sizes. However, in literature [11–25] it has been confirmed that, in a first order, random errors depend on the subset size and systematic errors depend on the gray level interpolation. To generate random errors, it was so necessary to create noisy images. New sets of synthetic images were generated, including a Gaussian noise of 10 % (25 gray levels). The applied noise was chosen different for initial and final images. Displacement jump was chosen equal to 1.2 pixels. Errors Δu and Δv were calculated using equation (8) on zones 1 and zones 2.

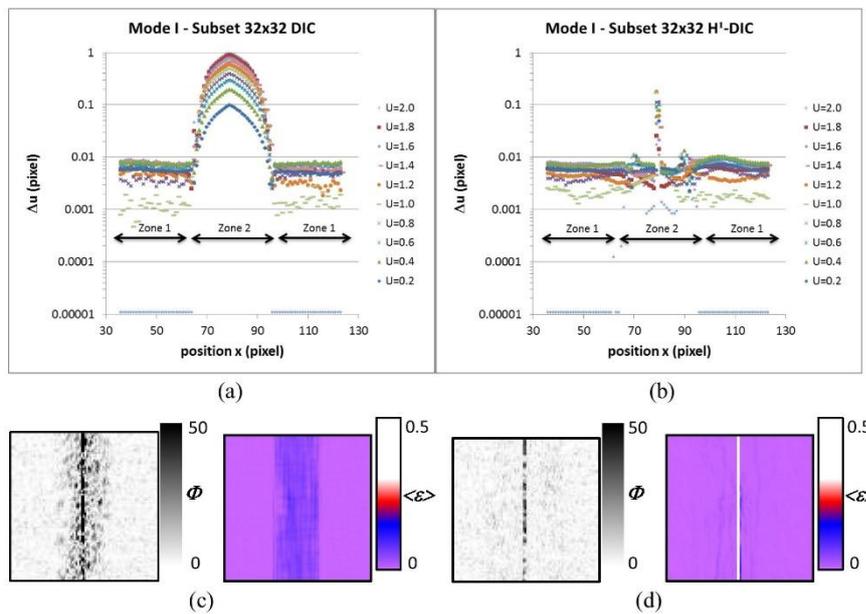
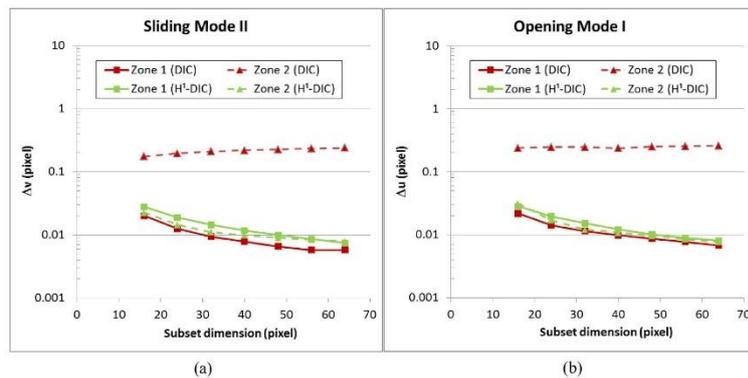


Fig. 4 Displacement errors Δu for an opening Mode II, calculated using images with a subset of 32×32 pixels² and imposed displacement jumps of $0.2 \leq U \leq 2$ pixels, using **a**) the classical DIC algorithm, **b**) the H^1 -DIC algorithm. Local error map ϕ in gray levels and pseudo strain map $\langle \epsilon \rangle$ for $U = 1.2$ pixels using **c**) classical DIC algorithm, and **d**) H^1 -DIC algorithm



Fig. 5 Displacement errors calculated from simulated images with 10 % noise, for different subset sizes and from two zones: Zone 1 far from the crack, and Zone 2 in the neighborhood of the crack. **a)** Δv is calculated for a sliding Mode II and a displacement jump $V=1.2$ pixels. **b)** Δu is calculated for an opening mode I and a displacement jump $U=1.2$ pixels



Figures 5(a) and (b) show average errors calculated from different subset size and for a sliding Mode II and an opening Mode I respectively. Zones 1 and zones 2 correspond to those defined in Figs. 3 and 4.

Globally, the errors are the same in opening Mode I and sliding Mode II. In zones 1, measurement errors show classical evolutions [11]. In presence of noise, H¹-DIC algorithm remains equivalent to DIC algorithm in zone 1, and is more accurate in zones 2 near the displacement discontinuity. Even if the noise is high, the robustness of the proposed algorithm is good.

For Different Discontinuity Orientations

A third test corresponding to a crack localization test was presented. In these cases, synthetic images were created generating in a single image, different crack orientations. To mimic a sliding Mode II on the final image, the initial one was rotated in one sense, and a rotation of the central part was applied in the other sense (Fig. 6(a)). The rotation angle was chosen equal to $\pm 0.23^\circ$, giving a displacement jump equal to 1.6 pixels along the crack.

Fig. 6 a) Simulated image mimicking a sliding Mode II: rotation angle equal to $\pm 0.23^\circ$. Displacements (u, v) in pixels, local error maps ϕ in gray levels and pseudo strain $\langle \epsilon \rangle$ using b) classical DIC analysis, and c) H¹-DIC analysis

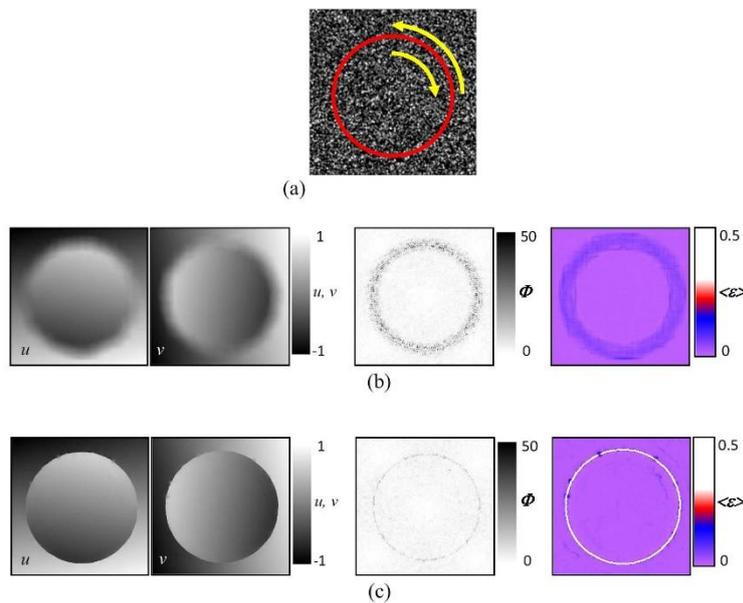
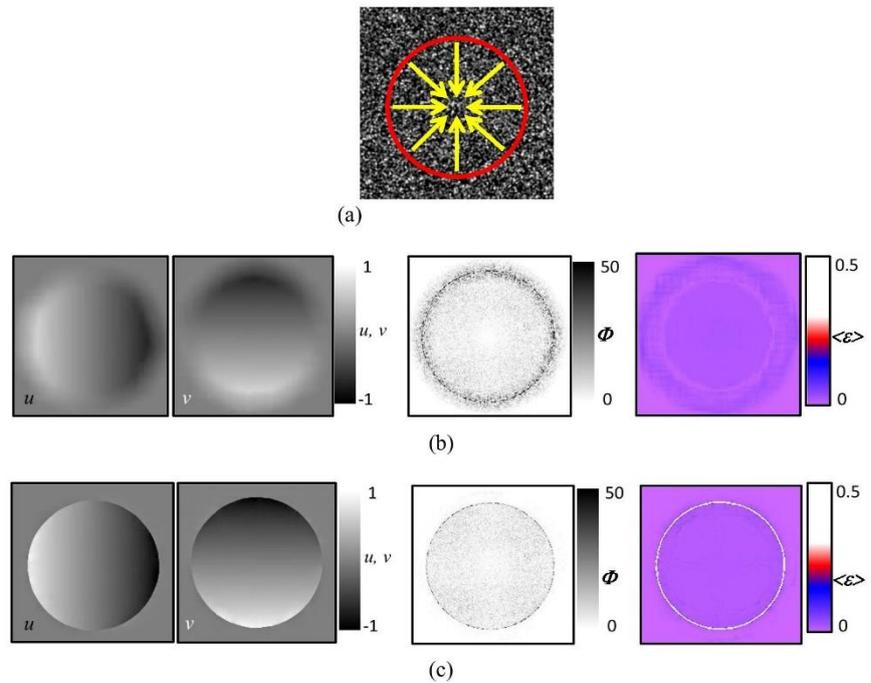


Fig. 7 a) Simulated image mimicking an opening Mode I : radial strain equal to 2 %. Displacements (u, v) in pixels, local error maps Φ in gray levels and pseudo strain $\langle \varepsilon \rangle$ using b) classical DIC analysis, and c) H^1 -DIC analysis



Figures 6(b) and (c) show the calculated displacement maps and confirm the good performances of the H^1 -DIC algorithm comparatively to classical one. The residual error map Φ is plotted and confirms the excellent performances of the algorithm in retrieving the crack position contrarily to classical DIC algorithm. The crack localization can be appreciated on pseudo strain map $\langle \varepsilon \rangle$ and follows the imposed circular shape.

To mimic an opening Mode I on the final image, a radial strain of 2 % was applied on the central part of the initial image (Fig. 7(a)), giving a maximal displacement jump equal to 1.6 pixels.

On Fig. 7(b) and (c), the conclusions obtained for the sliding mode can be retrieved: The algorithm convergence is ensured and the position of the crack is well determined contrarily to the classical DIC algorithm.

In these test, the H^1 -DIC algorithm appears to be an appropriate procedure to analyze a kinematic field with one crack in the subset. However, in these preliminary tests, the simulated kinematic fields correspond to those included in the formulation of the H^1 -DIC algorithm. It would be interesting to examine what occurs when the kinematic field is not simulated with a single straight line crack but when two cracks are present in the observed field. Observations on fractured materials illustrate that the common case found after a single crack, is the intersection of cracks. It was proposed to simulate this case and to investigate how the DIC algorithms can operate in this situation.

H^1 -DIC and H^2 -DIC Evaluations on a Crossing Crack

To mimic the case of multiple cracks in a subset, it was proposed to simulate images with more than one discontinuity. Three zones were created with two of them having an imposed displacement indicated with red arrows in Fig. 8(a). One part of this structure can be mechanically considered as a mixed mode of fracture. For these tests, the subset dimension was chosen to be 32×32 pixels² and the imposed displacement was fixed to 0.8 pixel (maximum of each component).

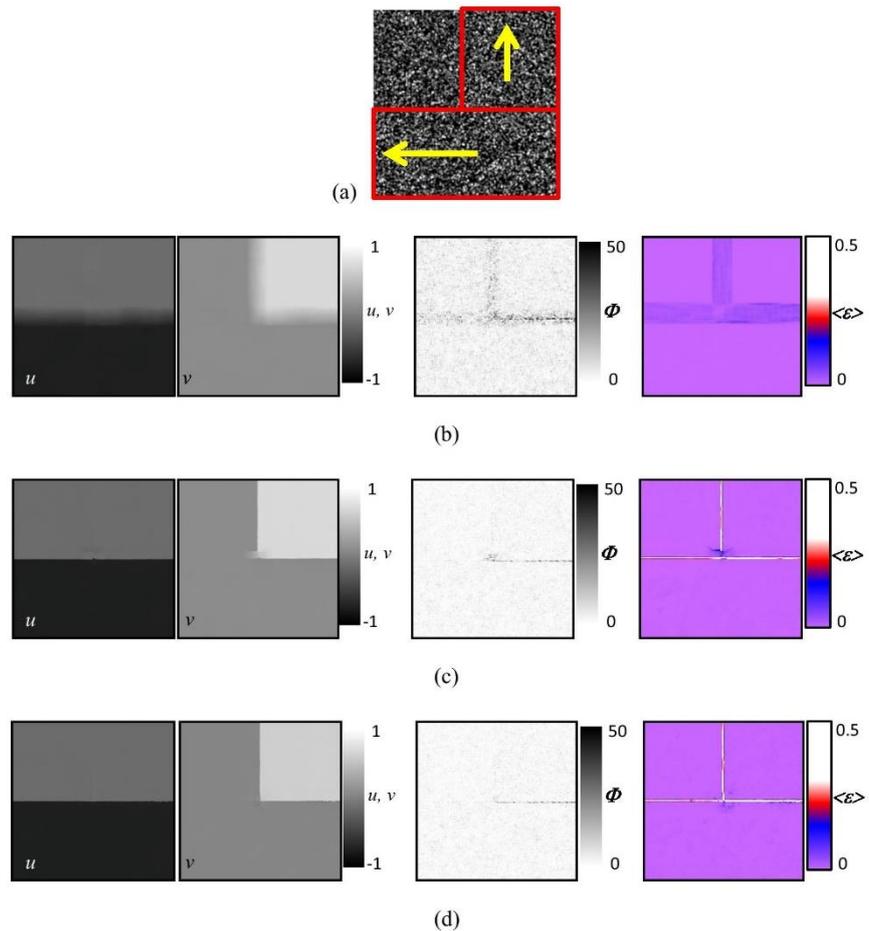
A comparison was proposed between the classical DIC, H^1 -DIC and H^2 -DIC algorithms. For this last, the kinematical representation of the displacement field is still represented by equation (3), where the problem of crossing cracks can be solved using $k=2$. Heaviside functions H_1 and H_2 are so defined to represent the kinematical jumps along two straight lines. The combination of two Heaviside functions allows for the representation of up to four kinematical jumps in a subset.

Figure 8(b) illustrates that the classical DIC algorithm is unsuitable for observing multiple cracks and measuring the displacements around the cracks. It can be retrieved that the local error indicator (Φ) is less efficient when the displacement jump is subpixel [24]. The pseudo strain map $\langle \varepsilon \rangle$ gives undetectable displacement jumps.

Figure 8(c) shows the performances of the H^1 -DIC method. It can be observed that a very good calculation is obtained for the vertical and horizontal displacement discontinuity edges.



Fig. 8 a) Simulated image mimicking a crack crossing: imposed displacement equal to ± 0.8 pixel. Displacements (u, v) in pixels, local error maps Φ in gray levels and pseudo strain $\langle \epsilon \rangle$ using b) classical DIC analysis, c) H^1 -DIC analysis, and d) H^2 -DIC analysis



However, the H^1 -DIC kinematical model cannot retrieve the actual displacement field when the discontinuity crossing is in the subset. The local error map Φ shows some errors along the discontinuity corresponding to the mixed mode (opening and sliding). It can be explained by the opening of the crack lips, generating black pixels in the final image. However, the vertical displacement map v and the pseudo strain map $\langle \epsilon \rangle$ illustrate that H^1 -DIC method is unable to retrieve displacement at the crack crossing.

The performances of the H^2 -DIC algorithm are presented in Fig. 8(d). Local error map Φ don't show differences in comparison to the H^1 -DIC, confirming that in these two cases, minimization is ensured. The vertical displacement map v and the pseudo strain map $\langle \epsilon \rangle$ illustrate the improvement of the discontinuity localization. Displacements are better calculated on the crack intersections using H^2 -DIC procedure. This test exhibits that H^2 -DIC algorithm is necessary to treat data issued from the crossing of two cracks.

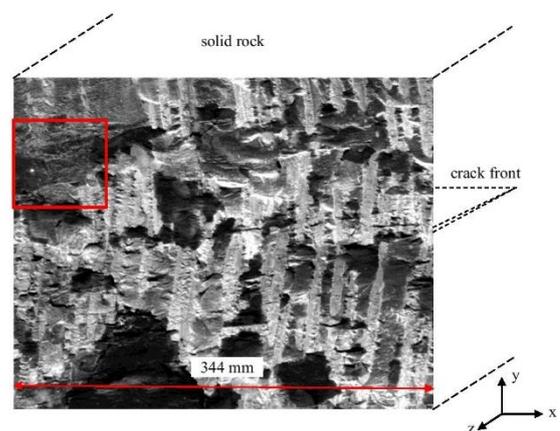
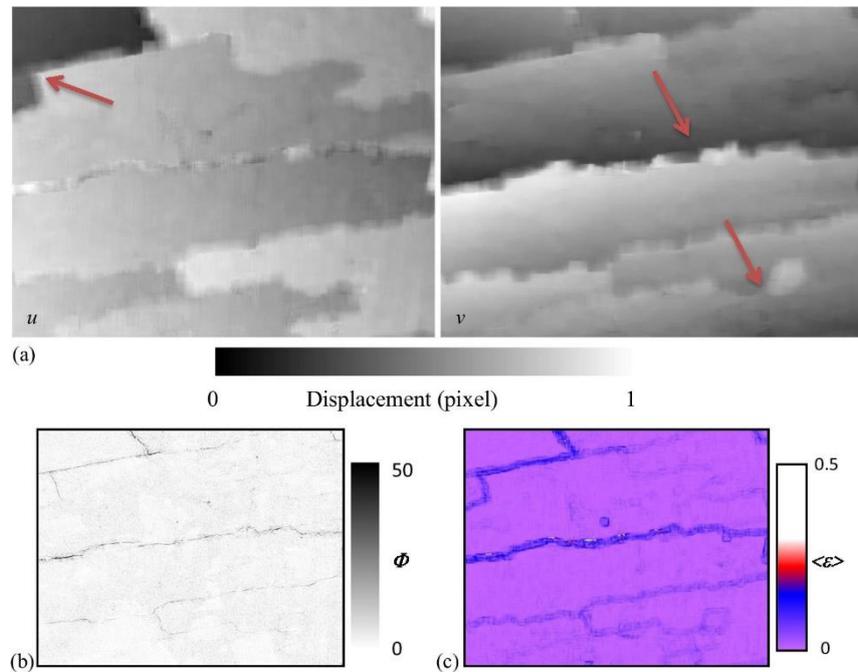


Fig. 9 Image of the East96 gallery front at the Tournemire experimental station having a natural texture and the localization of the crack front. Red square defines the zone where the presented mechanical analysis is made



Fig. 10 Results obtained using classical DIC procedure. **a)** Displacements (u , v) calculated with the classical DIC algorithm. **b)** Local error map Φ in gray level. **c)** Pseudo strain map $\langle \epsilon \rangle$. *Red arrows* represent some interesting details



Application to Argillite Rock Fracture

As the DIC method is a powerful tool that allows for the measurement of displacement fields without contact, many applications of this method have been published along with an increasing number of reports on the analyses of rock materials [26–30]. In this study, each DIC algorithm presented is compared in the context of fractured clay rocks. DIC was used for the first time in an underground gallery to monitor the desiccation cracks during annual climatic cycles (from March 2011 to present). This experimental *in situ* investigation was carried out on a study area of $344 \times 275 \text{ mm}^2$, located on the East96 gallery front at the Tournemire experimental station [31], during which the relative humidity (RH) and temperature (T) were measured continuously. Clay rocks are considered in several industrial countries as potential repositories for high-level radioactive wastes. Among the critical issues related to the long-term safety assessment of such geological repositories, the study of the so-called excavation damaged zone (EDZ) is of particular importance. The initiation and extension of the EDZ are governed by many parameters [32–34], such as the material properties of the rock (e.g., material anisotropy), the initial stress field, the existence of natural fracture zones in the rock mass, the geometry of the gallery, and the hydric state existing in the gallery. With regard to the hydric state in the gallery, fractures associated with the desaturation of argillaceous medium have been observed on gallery fronts in several underground research laboratories, e.g., in the experimental

platform at Tournemire [35, 36] and in the Mont Terri laboratory [37]. This hydric fracturing process is evidenced *in situ* by sub-horizontal cracks spaced at several decimeters on all vertical walls in contact with the ambient air. The corresponding crack openings can reach a few millimeters in winter (dry state), whereas these cracks are closed in summer (wet state). These cracks are induced by drying and are parallel to the bedding planes, suggesting that they are partially controlled by sedimentological patterns (e.g., vertical differences in sediment granulometry and/or mineral composition). The changes in the crack openings calculated from the displacement fields and the strain fields were clearly correlated and concomitant with changes in RH and T (with $25\% < \text{RH} < 99\%$ and $6^\circ\text{C} < \text{T} < 14^\circ\text{C}$) in the gallery [29]. Moreover, although the main desiccation cracks were sub-horizontal and associated with the direction of bedding planes, the displacement fields demonstrated the existence of sub-vertical cracks [29]. These two types of desiccation cracks are connected (i.e. presence of crack crossings). Globally, the understanding of the 3D hydric exchange requires the measurement of large volume, but also an accurate determination of crack lengths and crack openings. It can be noticed that only full field displacement measurements can give sufficient data to tackle this problem. In-plane experimental displacements (u , v) at a gallery front in the experimental platform of Tournemire can be obtained and the study surface corresponds to the surface orthogonal to the crack propagation (i.e. gallery front in contact with the ambient air) (Fig. 9).



Experimentally, it was impossible to mark the surface of the material because it contributes to the exchange of water. The natural roughness of material has been used as natural speckle and allows the DIC method to be employed. The three algorithms presented in this paper (classical DIC, H^1 -DIC, and H^2 -DIC) were used to compare their performances on this real case. For these comparisons, two images were selected at $t_0=0$ and $t=t_0+1$ month. All these conditions validate the requirement of using new DIC algorithms (H^1 -DIC and H^2 -DIC). The initial image size is $1,280 \times 1,024$ pixels² (Fig. 9), and calculations are made every pixels, thus yielding a resulting image of $1,240 \times 984$ data. The magnitude of the image is equal to 0.269 mm/pixel, and the subset size is 40×40 pixels².

Figure 10 presents the displacement maps (u, v) calculated using the classical DIC algorithm. The accuracy of the calculations is high (in regions outside of the cracks). However, the local error map (Φ) and the pseudo strain map ($\langle \epsilon \rangle$) show that the discontinuities are not retrieved. The red arrows indicate some crossing crack localizations which are undetectable with this algorithm. The classical DIC method is not appropriate for performing measurements in the presence of single and multiple cracks.

Figure 11 presents the same results obtained using H^1 -DIC algorithm. It can be observed on all maps that the noise is still low (u, v), the convergence is ensured (Φ), and globally the cracks are retrieved ($\langle \epsilon \rangle$). However, all the details (red arrows) illustrate the crack localization problems encountered

when H^1 -DIC algorithm has to analyze crossing cracks. These results demonstrate that this method is not well adapted to treat the problem of multiple cracks in the subset, even for a real case.

Figure 12 shows the results obtained from the displacement calculation using the proposed H^2 -DIC algorithm. These results show excellent localization of the cracks with high global accuracy. Moreover, it can be seen that the displacement jumps have been retrieved at the crack crossings.

Figure 13 presents displacement profiles, orthogonal to the cracks when a crack crossing is in the subset. The previous conclusions can be retrieved; H^1 -DIC algorithm can capture only one discontinuity and H^2 -DIC algorithm can measure the displacements at the neighborhoods to the cracks and in presence of a crack crossing in the subsets. Classical DIC algorithm gives a crack opening underestimation higher than 30 % because maximum displacements along the crack cannot be reached (Fig. 13(b)). Moreover, it does not allow estimating the location of the sub-vertical crack (Fig. 13(a)). The crack length measurement with H^1 -DIC is also underestimated (5 % on observed field) and cannot be evaluated using a classical DIC algorithm.

On these plots, two displacement gradients can be observed perpendicularly to sub-horizontal cracks (Fig. 13(b)); the first, placed beyond 25 pixels from cracks, corresponds to data observed in the previous study [29]. The second, near the

Fig. 11 Results obtained using H^1 -DIC algorithm. **a**) Displacements (u, v) calculated with the classical DIC algorithm. **b**) Local error map Φ in gray level. **c**) Pseudo strain map $\langle \epsilon \rangle$. Red arrows represent some interesting details

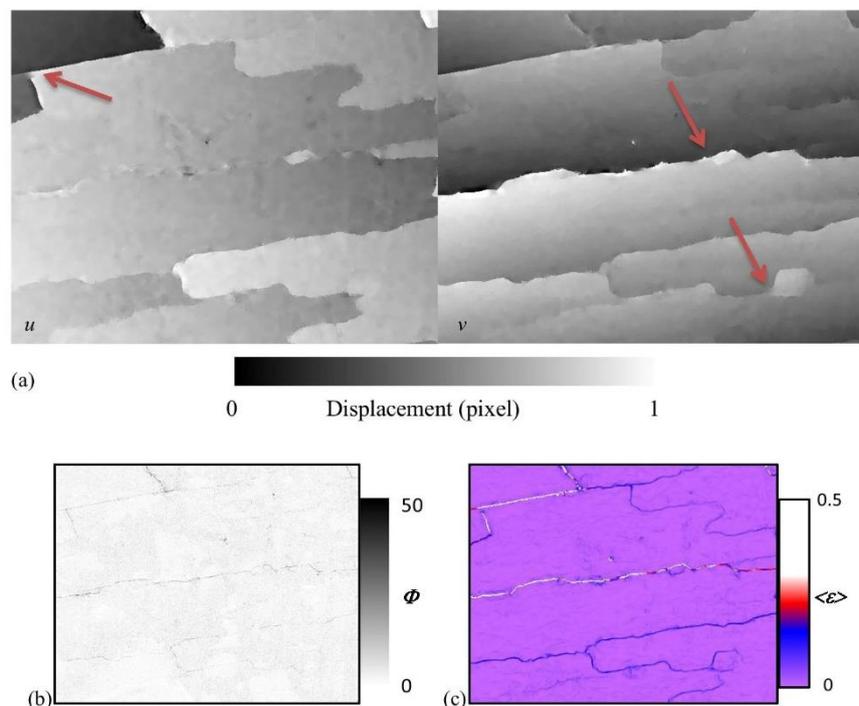
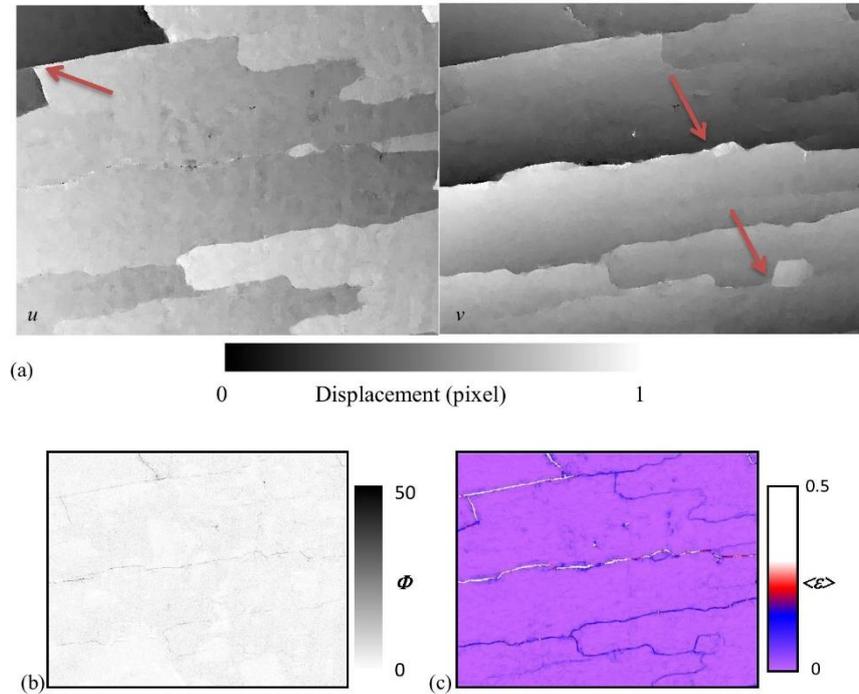


Fig. 12 Results obtained using H^2 -DIC algorithm. **a)** Displacements (u, v) calculated with the classical DIC algorithm. **b)** Local error map Φ in gray level. **c)** Pseudo strain map $\langle \epsilon \rangle$. Red arrows represent some interesting details



crack (within 25 pixels from cracks) gives higher values. The hydric exchange of the crack lips can explain the increasing of the strain near the crack. For the proposed example with a natural speckle, the resolution can be estimated equal to 0.05 pixel, given a resolution near 1/100 mm.

Figure 14 shows the evolution of temperature (T), relative humidity (RH) and the crack aperture of three cracks (two sub-horizontal cracks indexed 1 and 2 (black and red plots, respectively) and one sub-vertical crack (green plot) during seven months (middle of summer to middle of winter). Sub-

horizontal crack openings are calculated by subtracting the v displacements on both sides of each crack, and by averaging these openings along the crack. Sub-vertical crack openings are obtained by the same way, using u displacements. It can be retrieved results of the previous works on clay material in gallery [29]. Sub-horizontal and sub-vertical cracks globally follow the variations of RH and T. Moreover, the evolution of the major sub-horizontal crack (called sub-horizontal 1) and sub-vertical crack is more pronounced: these cracks are closed in summer and their openings are continuous during winter.

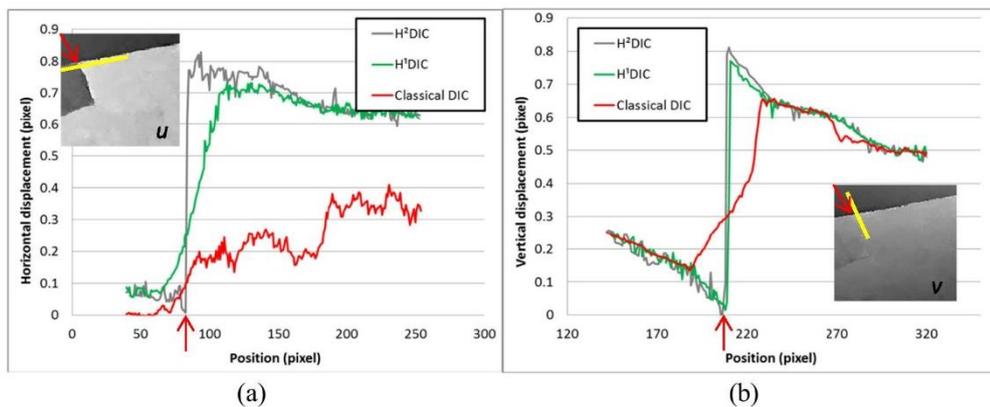
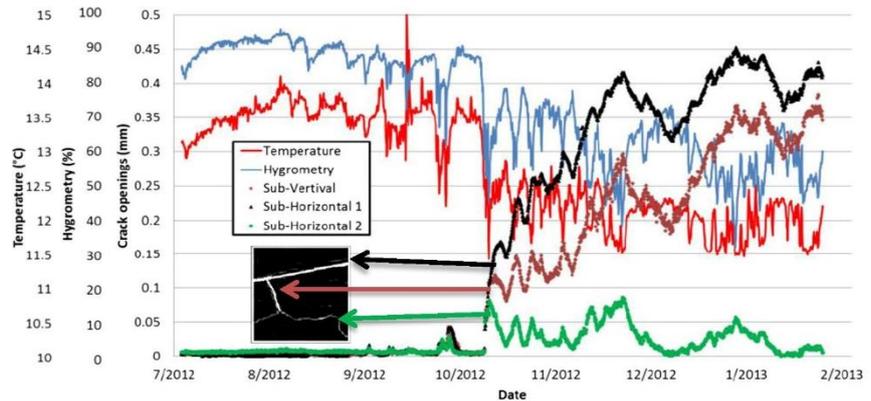


Fig. 13 **a)** Horizontal displacements and **b)** vertical displacements calculated at a crack crossing for each algorithm. Yellow lines represent the position of plotted data. Red arrows show the crack crossing position in pixel (81,210)



Fig. 14 Sub-horizontal and sub-vertical crack opening, hygrometry and temperature evolutions versus to the time. Localization of the considered cracks on the pseudo strain map $\langle \epsilon \rangle$



However, some smaller sub-horizontal cracks (called sub-horizontal 2), not observable in the previous works using a multi-scale DIC algorithm [29], show a different behavior than the major ones: contrary to the major sub-horizontal cracks, these minor sub-horizontal cracks could be closed in winter (compare the evolution of major sub-horizontal crack 1 to that of minor sub-horizontal crack 2 in Fig. 14). These differences put in evidence the complexity of behavior and the structure of the argillite and the interpretation of these experimental dataset has emphasized the need for a mechanical multi-scale approach to understand the desiccation cracking mechanisms. These results show the advantages using this new algorithm (H^k -DIC), allowing the measurement of large fields, and giving more accurate data.

These tests have demonstrated that the Heaviside-based DIC methods are very well adapted to the case of fracture analysis. And in the case of field measurements in presence of multiple cracks, the proposed H^2 -DIC algorithm is necessary to retrieve displacements near the crack crossings.

Conclusion

After having recalled the principles of the DIC measurement method, it was applied to analyze displacement in the presence of cracks. The authors proposed to develop a novel algorithm (Heaviside-based DIC) based on a local approach (subset base), and to analyze their performances comparing to a classical DIC algorithm. For that, an evaluation process based on synthetic images and on classical indicators was proposed. The first tests related to single crack detection, for different discontinuity jumps values, different crack orientations and different subset sizes. A second test was proposed and concerned the case of crossing cracks. The H^1 -DIC method has shown its accuracy for single crack localization but it

was insufficient to retrieve the crossing of cracks. Therefore, it was proposed to use a more adapted version of the H^1 -DIC method, the H^2 -DIC, to address crossing cracks. The H^2 -DIC algorithm was based on a displacement field including two Heaviside functions, modulated by two jump vectors. This kinematical representation authorized the displacement field to represent two cracks in the subsets. A first test on a simulated example was presented and exhibits good efficiency of the H^2 -DIC method to extract the displacement fields at the neighborhood of cracks, whereas the results far away from the cracks were not affected. Then, an actual case was presented illustrating the performance of each algorithm. The experimental study considered argillaceous medium because this material presents crossing sub-horizontal and sub-vertical cracks. Classical DIC, H^1 -DIC, and H^2 -DIC methods were compared. In this experimental case, all previous conclusions have been retrieved for each method. The efficiency of the H^1 -DIC and H^2 -DIC algorithms has been shown, and the requirement of the particular H^2 -DIC algorithm to perform measurements in presence of multiple cracks and crack crossings has been demonstrated. A particular application was treated; the measurement of full field displacement on fractured argillite rock was shown. Last, the evolution of sub-horizontal and sub-vertical cracks can be plotted with the evolution of the temperature and the relative humidity, to exhibit their relations. The proposed development demonstrates its efficiency to localize some sub-pixel cracks and to provide more accurate and more local information.

Acknowledgments The authors would like to express their gratitude to the national program NEEDS (Nucléaire, Energie, Environnement, Déchets, Société) and the French Institute for Nuclear Safety and Radioprotection (IRSN) for supporting and funding this work.

This work pertains to the French Government program “Investissements d’Avenir” (LABEX INTERACTIFS, reference ANR-11-LABX-0017-01)



References

- Pfaff RD et al (1995) An interpretation of Twyman-Green interferograms from static and dynamic fracture experiments. *Int J Solids Struct* 32:939–955
- Picart P, Diouf B, Lolive E, Berthelot J-M (2004) Investigation of fracture mechanics in resin concrete using spatially multiplexed digital Fresnel holograms. *Opt Engng* 43(5):1169–1176
- Dubois F, Méité M, Pop O, Absi J (2012) Characterization of timber fracture using the digital image correlation technique and finite element method. *Eng Fract Mech* 96:107–121
- Hedan S, Valle V, Cottron M (2011) Calculation of J-integrals using experimental and numerical data: influences of ratio (a/W) and the 3D structure. *Eng Fract Mech* 78(9):1976–1985
- Yoneyama S, Ogawa T, Kobayashi Y (2007) Evaluating mixed-mode stress intensity factors from full-field displacement obtained by optical methods. *Eng Fract Mech* 74:1399–1412
- Mauroux T, Benboudjema F, Turcry P, Aït-Mokhtar A, Deves O (2012) Study of cracking due to drying in coating mortars by digital image correlation. *Cem Concr Res* 42(7):1014–1023
- Sutton MA, Wolters WJ, Peters WH, Ranson WF, McNeill SR (1983) Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image Vision Comput* 1(3):133–139
- Cheng P, Sutton MA, Schreier HW, McNeill SR (2002) Full-field speckle pattern image correlation with B-spline deformation function. *Exp Mech* 42(3):344–352
- Bruck HA, McNeill SR, Sutton MA, Peters WH (1989) Digital image correlation using newton–raphson method of partial differential correlations. *Exp Mech* 29:261–267
- Hild F, Raka B, Baudequin M, Roux S, Cantelaube F (2002) Multi-scale displacement field measurements of compressed mineral wool samples by digital image correlation. *Appl Opt* 41(32):6815–6828
- Bornert M, Brémand F, Doumalin P, Dupré J-C, Fazzini M, Grédiac M, Hild F, Mistou S, Molimard J, Orteu J-J, Robert L, Surril Y, Vacher P, Wattrisse B (2009) Assessment of digital image correlation measurement errors: methodology and results. *Exp Mech* 49(3):353–370
- Gonzalez J, Knauss WG (1998) Strain inhomogeneity and discontinuous crack growth in a particulate composite. *J Mech Phys Solids* 46(10):1981–1995
- Chao YJ, Luo PF, Kalthoff JF (1998) An experimental study of the deformation fields around a propagating crack tip. *Exp Mech* 38(2):79–85
- Helm J (2008) Digital image correlation for specimens with multiple growing cracks. *Exp Mech* 48:753–762
- McNeill SR, Peters WH, Sutton MA (1987) Estimation of stress intensity factor by digital image correlation. *Eng Fract Mech* 28(1):101–112
- Sutton MA, Helm JD, Boone ML (2001) Experimental study of crack growth in thin sheet 2024-T3 aluminum under tension-torsion loading. *Int J Fract* 109:285–301
- Wei Z, Deng X, Sutton MA, Yan J, Cheng CS, Zavattieri P (2011) Modeling of mixed-mode crack growth in ductile thin sheets under combined in-plane and out-of-plane loading. *Eng Fract Mech* 78(17):3082–3101
- Fagerholt E, Børvik T, Hopperstad OS (2013) Measuring discontinuous displacement fields in cracked specimens using digital image correlation with mesh adaptation and crack-path optimization. *Opt Lasers Eng* 51(3):299–310
- Grégoire D, Maigre H, Morestin F (2009) New experimental techniques for dynamic crack localization. *Eur J of Comput Mech, Revue Eur de Mécanique Numérique* 18(3–4):255–283
- Réthoré J, Hild F, Roux S (2008) Extended digital image correlation with crack shape optimization. *Int J Numer Methods Eng* 73(2):248–272
- Jin H, Bruck HA (2005) Pointwise digital image correlation using genetic algorithms. *Exp Tech* 29:36–39
- Poissant J, Barthelat F (2010) a novel subset splitting procedure for digital image correlation on discontinuous fields. *Exp Mech* 50:353–364
- Réthoré J, Roux S, Hild F (2007) From pictures to extended finite elements: extended digital image correlation (X-DIC). *C R Mec* 335:131–137
- Réthoré J, Roux S, Hild F (2007) Shear-band capturing using a multiscale extended digital image correlation technique. *Comput Methods Appl Mech Engng* 196:5016–5030
- Sutton MA, McNeill SR, Jang J, Babai M (1988) Effects of subpixel image restoration on digital correlation error estimates. *Opt Eng* 27(10):870–877
- Yang D, Bornert M, Chanchole S, Wang L, Valli P, Gatmiri B (2011) Experimental investigation of the delayed behavior of unsaturated argillaceous rocks by means of digital image correlation techniques. *Appl Clay Sci* 54(1):53–62
- Hédan S, Cosenza P, Valle V, Dudoignon P, Fauchille AL, Cabrera J (2012) Experimental investigation of the damage process induced by desiccation and heating in toumemire argillite using digital image correlation. *Int J of Rock Mech and Min Sci*, A 51:64–75
- Zhang H, Huang G, Song H, Kang Y (2012) Experimental investigation of deformation and failure mechanisms in rock under indentation by digital image correlation. *Eng Fract Mech* 96:667–675
- Hédan S, Fauchille AL, Valle V, Cabrera J, Cosenza P (2014) One-year monitoring of desiccation cracks at Tournemire experimental station using Digital Image Correlation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 68:22–35
- Bésuelle P, Desrues J, Raynaud S (2000) Experimental characterisation of the localisation phenomenon inside a Vosges sandstone in a triaxial cell. *Int J of Rock Mech and Min Sci* 37(8):1223–1237
- Tournemire experimental station, Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire (IRSN), <http://www.irsn.fr/en/research/scientific-tools/experimental-facilities-means/Tournemire/Pages/TOURNEMIRE-experimental-station.aspx>
- Blümling P, Bernier F, Lebon P, Martin CD (2007) The excavation-damaged zone in clay formations - time-dependent behaviour and influence on performance assessment. *Phys Chem Earth* 32:588–599
- Bossard P, Meier MP, Moeri A, Trick T, Major JC (2002) Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the opalinus clay of the Mont Terri rock laboratory. *Eng Geol* 66(1–2):19–38
- Tsang CF, Bernier F, Davies C (2005) Geohydrummechanical processes in the excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays - in the context of radioactive waste disposal. *Int J of Rock Mech and Min Sci* 42(1):109–125
- Cabrera J, Beaucaire C, Bruno G, De Windt L, Genty A, Ramambaoa N, Rejeb A, Savoye S, Volant P (1995/1999) *Projet Tournemire : Synthèse des Résultats des Programmes de Recherche 1995/1999*. IRSN Report;2001
- Matray JM, Savoye S, Cabrera J (2007) Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire’s argillite (Aveyron, France). *Eng Geol* 90:1–16
- Möri A, Bossart P, Matray JM, Franck E, Fatmi H, Ababou R (2010) Mont Terri Project: cyclic deformations in the Opalinus Clay. In: *proceedings of the International Meeting of Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinements*, Nantes p 103–124





Contents lists available at ScienceDirect

Applied Clay Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/clay

Research paper

Multi-scale study on the deformation and fracture evolution of clay rock sample subjected to desiccation

Anne-Laure Fauchille ^a, Stephen Hedan ^{a,*}, Valéry Valle ^b, Dimitri Pret ^a, Justo Cabrera ^c, Philippe Cosenza ^a^a Université de Poitiers, CNRS UMR 7285 IC2MP, HydrASA, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de POITIERS, Bât B27-TSA 51106, 4, rue Michel Brunet, 86073 POITIERS CEDEX 9, France^b Université de Poitiers, CNRS UPR 3346 Institut PPRIME, S.P. 2 M.L., Bd. M. et P. Curie, Téléport 2, B.P. 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France^c DEL-SARG Department, Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, B.P. 17, 92262, Fontenay-aux-Roses Cedex, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 September 2015

Received in revised form 27 January 2016

Accepted 30 January 2016

Available online 4 July 2016

Keywords:

Desiccation cracks

Clay minerals

Hydric strains

Tournemire argillite

Digital image correlation

Multi-scale study

ABSTRACT

The aim of this paper is to compare and discuss the values of strains and crack apertures associated with desiccation cracks measured in Tournemire clay rock at different scales (micrometer to decimeter). Experimental investigations in the laboratory were conducted on one clay rock sample subjected to a desiccation process. Two faces with dimensions of $20 \times 20 \text{ mm}^2$ (i.e., macroscopic scale) and $5.1 \times 4.1 \text{ mm}^2$ (i.e., mesoscopic scale) were analyzed. The induced hydric strains and desiccation cracking were monitored by digital image correlation combined with a new algorithm (H-DIC). The results were compared with the data of Hedan et al. (2014) at the gallery scale (decimeter) and those of Wang et al. (2013) at the microscopic scale (micrometer).

Our laboratory study yielded the following phenomenological results. First, the displacement fields revealed the presence of sub-horizontal cracks associated with the direction of bedding planes and sub-vertical cracks, as previously observed in a gallery front in Tournemire Station. Second, when the relative humidity (RH) decreased between 98% and 33%, the crack aperture kinematics at the macroscopic scale (centimeter) was divided into three steps: (i) a phase of opening and closure, (ii) a phase of only gradual closure, and (iii) a final phase in which the desiccation cracks closed. Only phases (ii) and (iii) were observed at the mesoscopic scale (millimeter), revealing that the kinematics of cracks depends on the scale observed. The comparison of the strains at the mesoscopic and the macroscopic scales also highlights that their values depend on the study scale: the presence of cracks at the mesoscopic scale leads to a large overestimation of the values of the strains calculated at the macroscopic scale. In contrast to the observations in the laboratory, the desiccation cracks detected in the gallery systematically open when RH decreases. This difference and the differences observed in the geometrical organization of crack networks are explained by the different boundary conditions prevailing in both cases (i.e., free swelling/shrinkage in laboratory versus constrained swelling/shrinkage in the gallery).

The interpretation of the entire dataset emphasizes the need for a multi-scale approach to understand and model desiccation cracking mechanisms and the associated hydric strains in clay rocks.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

List of symbols

f	gray-level function
g	gray-level function
u	displacement in x direction
v	displacement in y direction
w	displacement in z direction
CF	correlation function
D	interval between two centers of subset
N	number of pairs of independent displacement measurements

RH	relative humidity
T	temperature
ΔW	averaged water content
d_n^c	mean aperture values
c	type of crack
n	number of cracks
ϵ_{is_sample}	in-plane mean strain as a qualitative indicator of the average volume variation of the sample
ϵ_{is_macro}	in-plane mean strain as a qualitative indicator of the average volume variation of the solid phase at the macroscopic scale
ϵ_{is_meso}	in-plane mean strain as a qualitative indicator of the average volume variation of the solid phase at the mesoscopic scale
ϵ_1	major principal strain
ϵ_2	minor principal strain
O_{ui}	displacement standard deviation

* Corresponding author.

E-mail address: stephen.hedan@univ-poitiers.fr (S. Hedan).

1. Introduction

Clay rocks have been considered as potential repositories for high-level radioactive wastes in several industrial countries. Among the critical issues related to the long-term safety assessment of such geological repositories, the study of the so-called excavation damaged zone (EDZ) is particularly important. The initiation and extension of the EDZ are governed by many parameters (Bossard et al., 2002; Tsang et al., 2005; Blüming et al., 2007) including the material properties of the rock, such as the material anisotropy; the initial stress field; the existence of natural fracture zones in the rock mass; the geometry of the gallery; and the hydric state in the gallery. With regard to the hydric state in the gallery, fractures associated with the desaturation of argillaceous medium have been observed on gallery fronts in several underground research laboratories, such as the experimental platform of Tournemire (Cabrera et al., 2001; Matray et al., 2007) and the Mont Terri Laboratory (Möri et al., 2010). This hydric fracturing process is evidenced in situ by sub-horizontal cracks spaced at several decimeters on all vertical walls in contact with ambient air. In winter (dry state), the corresponding crack apertures can reach a few millimeters, whereas these cracks are closed in summer (wet state). These sub-horizontal cracks induced by desiccation are parallel to the bedding planes, suggesting that they are partially controlled by sedimentological patterns (e.g., vertical differences in sediment grain size and mineral composition or organization). Recent studies have revealed other types of sub-horizontal desiccation cracks (Hedan et al., 2014; Valle et al., 2015) with a distance of approximately 64–100 mm and sub-vertical cracks (Hedan et al., 2014) connected to the sub-horizontal cracks with features identical to those of the sub-horizontal cracks. These observations of clay rock damage induced by drying have been obtained in the field using the digital image correlation (DIC) technique. At a much lower scale, Wang et al. (2013, 2014) applied the DIC algorithm directly on back-scattered electron images ($128 \times 111 \mu\text{m}^2$) from an environmental scanning electron microscope (ESEM). By means of this combination of ESEM and DIC techniques, the swelling/shrinkage and more generally the hydromechanical behavior of the Callovo-Oxfordian clay rock located in the Paris basin was investigated at the micrometer scale. Their observations revealed two micromechanisms. First, the local swelling or shrinkage is strongly anisotropic in the plane perpendicular to the bedding planes (with the major swelling direction normal to the bedding plane). Second, a complex network of microcracks with typical openings of approximately $1 \mu\text{m}$ was detected in both the wetting and drying paths. These microcracks were located in the bulk of the clay matrix and/or at quartz/carbonate inclusion–clay matrix interfaces (Wang et al., 2014).

However, these previous observations were all obtained at very different space scales, and the phenomenological links or causal relationships between them are unclear. The relationships between these observations acquired at different scales could facilitate the identification of the micromechanisms governing desiccation cracking.

Following this perspective, the main objective of this laboratory investigation was to design an original methodology for providing new observations and correlations between hydric strains, desiccation crack apertures and state variables (relative humidity (RH) and water content) at the millimeter and centimeter scales. These scales are rarely investigated in the context of clay rocks. This methodology is based on the combination of a new experimental setup and a new DIC algorithm (H-DIC). On the same sample, this combination allows the measurement of the kinematic field and patterns for the two considered scales (i.e., millimeter and centimeter scales). The results were compared with those previously obtained at the micrometer and gallery scales to provide physical constraints to improve the models and the understanding of desiccation cracking in clay rocks.

2. Geological setting and sampling

The clay rock sample we studied came from the Tournemire Underground Research Laboratory (URL) of the Institute for Radioprotection and Nuclear Safety (IRSN) in Aveyron, France. The Tournemire URL was excavated in a sub-horizontal consolidated argillaceous Toarcian formation (250 m thick) with marly layers (50 m thick) from the Domerian age, which compose a part of the Mesozoic basin located on the southern border of the French Massif Central (Bonin, 1998; Cabrera et al., 2001; Constantin et al., 2002). The sample comes from the upper Toarcian, corresponding to a 160-m-thick layer of argillite.

The mineralogical composition of the upper Toarcian formation shows that clay minerals (kaolinite, illite, and illite/smectite mixed-layer minerals) represent approximately 40 wt.% of the bulk-rock composition. The clay fraction is mainly composed of illite (5–15 wt.%), illite/smectite mixed-layer minerals (5–10 wt.%), chlorite (1–5 wt.%), and kaolinite (15–20 wt.%). The Tournemire argillite also contains 10–20 wt.% of quartz grains, 10–40 wt.% of carbonates (mainly calcite), and 2–7 wt.% of pyrite (Bonin, 1998; De Windt et al., 1998; Cabrera et al., 2001; Charpentier et al., 2004; Tremosa et al., 2012). The water content is between 3.5 and 4.0 wt.%.

Geomechanical investigations (Niandou et al., 1997; Cosenza et al., 2002) have demonstrated that Tournemire argillite is a transverse isotropic geomaterial.

Three different types of cracks are observed at the Tournemire experimental station (Cabrera et al., 2001; Matray et al., 2007; Okay et al., 2013):

- (i) fractures in the gallery walls induced by stress redistribution during excavation (millimeter-scale width and meter-scale extension);
- (ii) pre-existing tectonic fractures in the rock mass (same dimensions as the previous fractures, i.e., mm-scale width and m-scale extension); and
- (iii) networks of regularly spaced (at approximately 20 cm) sub-horizontal cracks parallel to the bedding planes. These sub-horizontal cracks, which are easily observed on the vertical walls of the Tournemire galleries, are each several decimeters deep with sub-millimeter apertures.

The set of sub-horizontal cracks is directly linked to seasonal variations in atmospheric properties (hygrometry and temperature) at the Tournemire experimental station and results from variations in the chemical potential of the interstitial solutions under wetting/drying cycles (Cabrera et al., 2001; Valès et al., 2004; Hedan et al., 2014).

The experimental investigation that focused on these cracks used a small sample ($2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$) of argillite core in an undisturbed state (i.e., taken far from the EDZ). The distance between the gallery wall and sample was 4.2 m (Fig. 1). The disturbed zone is up to 1.5 m deep (Matray et al., 2007), and thus the sample was taken from an undisturbed area. The drilling was performed with air to avoid any contact of the formation with any type of aqueous solution. After drilling, the core was immediately placed in an Al-coated plastic bag and removed from the FD90 borehole, which was drilled in 2010 perpendicular to the wall of the north gallery of the Tournemire URL. The FD90 borehole is sub-horizontal and parallel to the bedding planes (Fig. 1).

3. Experimental set-up and methods

3.1. Experimental set-up

The experimental set-up comprised a plastic waterproof box (Fig. 2a) in which the humidity and temperature conditions were controlled. RH was controlled by saline solutions, and the temperature

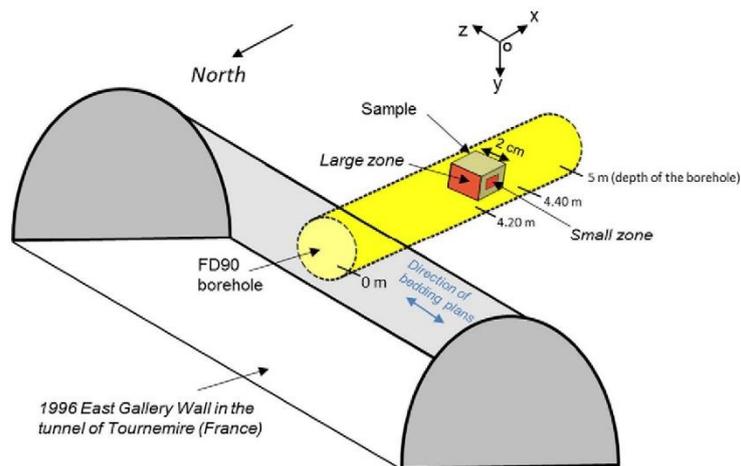


Fig. 1. Location and orientation of the sample in the FD90 borehole in the URL of Tournemire, France.

was controlled by an air-conditioning unit at 22 ± 1 °C. The box contained an RH/T sensor (Testo© 175H1, with a precision of $\pm 2\%$ and 0.3 °C for the RH and temperature, respectively), a precision balance (ADAM© PGW 753e; precision of ± 0.002 g) and a stirred saline solution. The solution was stirred with a programmable electric plug for 2 min every 15 min to preserve a constant temperature. Two cameras with a resolution of 5 Mp (2560×1920 pixels) acquired images ($0.5 \text{ image} \cdot \text{min}^{-1}$) with a spatial resolution of $2.2 \mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1}$ for the smaller zone (i.e., millimeter scale, hereafter referred to as the mesoscopic scale) and $10 \mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1}$ for the larger zone (i.e., centimeter scale, hereafter referred to as the macroscopic scale). These two zones were on two different sample faces (Fig. 2b). In clay rocks, the clay matrix and the coarse grains are visible at the mesoscopic scale but appear homogeneous at the macroscopic

scale (Robinet, 2008). A 400-W lamp lit the sample when the camera acquired images. To avoid heating induced by the lamp, the lamps were computer programmed to turn on only when the camera acquired a picture. The sample was saturated at RH of 98% before desaturation and was submitted to desiccation from 98% to 33% RH. The RH values of 98% and 33% correspond to similar extreme RH values observed in the tunnel of Tournemire (from 100% to 30%). The evolution of the RH inside the box is presented in Fig. 3. After desaturation from 100 to 33% RH, the sample was subjected to further desiccation at 5% RH with a saline solution of P_2O_5 in the waterproof box. The water content ΔW calculated in this paper is relative to the mass of the dry state at 5% RH. Oven drying was not possible because the sample was directly reused for scanning electron microscopy analysis (Fauchille et al., 2014; Fauchille, 2015).

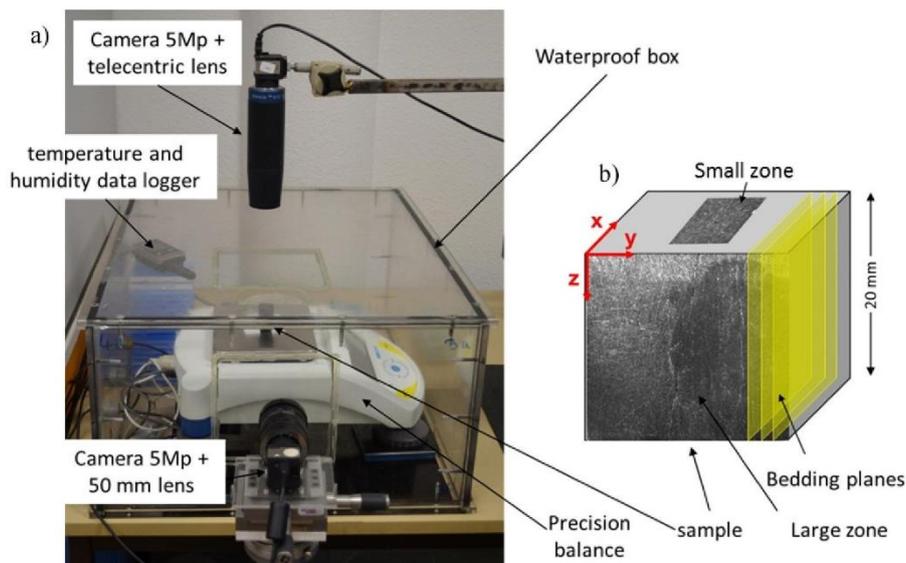


Fig. 2. a) Experimental set-up and b) location of the large and small zones on the sample.

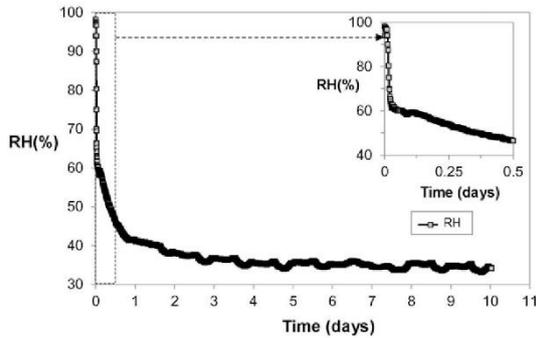


Fig. 3. Variation of RH versus time (days).

The advantage and novelty of this setup compared to previous studies are its ability to measure kinematic parameters on the same sample at two different spatial scales (in this case, the millimeter and centimeter scales).

3.2. Digital image correlation method

In geomechanics, the DIC technique (Sutton et al., 1983; Bruck et al., 1989) has been successfully used to observe strain localization in geomaterials (Desrués et al., 1985), detect crack positions and calculate crack openings in clay rocks (Hedan et al., 2012, 2014; Wang et al., 2013, 2014). The DIC technique has been used under various loadings (Bésuelle et al., 2006; Lenoir et al., 2007; Bornert et al., 2010; Yang et al., 2011).

To obtain the displacement field of an area undergoing mechanical transformation, the DIC method monitors the positional changes of a speckle pattern located on the sample surface. The speckle pattern is typically artificial to ensure adequate variations of contrast between images, but in this study, the speckle was the natural surface of the sample. The sample obtained had adequate speckle at the macroscopic scale. At the mesoscopic scale, the speckle was obtained by polishing the sample with silicon carbide and diamond products without epoxy resin (Fauchille, 2015).

Two images are necessary to obtain the full-field in-plane displacements; the first gray-level function $f(x, y)$ is acquired at the initial state t_0 , and the second gray-level function $g(x^*, y^*)$ is acquired at an actual state t . The principle of this method is to minimize the correlation function between the functions f and g for a given subset S (Sutton et al., 1983; Bruck et al., 1989). Several DIC methods have been developed to determine the precise kinematic field (u, v) in the area of a crack and evaluate its position (Jin and Bruck, 2005; Réthoré et al., 2008; Grégoire et al., 2009).

In this study, H-DIC software (Heaviside-based DIC) was employed (Valle et al., 2015). This software is based on an extension of the classic DIC method enriched by adding two-dimensional Heaviside functions $H(x, y)$ using a local approach and minimization process on a subset. This algorithm enables the crack location (discontinuities of displacement) to be determined with a precision of ± 1 pixel. The reader is referred to Valle et al. (2015) for more details.

In this study, all images contained 2560×1920 pixels. For the small and large zones, the magnifications were 2.2 and $10 \mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1}$, respectively. The subset size was 64×64 pixels (i.e., $140.8 \times 140.8 \mu\text{m}^2$ for the small zone and $640 \times 640 \mu\text{m}^2$ for the large zone), and the increment between two calculations was $D = 1$ pixel. The bi-cubic image interpolation algorithm was used for sub-pixel evaluation.

3.2.1. Crack aperture

A crack position is characterized by a discontinuity of displacement on the displacement fields (Valle et al., 2015). The crack apertures are

typically calculated by subtracting both displacement values normal to the crack faces. In our case, these normal displacements are actually extrema of the displacement values around the crack. Moreover, the calculated aperture values displayed in this section are always positive because all of the images were compared to the reference image corresponding to closed cracks. Indeed, the reference image is the last image taken during the test. Moreover, an increase in the calculated aperture corresponds to crack opening, whereas a decrease in the crack aperture is associated with crack closure.

The mean aperture values d_n (n is the crack number) were calculated by subtracting the extrema of displacements (u and v for the small zone, and v and w for the large zone) on both sides of the crack and averaging this subtraction over all subsets defining the “crack”:

$$d_n = \frac{1}{N} \sum_N \sqrt{(u_n(x, y) - u_n(x + \text{var1}, y + \text{var2}))^2 + (v_n(x, y) - v_n(x + \text{var1}, y + \text{var2}))^2} \quad (1)$$

N is the number of subsets defining each “crack”, $u_n(x, y)$ and $u_n(x + \text{var1}, y + \text{var2})$ are the extrema of the u displacements on both sides of the crack n , and $v_n(x, y)$ and $v_n(x + \text{var1}, y + \text{var2})$ are the extrema of the v displacements on both sides of the crack n . var1 and var2 define the distances in the x and y directions, respectively, to find the highest aperture in the area. The range var1 is 1–5 pixels, and var2 is 1–3 pixels. The calculation was performed in small rectangular areas of 5×3 pixels, including the crack. Other area sizes were tested (2×1 , 4×1 , 2×2 and 3×3 pixels) (Fauchille, 2015), but 5×3 pixels was optimal for calculating the aperture locally while searching for the highest aperture. This calculation was independent of the crack orientation versus the camera coordinate system and accounts for an aperture in opening mode (mode I) and an aperture in shear mode (mode II).

In contrast to the displacements, the values of d_n are not affected by the rigid-body movements of the camera.

3.2.2. In-plane strains

The strain ε_{is_sample} is the average in-plane strain, which corresponds to the measured strain at the sample scale in the large zone ($20 \times 20 \text{ mm}^2$). ε_{is_sample} is the sum of the in-plane principal strains ε_1 and ε_2 calculated on the same sample face:

$$\varepsilon_{is}(x, y) = \varepsilon_1(x, y) + \varepsilon_2(x, y) \quad (2)$$

The calculation is performed by measuring the variable distances between natural markers on the sample borders of the large zone (Fig. 2) during the desiccation process. The location of the centers of the markers was measured using the mark-tracking method (Rotinat et al., 2001). The ε_{is_sample} sample includes all cracks in the large zone and the sample deformation. This is a qualitative “volumetric” strain (Wang, 2012) because the Tournemire clay rock is considered a transversely isotropic material. This value can also be obtained with a displacement sensor (Valès, 2008).

The strain ε_{is_macro} is an average of each $\varepsilon_{is}(x, y)$ (Eq. 5) inside an area of 250×250 pixels in the large zone (macroscopic scale) without cracking, and the strain ε_{is_meso} was measured in an area of 200×200 pixels in the small zone (mesoscopic scale) without cracking. The zones selected to calculate ε_{is_macro} and ε_{is_meso} were those in which the noise was lowest and no cracks were detected.

4. Results

4.1. Types of cracks

For the large zone, the maps in Fig. 4a and b correspond to the w -displacement along the z -axis and the v -displacement along the y -axis. For the small zone, the maps in Fig. 4c and d correspond to the

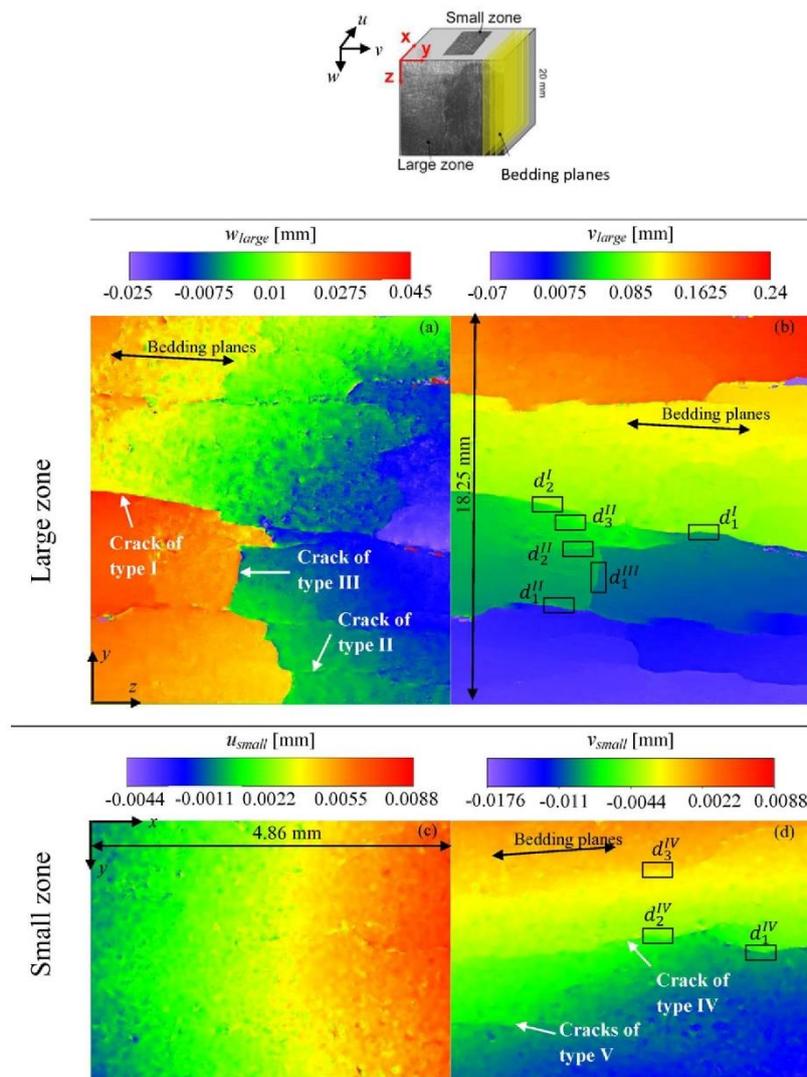


Fig. 4. Displacement fields (u,v,w) in mm obtained from the H-DIC algorithm for the large and small zones.

u -displacement along the x -axis and the v -displacement along the y -axis, respectively.

The in-plane horizontal displacements $u(x,y)$ and $w(x,y)$ were parallel to the bedding planes, whereas the in-plane vertical displacements $v(x,y)$ were perpendicular to the bedding planes.

The significant local variations of color on v and w indicate discontinuities of displacement and the presence of desiccation cracks (Fig. 4a–d). Moreover, the maps show the presence of sub-horizontal and sub-vertical cracks, as observed in the in situ investigation on the gallery front (Hedan et al., 2014).

For the large zone, the displacement fields (v, w) defined three types of desiccation cracks (Fig. 4 a, b):

- Type I: parallel to the bedding planes (sub-horizontal) and crossing the large zone.
- Type II: parallel to the bedding planes (sub-horizontal) and not crossing the large zone.

- Type III: perpendicular to the bedding planes (sub-vertical) and connected to the sub-horizontal crack in the large zone.

For the small zone, the v -displacement field defined two types of desiccation cracks (Fig. 4d):

- Type IV: parallel to the bedding planes (sub-horizontal) and crossing the small zone.
- Type V: parallel to the bedding planes (sub-horizontal) and not crossing the small zone.

In Fig. 4c, the u -displacement field for the small zone did not detect any crack at the investigated scale (1 pixel = 2.2 μm). This field exhibited a constant slope of displacement. In the studied zones, some displacement discontinuities were observed for the large and small zones (Fig. 4a–d). These displacement maps enabled the monitoring of the

crack apertures and in-plane mean strain with respect to time, RH and ΔW .

4.2. Evolution of the crack apertures during desiccation

There were five types of cracks; the crack aperture is written as d_n^c , where c is the type of crack (between I and V) and n is the crack number. The average crack apertures for different cracks were calculated in small areas containing 50 to 70 pixels of one crack (black areas in Fig. 4b and d) to compare their evolution during the desiccation process (Fig. 5). The results shown in Figs. 5a to 6d were associated with the eight sub-horizontal desiccation cracks ($d_1^I, d_2^I, d_1^{II}, d_2^{II}, d_3^{II}, d_1^{IV}, d_2^{IV}, d_3^{IV}$) and one sub-vertical crack (d_1^{III}) that were visible at the beginning of the test. The reference image (t_0) acquired at the end of data acquisition (closed cracks) was considered, and the time indicated in Fig. 5 corresponds to the time between the beginning of the study and the acquisition of the recorded images.

The closure of the desiccation cracks was effective during desiccation (Fig. 5a to d).

The maximum apertures for the eight sub-horizontal cracks at the beginning of the test exhibited values in the range of 1.3 to 3.5 μm for the small zone ($d_1^{IV}, d_2^{IV}, d_3^{IV}$) and 12 to 58 μm for the large zone ($d_1^I, d_2^I, d_1^{II}, d_2^{II}, d_3^{II}$). The crack aperture of the sub-vertical crack (d_1^{III})

was on the same order of magnitude as those of the sub-horizontal cracks.

The evolution of the cracks can be divided into three steps (Fig. 5a to d):

- In the first step, an opening of type I and III cracks in the large zone was measured (Fig. 5a) and confirmed by a positive crack opening velocity (Fig. 5b). Simultaneously, a closure of cracks of type II (large zone) and IV (small zone) was measured and confirmed by negative values of the crack opening velocity (Fig. 5b and d). Moreover, two cracks of type IV (d_2^{IV}, d_3^{IV}) had nearly null opening velocities at the beginning of step 1, contrary to crack IV d_1^{IV} . Thus, crack d_1^{IV} started to close before the two others cracks of type IV (Fig. 5d).
- In the second step, closure of all desiccation cracks was measured in the large and small zones (Fig. 5a and c), and confirmed by the negative crack opening velocities (Fig. 5b and d).
- In the third step, the desiccation cracks were closed, and the crack opening velocities were nearly zero.

The type IV cracks did not correspond to part of the type I or II cracks because the amplitude of the crack aperture was significantly different (the maximum of d_1^{IV} is 3.5 μm , and the maximum of d_1^I or d_1^{II} is between

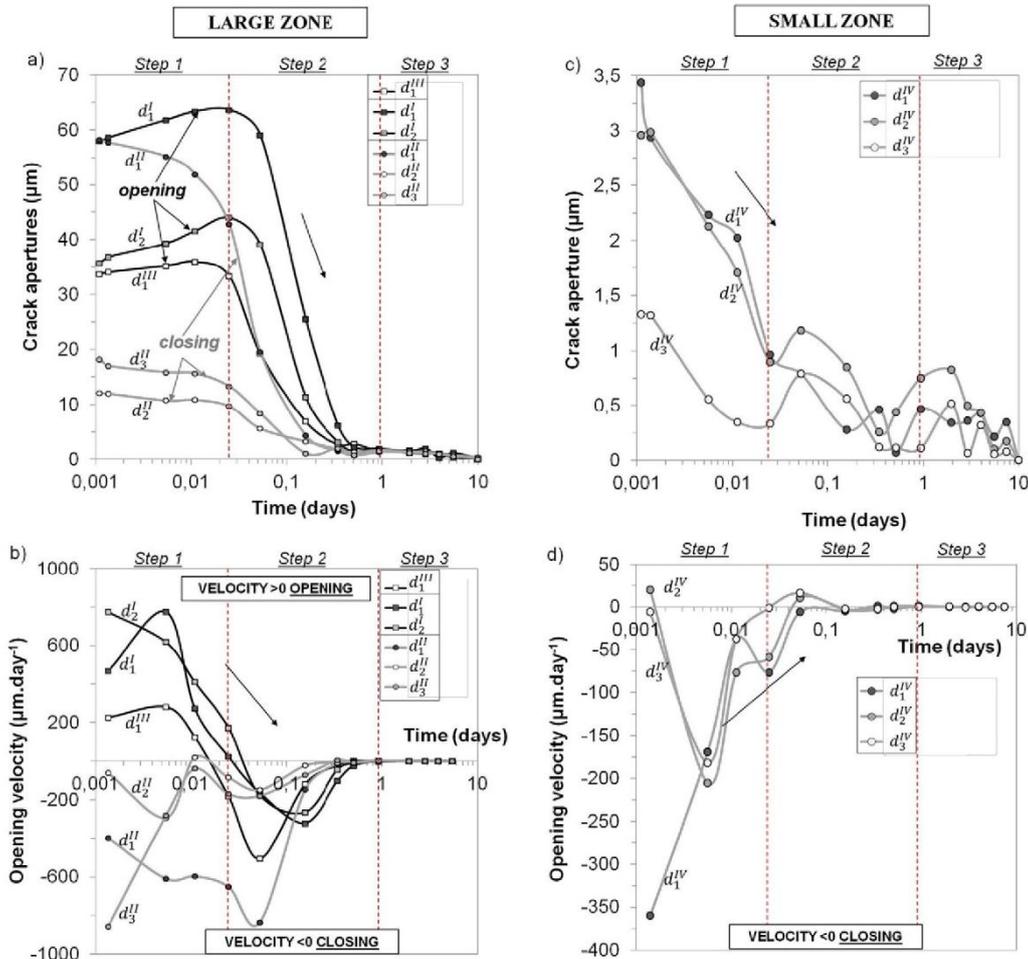


Fig. 5. For the large zone: a) crack aperture and b) opening velocity vs time; for the small zone: c) crack aperture and d) opening velocity vs time.

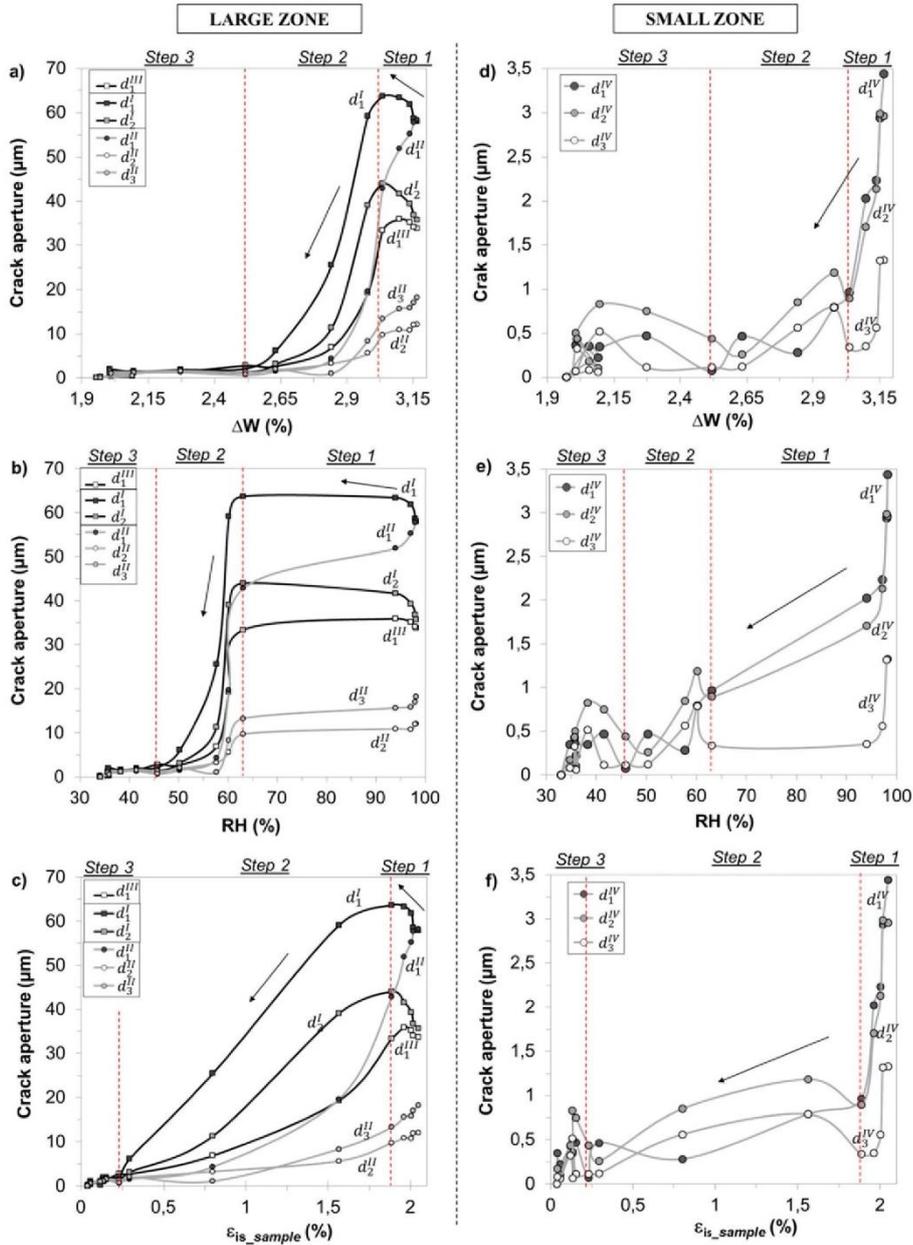


Fig. 6. Crack aperture vs a) averaged water content ΔW , b) RH and c) ϵ_{is_sample} , for the large zone; crack aperture vs d) ΔW , e) RH and f) ϵ_{is_sample} , for the small zone.

35 and 63.5 μm). However, significant differences in amplitude were observed, even though the crack apertures of the different types of cracks exhibited similar orders of magnitude.

4.3. Comparison of the desiccation crack apertures vs. RH, ΔW and ϵ_{is_sample}

The desiccation crack apertures were compared to the RH, average water content (ΔW) and in-plane strain observed at the sample scale (ϵ_{is_sample}) (Fig. 6). At the end of desiccation (after 10 days of study), at a RH of 33%, the sample was considered dried and stable against

deformation and cracking (all of the cracks were closed at the scale studied). Fig. 6 illustrates the behavior of the desiccation cracks, both scales, i.e., the large zone (macroscopic scale) and small zone (mesoscopic scale), and Table 1 summarizes the main features observed in Fig. 6.

In step 1, the type I and III cracks opened, and the type II and I cracks closed for a short time (≤ 0.025 day; i.e., ≤ 40 min). Moreover the RH variations were high (98% to 63%), whereas the ΔW variation (3.16% to 3.0%) and ϵ_{is_sample} variations (2.1 to 1.8%) were low. These observations defined shrinkage features on the sample surface, where:

Table 1
Summary of principal parameter variations and cracking behavior during the desiccation process.

Steps		1 (0.025 day)	2 (0.902 day)	3 (8.98 days)
Observations	ΔW variations	Low 3.17 → 3.03%	High 3.03 → 2.52%	High 2.52 → 1.95%
	RH variations	High 98 → 63%	Medium 63 → 45%	Low 45 → 33%
	ϵ_{is_sample} Variations	Low 2.05 → 1.89%	High 1.89 → 0.23%	Low 0.23 → 0%
	Cracking behaviour	–Crack opening of types I and III –Crack closure of types II and IV	–Crack closure of types I and III –Cracks of types II and IV already closed	All cracks are closed

ϵ_{is_sample} and ΔW evolved poorly and mainly reflected shrinkage features linked to the whole sample volume.

During step 2, the change in in-plane strain ϵ_{is_sample} was high (1.8 to 0.25%), and a gradual closure of all cracks was detected and measured. The important changes in the in-plane strain ϵ_{is_sample} and ΔW between the beginning and end of the second step defined a progressive shrinkage from the surface to the center of the sample.

In step 3, all cracks were closed, but the in-plane strain ϵ_{is_sample} and ΔW continued to decrease (0.25 to 0%, and 2.52 to 1.96%, respectively). Thus, these values correspond to the sole deformations associated with the clay rock (with no observable crack) at the study scales, in contrast to steps 1 and 2, in which cracks were partially responsible for the measured in-plane strain. Indeed, for steps 1 and 2, the measured sample strain was a complex combination of the clay rock deformation and the strains induced by crack closure or opening.

4.4. Influence of the presence of cracks on the mean in-plane strain values

The mean strain measured at the sample scale (ϵ_{is_sample}) and the in-plane strains measured in the solid phase (i.e., the clay rock without observable cracks at the macroscopic scale (ϵ_{is_macro}) and the mesoscopic scale (ϵ_{is_meso})) were compared during the desiccation path in Fig. 7.

The results indicated that the strain amplitude depended on the study scale. Indeed, ϵ_{is_meso} measured on the solid phase at the mesoscopic scale was lower than ϵ_{is_macro} , and ϵ_{is_macro} was lower than ϵ_{is_sample} . In the ϵ_{is_sample} calculation, the cracks on the large zone were all included, and in the ϵ_{is_macro} calculation, some cracks with an aperture smaller than the camera accuracy were included. At the scales examined, the ϵ_{is_meso} calculation did not include cracks. Thus, the importance of cracking in the ϵ_{is_macro} and ϵ_{is_sample} values was calculated while comparing their maximum values at the beginning of desiccation. The maximum ϵ_{is_sample} was 2.05%, the maximum ϵ_{is_macro} was 1%, and the maximum ϵ_{is_meso} was 0.8%. Therefore, ϵ_{is_sample} and ϵ_{is_macro} were overestimated by 61% and 20%, respectively, compared to ϵ_{is_meso} , which represents the strain of the rock without cracking at the mesoscopic scale. In other words, at the beginning of the test (step 1), 61% of the ϵ_{is_sample} value and 20% of the ϵ_{is_macro} value were due to

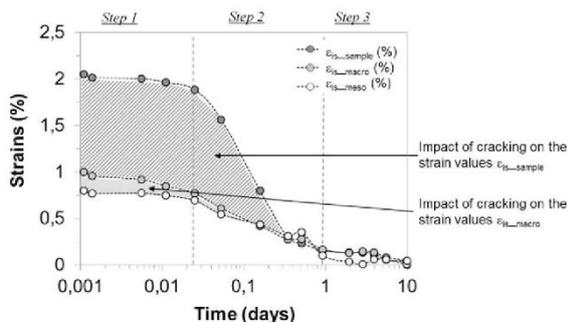


Fig. 7. Mean strains ϵ_{is_sample} , ϵ_{is_macro} and ϵ_{is_meso} vs. time during the desiccation path.

cracking. This result demonstrates the importance of cracking in the deformation calculation at large scale.

In conclusion, the values of ϵ_{is_macro} overestimated the strains in the solid phase because the closures of small cracks (such as type IV) were detected as strains at the macroscopic scale, and ϵ_{is_sample} overestimated the in-plane strain of the sample because the opening and closure of the types I, II, III cracks were incorporated in the strain calculations. In our case, the in-plane strain values were dependent on the scale, and the actual in-plane strain of the clay rock between cracks was close to the ϵ_{is_meso} values.

These results can also be observed in Fig. 8, which represents the evolution of the strains ϵ_{is_sample} , ϵ_{is_macro} and ϵ_{is_meso} as a function of ΔW . Fig. 8 shows that the relationship between the mean strain and ΔW also depends on the investigated scale. Because the unsaturated mechanical behavior of a clay rock is typically described by a constitutive law called the shrinkage curve (Gasc-Barbier and Tessier, 2007), this constitutive relationship may also depend on the study scale as well, particularly when the largest cracks are not accounted for.

5. Discussion: comparison to the gallery scale and microscopic scale

The comparison of the hydromechanical behavior of the Tournemire argillaceous rocks at various scales revealed some similarities and differences, which are summarized in Table 2.

5.1. Types of cracks

In our experiment, regardless of the study scale, sub-horizontal cracks were present, but the distances between these cracks depended on the scale (Table 2). The distance between cracks was up to twenty times greater at the gallery scale than at the macroscopic scale and up to five times greater at the macroscopic scale than at the mesoscopic

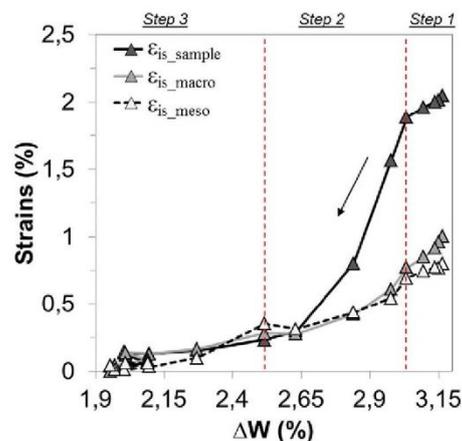


Fig. 8. Mean strains ϵ_{is_sample} , ϵ_{is_macro} and ϵ_{is_meso} vs. averaged water content ΔW .

Table 2
Comparison of the results obtained at different scales.

Observations	Scale				Comments
	Microscopic (μm) (Montes-H et al., 2004; Wang et al., 2013, 2014)	Mesoscopic (mm)	Macroscopic (cm)	Gallery (dm) (Hedan et al., 2014)	
Geometrical patterns of the desiccation cracks	Sub-horizontal cracks Cracks around grains	Sub-horizontal and sub-vertical cracks			–
Strains between the blocks separated by cracks	Heterogeneous strains	No measurable strain	Homogeneous strains	Homogeneous strains	Limitation to a continuous medium
A decrease of HR (98–33%) leads to	Opening and closure of different cracks	Fast opening and then closure of all cracks		Opening of cracks (but cyclic with erratic changes in RH and T)	Different boundary conditions
Maximum crack aperture [μm]	≈ 1	1.5–3.5	10–60	500	Multi-scale behaviour
Spacing between sub-horizontal cracks [mm]	unkown	0.5–0.9	1–5	64–100	Dependent on the DIC accuracy

scale (Table 2). The quantification of these distances was dependent on the measurement accuracy of the DIC method used to detect the cracks, i.e., it was dependent on the smallest measurable displacement value, which was a fractional value of the elementary pixel used in the optical set-up (approximately 0.1 pixel for H-DIC). The size of this elementary pixel is defined by the dimensions of the study area and the optical parameters of the camera.

Other cracks were observed and designated sub-vertical cracks with variable orientations compared to the sub-horizontal cracks (Fig. 4a and b). The orientation of the sub-vertical cracks with variable orientations exhibited more complex patterns than the sub-horizontal cracks associated with the bedding plane direction (Hedan et al., 2012). At a micrometer scale, Wang et al. (2013, 2014) observed many sub-horizontal cracks on the Callovo-Oxfordian clay rock sample submitted to a desiccation process under ESEM as well as several sub-vertical cracks around coarse grains (e.g., quartz and carbonate). The direction of these micrometer desiccation cracks was more complex and not clearly associated with textural or mineralogical features. At the micrometer scale, the geometric patterns of these cracks might depend on local microstructural heterogeneities in the clay matrix (e.g., small amounts of calcite cements that would have precipitated in the microporosity (Buschaert et al., 2004; Fauchille et al., 2014)).

The crack aperture was ten times greater at the gallery scale than at the macroscopic scale (Table 2). Furthermore, the aperture at the macroscopic scale was ten to twenty times higher than the aperture at the mesoscopic scale. Wang et al. (2013, 2014) and Montes-H et al. (2004) measured mean apertures of 1 μm for various cracks at the micrometer scale in SEM images of deep argillaceous Callovo-Oxfordian rock samples. At these four scales, the measured aperture of the cracks depended on the scale (Table 2).

At different scales (from the microscopic to the gallery), the cracks exhibited dissimilarities, such as the differences in aperture values and distances between two successive cracks. Our observations are consistent with the results of Hedan et al. (2014) and Wang et al. (2013, 2014) and confirmed the multi-scale behavior of crack networks (organization, aperture and distance between cracks) in argillaceous rocks.

5.2. Crack kinematics

The crack closure or opening phenomenon during desiccation in a free condition of deformation and hydric transfer for clay rocks has not been sufficiently observed and quantified in the literature.

The differences between the crack kinematics at the macroscopic and mesoscopic scales cannot be easily explained. However, several experimental studies of clay rocks (Möri et al., 2010) and clay soils (Konrad and Ayad, 1997; Péron et al., 2009) have demonstrated that geometric features, such as the aperture, depth, and spacing of cracks, are strongly interconnected. These studies indicate that the oldest and deepest cracks open more easily than the other cracks; consequently,

the crack associated with the highest aperture d_1^l should be the deepest desiccation crack and the first to appear in the studied area at different space scales. However, direct observations of these geometric crack parameters (e.g., width, length, orientation, connectivity, depth) are needed to confirm and clarify these relationships.

At the gallery scale, cracks open when the RH decreases (Hedan et al., 2014). At the microscopic scale, Wang et al. (2013, 2014) observed both crack opening and crack closure when the RH decreased under ESEM. Hallaire (1988) observed a similar phenomenon in natural clay soils at the macroscopic scale. During air-drying desiccation, some cracks opened at the beginning of shrinkage, whereas others closed. These opening and closure phenomena did not induce a volume change and were associated with a clear loss of water in the study samples. Our results at the macroscopic and mesoscopic scales indicated that the cracks closed at the end of the desiccation. This difference in behavior was attributed to the boundary conditions. In our laboratory study, all sample faces were free of deformation and drained (water mass can transfer through most of the surface of the study sample). By contrast, in the in situ case, only the front gallery was free of deformation; in the micrometer case, one face did not have any contact with air in the ESEM. These observations indicate that the opening and closing of cracks is related to desiccation and hydration in a complex manner: there is a non-bijective relationship between these features that also accounts for the hydric and mechanical conditions at the boundary of the sample (free or constrained condition).

At the macroscopic scale (i.e., on the large zone in Fig. 2) and the gallery scale (Hedan et al., 2014), homogeneous strains perpendicular to the stratification were observed (Fig. 4). However, the values accounted for the closure and opening of desiccation cracks: they cannot be considered as pure hydro-mechanical strains occurring with no fracturing processes.

6. Conclusions

A non-invasive DIC method was used on an argillaceous rock sample subjected to a desiccation process under measured and controlled RH and temperature. A new experimental set-up was designed to investigate the kinematic fields and patterns (displacement, strains, crack opening and closure) at two scales: mesoscopic (millimeter) and macroscopic (centimeter). This experimental laboratory investigation permitted the monitoring of deformations at both scales for (a) the spatial clay rock deformations and (b) the crack evolution (opening and closure) to calculate their aperture during desiccation.

From a phenomenological perspective, several conclusions have been reached. As observed in the Tournemire site (crack aperture $\leq 500 \mu\text{m}$), our laboratory work demonstrated that hydric changes induce sub-horizontal cracks and sub-vertical cracks whose apertures were between 3.5 and 63.5 μm . At the beginning of the desiccation (<0.025 days, i.e., <40 min), some cracks opened

rapidly, whereas other cracks closed. One half day after the data acquisition began, all of the desiccation cracks were closed; the desiccation process induced the closure of all cracks under free deformation and drained conditions. Under free deformation conditions, our observations suggest shrinkage from the surface to the center of the sample. Moreover, the comparison between the crack apertures and the distance between cracks at four scales (from the microscopic to the gallery scale) reveals they are multiscale parameters of clay rocks. The crack kinematics also exhibited multiscale behavior from the microscopic scale to the gallery scale, but this behavior appeared to depend on boundary conditions.

With respect to the relationship between strains and cracking, this study highlights that the crack apertures and the mean strain representing the “volumetric” strain were clearly correlated to RH and ΔW changes in the waterproof box. Furthermore, according to the considered scale, 20% of the mean strain ϵ_{is_macro} values and 61% of the mean strain ϵ_{is_sample} values were due to the presence of cracking. Thus, these mean strains were greatly overestimated.

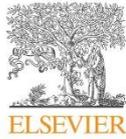
The interpretation of the entire dataset has emphasized two aspects. First, the concept of strain in the context of desiccation cracking is scale dependent. Second, our results suggest that a multi-scale approach is required to understand desiccation cracking mechanisms in clay rocks. In other words, the evolution of the kinematic fields and patterns (apertures, spacing, depths of desiccation cracks and hydric strains) induced by desiccation can be understood at different scales if their measurements, their characterization and their corresponding physico-mechanical processes (micro-cracking induced by drying and wetting) are considered simultaneously.

Acknowledgments

The authors acknowledge the NEEDS-MIPOR program (Nucléaire, Energie, Environnement, Déchets, Société-Milieu POREux) and the French Institute for Nuclear Safety and Radioprotection (IRSN) for supporting and funding this work. The authors are also grateful to M. Pascal Touvenet, M. Pascal Rogeon, M. Claude Laforest, M. Frédéric Limousin and Mrs. Alice Coffey for technical assistance.

References

- Bésuelle, P., Viggiani, G., Desrues, J., Bornert, M., 2006. X-ray micro CT for studying strain localization in clay rocks under triaxial compression. *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials*. ISTE Ltd., London, pp. 35–52.
- Blüming, P., Bernier, F., Lebon, P., Martin, C.D., 2007. The excavation-damaged zone in clay formations – time-dependent behaviour and influence on performance assessment. *Phys. Chem. Earth* 32, 588–599.
- Bonin, B., 1998. Deep geological disposal in argillaceous formations: studies at the tournemire test site. *J. Contam. Hydrol.* 35, 315–330.
- Bornert, M., Valès, F., Gharbi, D., Nguyen Minh, D., 2010. Multiscale full-field strain measurements for micromechanical investigation of the hydromechanical behaviour of clayey rocks. *Strain* 46 (1), 33–46.
- Bossard, P., Meier, M.P., Moeri, A., Trick, T., Major, J.C., 2002. Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus clay of the Mont Terri Rock Laboratory. *Eng. Geol.* 66 (1–2), 19–38.
- Bruck, H., McNeill, S., Sutton, M., Peters, W., 1989. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction. *Exp. Mech.* 29, 261–267.
- Buschaert, S., Fourcade, S., Cathelineau, M., Delouie, E., Martineau, F., Ougoudal, M.A., Trouillier, A., 2004. Widespread cementation induced by inflow of continental water in the eastern part of the Paris basin: O and C isotopic study of carbonate cements. *Appl. Geochem.* 19 (8), 1201–1215.
- Cabrera, J., Beaucaire, C., Bruno, G., De Windt, L., Genty, A., Ramambasoa, N., Rejeb, A., Savoye, S., Volant, P., 2001. *Projet Tournemire: Synthèse des Résultats des Programmes de Recherche 1995/1999*. IRSN Report.
- Charpentier, D., Mosser-Ruck, R., Cathelineau, M., Guillaume, D., 2004. Oxidation of mudstone in a tunnel (Tournemire, France): consequences for the mineralogy and chemistry of clays minerals. *Clay Miner.* 39, 135–149.
- Constantin, J., Vergely, P., Cabrera, J., 2002. Tectonique et fracturation associée dans le bassin des Causses (Aveyron, France): le cas du secteur de Tournemire (Aveyron, France). *Bull. Soc. Géol. Fr.* 173, 229–243.
- Cosenza, P., Ghoreychi, M., de Marsily, G., Vasseur, G., Violette, S., 2002. Theoretical prediction of poroelastic properties of argillaceous rocks from *in situ* specific storage coefficient. *Water Resour. Res.* 38 (10), 25–1–25–12.
- De Windt, L., Cabrera, J., Boisson, J.Y., 1998. Hydrochemistry in an indurated Argillaceous Formation (Tournemire Tunnel Site, France). In: Arehart, Hulsto (Eds.), *Water-Rock Interaction*. Balkema, Rotterdam, pp. 145–148.
- Desrues, J., Lanier, J., Stutz, P., 1985. Localization of the deformation in tests on sand sample. *Eng. Fract. Mech.* 21 (4), 909–921.
- Fauchille, A.L., 2015. *Déterminismes microstructuraux et minéralogiques de la fissuration hydrique dans les argilites de Tournemire: apports couples de la pétrographie quantitative et de la corrélation d'images numériques* (PhD thesis of Poitiers University, France).
- Fauchille, A.L., Hedan, S., Prêt, D., Valle, V., Cabrera, J., Cosenza, P., 2014. Relationships between desiccation cracking behavior and microstructure of the Tournemire clay rock by coupling DIC and SEM methods. *Proceedings of IS-Cambridge, Geomechanics from Micro to Macro 1–3 Sept. 2014* 2, pp. 1421–1424.
- Gasc-Barbier, M., Tessier, D., 2007. Structural modifications of a hard deep clayey rock due to hydro-mechanical solicitations. *Int. J. Geomech.* 7 (3), 227–235.
- Grégoire, D., Maigre, H., Moresin, F., 2009. New experimental techniques for dynamic crack localization. *Eur. J. Comput. Mech.* 18 (3–4), 255–283.
- Hallaire, V., 1988. La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement I, description *in situ*. *Agronomie* 8–2, 139–145.
- Hedan, S., Cosenza, P., Valle, V., Fauchille, A.L., Dudoignon, P., Cabrera, J., 2012. Investigation of the damage induced by desiccation and heating of Tournemire argillite using digital image correlation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 51, 64–75.
- Hedan, S., Fauchille, A.L., Valle, V., Cabrera, J., Cosenza, P., 2014. One-year monitoring of desiccation cracks in Tournemire argillite using digital image correlation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 68, 22–35.
- Jin, H., Bruck, H.A., 2005. Pointwise digital image correlation using genetic algorithms. *Exp. Tech.* 29, 36–39.
- Konrad, J.M., Ayad, R., 1997. Desiccation of as sensitive clay: field experimental observations. *Can. Geotech. J.* 34, 929–942.
- Lenoir, N., Bornert, M., Desrues, J., Viggiani, G., 2007. 3D digital image correlation applied to X-ray micro tomography from triaxial compression tests on argillaceous rock. *Strain* 43, 193–205.
- Matray, J.M., Savoye, S., Cabrera, J., 2007. Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite (Aveyron, France). *Eng. Geol.* 90, 1–16.
- Montes-H, H.G., Duplay, J., Martinez, L., Escoffier, S., Rousset, D., 2004. Structural modifications of Callovo-Oxfordian argillite under hydration/dehydration conditions. *Appl. Clay Sci.* 25, 187–194.
- Möri, A., Bossard, P., Matray, J.M., Franck, E., Fatmi, H., Ababou, R., 2010. Mont Terri Project: cyclic deformations in the Opalinus clay. *Proceedings of the International Meeting of Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinements*, Nantes 29 March–01 April 2010, pp. 103–124.
- Niandou, H., Shao, J.F., Henry, J.P., Fourmaintraux, D., 1997. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 34, 3–16.
- Okay, G., Cosenza, P., Ghorbani, A., Camerlynck, C., Cabrera, J., Florsch, N., Revil, A., 2013. Localization and characterization of cracks in clay rocks using frequency and time-domain induced polarization. *Geophys. Prospect.* 61 (1), 134–152.
- Péron, H., Hueckel, T., Laloui, L., Hu, L.B., 2009. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification. *Can. Geotech. J.* 46, 1177–1201.
- Réthoré, J., Hild, F., Roux, S., 2008. Extended digital image correlation with crack shape optimization. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 73 (2), 248–272.
- Robinet, J.-C., 2008. *Minéralogie, porosité et diffusion de solutés dans l'argilite de Callovo-Oxfordien de Bure (Meuse/Haute-Marne, France) de l'échelle centimétrique à millimétrique* (Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers).
- Rotinat, R., Tie Bi, R., Valle, V., Dupre, J.C., 2001. Three optical procedures for local large-strain measurement. *Strain* 37 (3), 89–98.
- Sutton, M.A., Wolters, W.J., Peters, W.H., Ranson, W.F., McNeill, S.R., 1983. Determination of displacements using an improved digital image correlation method. *Image Vis. Comput.* 1 (3), 133–139.
- Tremosa, J., Arcos, D., Matray, J., Bensenouci, F., Gaucher, E., Tournassat, C., Hadi, J., 2012. Geochemical characterization and modelling of the Toarcian/Domerian porewater at the Tournemire underground research laboratory. *Appl. Geochem.* 27 (7), 1417–1431.
- Tsang, C.F., Bernier, F., Davies, C., 2005. Geohydromechanical processes in the excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays - In the context of radioactive waste disposal. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 42 (1), 109–125.
- Valès, F., 2008. *Modes de déformation et d'endommagement des roches argileuses profondes sous sollicitations hydro-mécaniques* (Ph-D Thesis) Ecole Polytechnique, Palaiseau (France).
- Valès, F., Nguyen Minh, D., Gharbi, H., Rejeb, A., 2004. Experimental study of the influence of the degree of saturation on physical and mechanical properties in Tournemire shale (France). *Appl. Clay Sci.* 26, 197–207.
- Valle, V., Hedan, S., Cosenza, P., Berdjane, M., Fauchille, A.-L., 2015. Digital image correlation development for the study of materials including multiple crossing cracks. *Exp. Mech.* 55, 379–391.
- Wang, L., 2012. *Micromechanical Experimental Investigation and Modeling of Strain and Damage of Argillaceous Rocks Under Combined Hydric and Mechanical Loads* (Ph-D Thesis) Ecole Polytechnique, Palaiseau (France).
- Wang, L., Bornert, M., Chanchole, S., Yang, D.S., Héripé, E., Tanguy, A., Caldemaison, D., 2013. Microscale experimental investigation of the swelling anisotropy of the Callovo-Oxfordian argillaceous rock. *Clay Miner.* 48, 391–402.
- Wang, L., Bornert, M., Héripé, E., Yang, D.S., Chanchole, S., 2014. Irreversible deformation and damage in argillaceous rocks induced by wetting and drying. *J. Appl. Geophys.* 107, 108–118.
- Yang, D., Bornert, M., Chanchole, S., Wang, L., Valli, P., Gatmiri, B., 2011. Experimental investigation of the delayed behavior of unsaturated argillaceous rocks by means of digital image correlation techniques. *Appl. Clay Sci.* 54, 53–62.



Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijrmms

A new approach to quantify the anisotropy of hydromechanical strains in clay-rock at the gallery scale

Stephen Hedan^{a,*}, Valéry Valle^b, Justo Cabrera^c, Philippe Cosenza^a^a Université de Poitiers, CNRS UMR 7285 IC2MP, HydrASA, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de POITIERS, Bât B1 - TSA 41105, 1, rue Marcel Doré, 86073 Poitiers CEDEX 9, France^b Université de Poitiers, CNRS UPR 3346 Institut PPRIME, S.P. 2 M.L., Bd. M. et P. Curie, Téléport 2, B.P. 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France^c DEI-SARG Department, Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, B.P. 17, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex, France

ARTICLE INFO

Keywords:

Anisotropy measurement
Hydromechanical strains
Tournemire clay rock
Digital image correlation

ABSTRACT

We describe a new method to quantify the anisotropy ratio of hydric strains acquired at the gallery scale and over a period of at least one year. This method was applied in the context of an investigation conducted on a gallery front of the Experimental Station of Tournemire (France), which was subjected to a natural seasonal cycle. Our approach was based primarily on a new algorithm for Digital Image Correlation, known as H-DIC, which can accurately locate desiccation cracks and extract fifteen uncracked blocks with quantified sub-vertical and sub-horizontal strains.

The values of the anisotropy ratio of hydric strains (i.e., the ratio of the sub-vertical strains to the sub-horizontal strains, or the ratio of the strains perpendicular to the bedding to those parallel to the bedding) are in the range of [2.84–5.35], with a mean value close to 4.2.

The anisotropy ratio for the hydric strains appears to be independent of the natural cycle (i.e., hygrometry) present in the gallery. This observation is supported by a theoretical estimation of this anisotropy ratio, which suggests that the poroelastic parameters of clay rock are insensitive to climatic changes or that their evolutions roughly cancel each other out. With regard to geometrical patterns (area, width, height, aspect ratio and orientation) calculated for the uncracked blocks, the anisotropy ratio of the hydric strains does not depend on the area of these uncracked blocks.

Moreover, a literature review shows that the values of the anisotropy ratio for the hydric strains determined in this study are significantly larger than those obtained at the laboratory scale on undamaged samples or estimated from a theoretical relationship established in a poroelastic framework. These comparisons strongly suggest that damage to clay rock existing on the gallery front contributes to a significant increase in the anisotropy ratio of the hydric strains.

1. Introduction

The disposal of nuclear waste in clay rocks is a topic of interest in many industrialized countries [e.g.,¹]. Among the critical issues related to the long-term safety assessment of such geological repositories, the study of the excavation-damaged zone (EDZ) is particularly important. The initiation and extension of the EDZ are governed by several parameters,^{1–3} including the mechanical properties of the rock, the initial stress field, the existence of natural fracture zones in the rock mass, the geometry of the gallery, and the hydric state existing in the gallery. With regard to the hydric state existing in the gallery, fractures associated with the desaturation of the argillaceous medium have been observed on gallery fronts in several underground research

laboratories, such as the experimental platform of Tournemire⁴ and the Mont Terri Laboratory.⁵ This hydric fracturing process is characterized in situ by sub-horizontal cracks spaced at several decimeters on all of the vertical walls in contact with ambient air. These sub-horizontal cracks induced by desiccation are parallel to the bedding planes, suggesting that they are partially controlled by sedimentological patterns (e.g., vertical differences in sediment grain size and mineral composition or organization). In winter (dry state), the corresponding crack apertures can reach a few millimeters, whereas these cracks close in the summer (wet state).

The DIC technique has been successfully used in geomechanics to observe strain localization in geomaterials,⁶ to determine crack positions and to calculate the crack openings in clay rocks at various

* Corresponding author.

E-mail address: stephen.hedan@univ-poitiers.fr (S. Hedan).<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.07.004>Received 22 November 2017; Received in revised form 2 July 2018; Accepted 27 July 2018
1365-1609/© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

scales.^{7–13} Recently, new works performed at the experimental platform of Tournemire and using digital image correlation (DIC) technique have demonstrated (a) the existence of other types of sub-horizontal desiccation cracks at a distance of approximately 64–100 mm and (b) the presence of sub-vertical cracks crossing these sub-horizontal cracks.¹¹ Moreover, these observations demonstrated the ability of the non-contact DIC method to monitor clay–rock strains for at least four months and to monitor the opening and closing of desiccation cracks for more than one year at the gallery scale with an acquisition every 30 min. However, these kinematic data have been obtained from a classical DIC algorithm, which was not suitable for accurately determining the kinematical fields near desiccation cracks. The limitation of classical DIC algorithms to manage kinematic discontinuities can be overcome by various numerical methods, such as the point-wise¹⁴ and the subset splitting methods,¹⁵ whose presentations are beyond the scope of this paper.

This study focuses on an original use of a new algorithm for DIC known as Heaviside-based digital image correlation (H-DIC), which uses the Heaviside function properties to determine both kinematic fields and crack position when multiple discontinuities are present.¹⁶ This H-DIC algorithm is applied in this study on numerical images recorded from March 2011 to April 2012 (376 days) at the experimental platform of Tournemire.¹¹ The improvements of H-DIC are the enrichment of kinematical fields by a Heaviside function H to be able to accurately determine displacements in presence of a crack in each subset, and so a better location of desiccation crack when the aperture was superior to 0.1–0.2 pixel. Thus, H-DIC algorithm allows a description more realistic of hydro-mechanical behavior of argillaceous rock at the gallery scale. Contrary to H-DIC, classical DIC is less accurate to detect thin cracks. In the case of classical DIC, the user can consider a presence of a desiccation crack when it is visible (i.e., superior to 1 pixel) [e.g.,¹¹]. In other words, the undetected desiccation cracks, when their aperture is inferior to 1 pixel, lead to underestimate the number of fractures.

The objectives of this investigation are (a) to assess the ability of the H-DIC approach to observe new kinematic patterns associated with the hydric fracturing process operating at the gallery scale, (b) to provide new accurate hydric strains measured on a gallery front and (c) to calculate anisotropy ratios of the extracted in-plane components of the mean strains for comparison with the anisotropy ratios from the literature and theory.

2. Geological and geotechnical setting

The Tournemire experimental station of the French Institute for Radioprotection and Nuclear Safety (IRSN) is located in a Mesozoic basin on the southern border of the French Massif Central and at the western limit of the “Causse du Larzac”. The Tournemire massif is a monocline structure and is affected by the Cernon fault and secondary sub-vertical faults of hectometric extension. The argillaceous formation of interest which is 250 m thick corresponds to sub-horizontal consolidated argillaceous and marly layers from the Toarcian and Domerian ages (e.g.,^{4,17–19}). This formation is sandwiched between two carbonated and karstified aquifers. The upper Toarcian, corresponding to a 160 m thick layer of argillite, is crossed by a 1885 m long, century-old railway tunnel that was excavated between 1882 and 1886.

The mineralogical composition of the upper Toarcian formation shows that clay minerals composed of kaolinite, illite, and illite/smectite mixed-layer minerals represent approximately 40 wt% of the bulk-rock composition. The clay fraction is composed primarily of kaolinite (15–20 wt%), illite (5–15 wt%), illite/smectite mixed-layer minerals (5–10 wt%) and chlorite (1–5 wt%). This Toarcian formation also contains 10–40 wt% of carbonates (mainly calcite), 10–20 wt% quartz grains and 2–7 wt% pyrite.^{4,20,21} The water content is between 3.5 and 4.0 wt%.

Mechanical investigations^{22,23} have shown that Tournemire argillite

consists of a transverse isotropic geomaterial (i.e. anisotropic behavior). The physico-chemical and mechanical properties of Tournemire argillite can be found in Refs. 4,10,11.

Three different kinds of fractures are observed at the Tournemire experimental station (e.g.,^{4,17}): (i) fractures at the gallery walls induced by stress redistributions during excavation (millimeter-scale width and meter-scale extension), (ii) pre-existing tectonic fractures in the rock mass with similar dimensions as the previous fractures i.e., mm-scale widths and m-scale extensions and (iii) networks of regularly spaced (by approximately 20 cm) sub-horizontal cracks parallel to the bedding planes. These sub-horizontal cracks, which are easily observed on the vertical walls of the Tournemire galleries, are each several decimeters deep with a sub-millimeter aperture.

The set of sub-horizontal cracks is directly linked to seasonal variations in atmospheric properties at the Tournemire experimental station that result in variations in the chemical potential of the interstitial solutions during wetting/drying cycles.^{11,17,18,24} Hygrometry is characterized by the relative humidity, RH and temperature, T. The RH has been recorded since 1999 and exhibits seasonal variations typically 40% in RH and 8 °C in winter and 99% in RH and 14 °C in summer, with a mean annual RH value of 77% that leads to partial evaporation of the interstitial water. A clear correlation was measured between the aperture of these sub-horizontal cracks and the measured RH with a lag time of approximately 60 h between the fracture aperture and RH variations, as measured using capacitive thermohygrometers.²⁵

Our experimental investigation focused on the locations of all the sub-horizontal and sub-vertical desaturation cracks¹¹ and the deformation of clay rocks to characterize and quantify the anisotropy of hydric strains.

3. Input data: the experimental configuration at the East96 gallery

The numerical images processed in this study were acquired from an experimental investigation performed in the East96 gallery front of the Tournemire experimental station.¹¹ This gallery was drilled in 1996, fifteen years before the beginning of the experience. Two reasons guided the choice of the East96 gallery: (a) its EDZ is developed, but less than in the old railway tunnel, and (b) the clay rock can be directly observed on the gallery wall because no concrete lining exists on the surface of the gallery. With regard to the age of the gallery, no significant evolution of the EDZ extension was expected. The cross-section of the East96 gallery has a horseshoe shape with a height of 3.7 m, a width along the floor of the gallery of 4 m, and a length of 30 m. The mechanical stability of the gallery is ensured by steel supports regularly spaced every 2 m.

The experimental configuration in the East96 gallery (Fig. 1) comprised four parts (see details in¹¹):

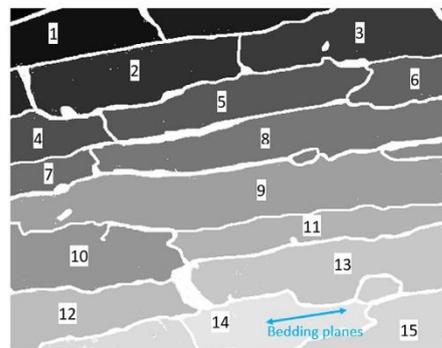


Fig. 1. Location of fifteen blocks ($k = 1-15$) on the ZOI.

- i. The study area ($344 \times 275 \text{ mm}^2$), defined as our zone of interest (ZOI), was located on the gallery front.
- ii. Images were acquired every 30 min using an IDS $\mu\text{Eye SE}$ (complementary metal-oxide semiconductor, CMOS, $1/2''$ sensor) camera (1280×1024 pixels; IDS Imaging Development Systems GmbH, Obersulm, Germany) equipped with a 50-mm lens and a 400 W spotlight.
- iii. A personal computer (PC) to store the images, the connections, and a light control system were installed in a metallic box.
- iv. Climatic data (RH and T) were recorded every 15 min using sensors placed at a distance of 2 m from the study area.

This experimental configuration allowed a spatial resolution and subset size of approximately $269 \mu\text{m}$ and 10.76 mm , respectively.

Images were acquired every 30 min over one year to obtain DIC measurements representing a complete climatic seasonal cycle (i.e., a dry season and a wet season) in the gallery. This climatic cycle was fully natural: the RH and T were not controlled in the gallery.

The recorded image at time t_0 (2011/08/25 17 h 49 min 25 s GMT) was used as the reference image: all the cracks were closed because of the rock swelling occurring in summer (RH equal to 95.76% at t_0). As explained further, the displacements at time t are obtained by comparing the subsets of the reference image at t_0 and those of the image acquired at time t . The speckle pattern used in this study was the natural roughness existing on the gallery front.¹¹

4. Data processing and results

4.1. Displacement fields determined from H-DIC

To obtain the displacement field (u, v) of an area undergoing mechanical transformation, the DIC method monitors the position changes of a speckle pattern located on the ZOI. The speckle pattern is characterized by a gray-level function calculated on a subset.

More precisely, following the DIC technique, two images are necessary to obtain the full-field in-plane displacements. A first gray-level function $f(x, y)$ is acquired at the initial state t_0 , and a second gray-level function $g(x^*, y^*)$ is acquired at an actual state t . The goal of this method is to minimize a correlation function (CF) between the functions f and g over a given subset S .^{26,27} Several DIC methods have been developed to determine the precise kinematic field (u, v) in the area of a crack and evaluate its position.^{28–30}

In our case, an H-DIC approach has been employed.¹⁶ This approach is based on an extension of the classic DIC method enriched by adding two-dimensional Heaviside functions $H(x, y)$ using a local approach and minimization process on a subset S . This algorithm enables the crack location (discontinuities of displacement) to be determined with a precision of ± 1 pixel. The reader is referred to¹⁶ for more details.

In this study, all the images measured 1280×1024 pixels. For the recorded zone, the magnification was $0.269 \text{ mm.pixel}^{-1}$. The subset size was 40×40 pixels (i.e., $10.76 \times 10.76 \text{ mm}^2$) and the increment between two calculations of the correlation function was $D = 4$ pixels. The bi-cubic image interpolation algorithm was used for sub-pixel evaluation.

4.2. Crack location and identification of uncracked blocks

A crack position is characterized by a displacement discontinuity (or a displacement jump) on the displacement fields (e.g.,¹⁶). The cracks constitute a network defining the boundaries of the uncracked blocks. Each uncracked block is identified by a surface limited by two sub-horizontal cracks and sub-vertical cracks or the edges of the ZOI. This identification was achieved by a “manual” procedure using the ImageJ software, a free image processing program already in common use (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>), which has been applied from the displacement fields (u, v) obtained from the H-DIC analysis. This step

consists of highlighting the sub-horizontal and sub-vertical cracks to generate a mask that permits construction of a gray-level image composed of white pixels corresponding to the desiccation cracks (Fig. 1) and gray pixels defining the unfractured surface. This gray-level image is also used to characterize the geometry of the uncracked blocks.

Note that the term “blocks” is used later to define unfractured surfaces. For the sake of clarity, each block area is labeled by different gray levels, and the highlighted cracks are shown in white (Fig. 1).

In contrast to previous results,¹¹ which permitted detection of only five uncracked blocks in the ZOI, the new algorithm for H-DIC improves the ability to identify crack locations and identifies fifteen blocks ($k = 1–15$) in the ZOI (Fig. 1). The image magnification of $0.269 \text{ mm.pixel}^{-1}$ and the precision of 0.1 pixel on the crack detection all desiccation cracks with an extreme aperture inferior to $27 \mu\text{m}$ were undetectable and so the medium is considered continuous.

This improvement is due to the spatial resolution of the crack detection associated with the H-DIC algorithm which was $0.1–0.2$ pixels (i.e., $27–48 \mu\text{m}$) in this case.¹⁶

4.3. Geometric characterization of uncracked blocks

Here, a geometric analysis of the uncracked blocks using the ImageJ software is conducted on the previous gray-level image. Using ImageJ software, each uncracked block in the gray-level image is approximated using a rectangular shape, making it straightforward to calculate the area and other geometric parameters, such as the aspect ratio and the angle between the horizontal direction and the direction of the width. The aspect ratio is defined as the ratio between the height and the width of each rectangle. Table 1 presents the results of this analysis. Note that the widths of the rectangles are sub-parallel to the bedding plane and that the heights are sub-perpendicular to the bedding plane.

Table 1 indicates that the area of the blocks varies between 1528 and 10591 mm^2 considering thirteen blocks where a part of their surface is outside the ZOI. These values confirm a heterogeneity of area blocks and that the maximal value of 10591 mm^2 which is underestimated because a part of this block no. 9 is outside the ZOI. Considering only the complete blocks (block nos. 2 and 5) inside the ZOI the values of their area occupy a narrower range: $[4720–5261] \text{ mm}^2$.

The distance between two sub-horizontal cracks can be approximated by the height of the rectangle which varies in the range from 34.97 to 69.4 mm with an average of 54.66 mm . The spacing between the sub-horizontal desiccation cracks is much less than 200 mm^4 and

Table 1
Summary obtained by ImageJ software of the characteristics and the fit by a rectangle of fifteen uncracked blocks.

Block	Area [mm ²]	Width [mm]	Height [mm]	Aspect ratio	Angle [°]
1	3730	124.82	47.61	2.62	9.947
2 ^a	5241	151.72	58.10	2.61	10.717
3	5759	164.09	60.26	2.72	7.89
4	2317	90.65	40.35	2.24	7.564
5 ^a	4720	192.07	58.10	3.31	11.708
6	2498	86.35	57.30	1.51	0.568
7	1528	77.47	34.97	2.21	11.897
8	6843	263.62	54.34	4.85	7.656
9	10,591	319.84	59.18	5.4	4.697
10	5624	140.96	69.40	2.03	–
11	3808	213.59	44.65	4.78	7.355
12	4789	150.37	64.56	2.33	11.927
13	6907	199.33	66.17	3.01	6.351
14	3616	136.65	46.00	2.97	5.026
15	4133	124.01	58.91	2.1	16.432
Average	4805	162.37	54.66	2.98	8.55
Standard deviation	2236	66.71	9.88	1.15	3.93

^a Complete block in the ZOI.

less than the range of [64.5–96.8 mm] reported previously at the same ZOI¹¹.¹¹ also obtained results using a DIC approach. The differences in the estimations from cracks spacing can be explained by the addition of two-dimensional Heaviside functions $H(x,y)$ of our approach. Following our H-DIC algorithm to detect the cracks, the spatial precision can reach \pm one pixel (i.e., \pm 0.27 mm)¹⁶ instead of several pixels (i.e. \pm 1.08–5.4 mm according to the crack opening value), as described by Ref. 11.

The average of the angle between the x -axis and the width of the rectangles (straight lines sub-parallel to the bedding planes) is 8.55 ± 3.93 degrees. This value is close to 10.13 degrees, as obtained previously by Ref. 11. The range of the aspect ratio (= width/height) is 1.5–5.4 with an average of 2.98.

For the whole blocks (block nos. 2 and 5), the range is 2.61–3.31.

The average angle between the coordinates system of the camera (x',y') and the bedding planes (x,y) is 8.55 degrees (with a standard deviation of 3.93 degrees).

4.4. Anisotropy of hydromechanical strains

The spatial measurements of in-plane displacements $u(x',y')$ and $v(x',y')$ obtained after 169 days with the H-DIC algorithm are presented in Figs. 2a and 2b. This date has been chosen for the extreme values of variation of the relative humidity and variation of the temperature ($\Delta RH = -73.71\%$, $\Delta T = -7.22^\circ C$). Three u' -profiles (shown as the dotted lines in Fig. 2a) and three v' -profiles (shown as the dotted lines in Fig. 2b) was extracted and plotted in Figs. 2.c,2.d,2.e,2.f, 2.g and 2.h. These profiles were chosen to highlight each jump of displacements and so the boundary between the blocks.

A comparison with the visible cracks on images and the displacement jumps in the displacement fields allows association with the block number and the profiles u' and v' .

The number in the dotted circle corresponds to the block number k , and the dotted line shows the location of desiccation crack. Fig. 2 confirms that the length of each block was longer in the direction sub-parallel to the bedding planes relative to the width sub-perpendicular to the bedding planes.

Moreover, the displacement profiles can be fitted using linear regression for each block separately, following these plane equations:

$$\begin{aligned} u'_{plane}(x, y) &= A_x^k \cdot x + B_x^k \cdot y + C_x^k \\ v'_{plane}(x, y) &= A_y^k \cdot y + B_y^k \cdot x + C_y^k \end{aligned} \quad (1)$$

where the slopes A_x^k and A_y^k correspond to the sub-horizontal strain ϵ_{xx}^k and sub-vertical strain ϵ_{yy}^k , respectively. The strain ϵ_{xy}^k is equal to the average of B_x^k and B_y^k . The variable C_x^k is the u -intercept of the k indexed plane. The variable C_y^k is the v -intercept of the k indexed plane. In this case, A_x^k , A_y^k , B_x^k , B_y^k , C_x^k and C_y^k are unknowns and are estimated block by block using a least squares method. The latter method minimizes a gap between the displacement data and the estimates given by Eq. (1). The inversion of A_x^k , A_y^k , B_x^k , B_y^k , C_x^k and C_y^k is repeated for each time t and for each block k .

Fig. 3 compares (for each block k ($k = 1-15$)) the mean sub-vertical strain ϵ_{yy}^k and the mean sub-horizontal strain ϵ_{xx}^k on an annual climatic cycle (376 days) and following the six profiles given in Fig. 2. Fig. 3 shows two results: (a) the relationship between ϵ_{yy}^k and ϵ_{xx}^k can be fit using a linear regression, and (b) the ratio (i.e., slope) between ϵ_{yy}^k and ϵ_{xx}^k is dependent on the block k (Table 2).

Moreover the mean sub-horizontal strain ϵ_{xx}^k (sub-parallel to the bedding plane) is smaller (3–5) than the mean sub-vertical strain ϵ_{yy}^k (sub-horizontal to the stratification), which confirms the anisotropic behavior of the hydric strains of the argillaceous rock of Tourmemire. However, the ratio is dependent on the block k and appears independent of the climatic conditions (RH and T). Indeed, for a given block k , the pairs (ϵ_{xx}^k , ϵ_{yy}^k) describe the same linear path and provide the same slope, i.e., the same ratio regardless of the climatic conditions. For

each block k , the higher sub-horizontal strains ϵ_{xx}^k correspond to higher sub-vertical strains ϵ_{yy}^k , and the minor sub-horizontal strains ϵ_{xx}^k correspond to the minor sub-vertical strains ϵ_{yy}^k .

For each block k , Table 2 summarizes the ratios $\epsilon_{yy}^k/\epsilon_{xx}^k$ and $\epsilon_1^k/\epsilon_2^k$ and the correlation coefficients $R^2(\epsilon_{yy}^k/\epsilon_{xx}^k)$ and $R^2(\epsilon_1^k/\epsilon_2^k)$. The variables ϵ_1^k and ϵ_2^k are the major and minor principal strains for each block k . The ratios $\epsilon_{yy}^k/\epsilon_{xx}^k$ and $\epsilon_1^k/\epsilon_2^k$ are in the range of 2.84–5.35. These values confirm that the camera coordinates (x,y) are near the principal directions (1,2) and show the spatial heterogeneity (factor ≈ 2) of the ratio values between the different blocks. The averages of the ratios $\epsilon_{yy}^k/\epsilon_{xx}^k$ and $\epsilon_1^k/\epsilon_2^k$ are equal to 4.1 and 4.3, respectively with corresponding standard deviations of 0.65 and 0.64. All data of $R^2(\epsilon_{yy}^k/\epsilon_{xx}^k)$ and $R^2(\epsilon_1^k/\epsilon_2^k)$ are larger than 0.92 which confirms a suitable fit using linear regression.

5. Discussion

5.1. Comparison between the geometric parameters and the strain values

Although the previous investigation confirms the strong dependence of desiccation crack behavior on climatic changes,^{4,5,11} it also provides at least two new results features that have not previously been documented in studies performed in underground facilities.

First, the same observed ZOI allows the definition of fifteen independent “uncracked” blocks, vs. five in the previous study.¹¹ These blocks are delimited by sub-horizontal and sub-vertical cracks within the bounds of the ZOI. Additionally, no desiccation cracks were visible inside the block areas. Only two blocks ($k = 2$ and 5) lay entirely within the ZOI (i.e., delimited by two-sub-horizontal and two sub-vertical cracks).

Second, except these two blocks, the geometrical parameters (including the area, perimeter, major and minor and surface) were defined by the area of the block inside the ZOI, meaning that the comparison between the geometric parameters and the ratio values can be challenging.

Fig. 4 shows the evolutions of the width according to $\epsilon_{1\max}^k$ and the height according to $\epsilon_{2\max}^k$. The values correspond to the maxima of strains ϵ_1^k and ϵ_2^k measured for each block and allow confirmation that the maximum major principal strain $\epsilon_{1\max}^k$ (strains sub-parallel to the bedding planes) is independent of the width of the blocks. Indeed, the $\epsilon_{1\max}^k$ values were between -1.56×10^{-3} and -2.16×10^{-3} , whereas the widths of the blocks were between 77.47 and 319.44 mm. The maximum minor principal strain $\epsilon_{2\max}^k$ (strains sub-perpendicular to the bedding planes) varied between -5.38×10^{-3} and -8.48×10^{-3} whereas the height of the blocks fluctuated less (34.97–69.4 mm) confirming that the ϵ_2^k values were not correlated with the height of blocks. According to the observations, the deformation of the clay rock appears to be independent of the geometric parameters for uncracked blocks and confirms that the correlation between the mineralogy (e.g. mineral composition, structure, porosity) and the deformation is necessary to understand the hydromechanical response of a clay rock.³¹

5.2. Values of the anisotropy ratio in the zones of interest

Along the bedding planes (i.e., for one depth in an argillaceous formation), the $\epsilon_{yy}/\epsilon_{xx}$ ratio was not homogeneous and does not permit a correlation with sub-horizontal consolidated argillaceous. Indeed significant variations in the $\epsilon_{yy}/\epsilon_{xx}$ ratio were observed for a gap reaching 0.12 between blocks 2 and 3 when these blocks were nearby. Along the axis perpendicular to the bedding plane, no correlation was observed, meaning that $\epsilon_{yy}/\epsilon_{xx}$ ratio is heterogeneous within the ZOI (Fig. 5).

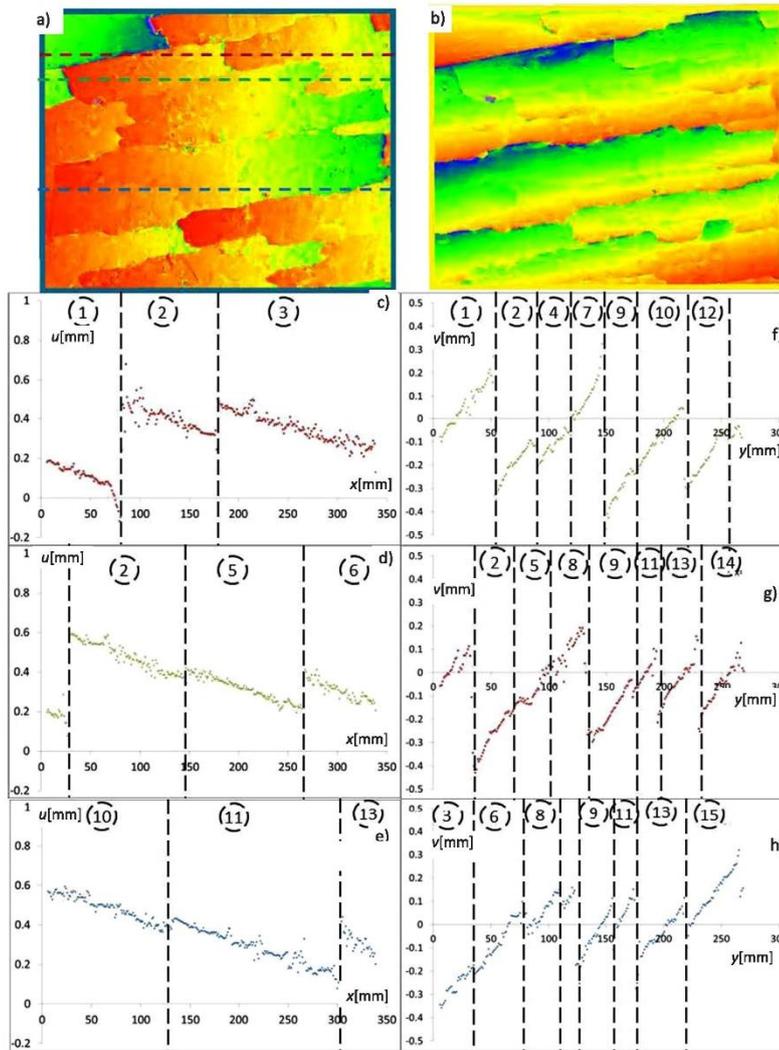


Fig. 2. (a) u' -displacement field, (b) v' -displacement field, (c,d,e) profiles of horizontal displacement u' for $y = 40.63, 62.14, 156.5$ mm, respectively, (f, g, h) profile of vertical displacement v' for $x = 40.35, 161.4, 303.97$ mm, respectively. The number in dotted circle corresponds to the block number k .

5.3. Comparison with literature and a theoretical estimation

At this stage, our values for the hydric strains and the corresponding anisotropy ratio cannot be compared with those in the literature since, these hydromechanical parameters have been measured for the first time at the gallery scale. Nevertheless, two issues can be addressed. First, one may wonder if our experimental values are similar to those obtained at the laboratory scale (which relatively plentiful in the literature (e.g.,^{9,12,18,32})) to determine whether a scale effect is associated with the anisotropy ratio of hydric strains. The second issue can be formulated as follows: Are our anisotropy ratios for hydric strains comparable to other mechanical ratios easily measured at the

laboratory scale? Here, one objective is to compare our values to (a) those obtained from non-destructive methods, in particular, from dynamic (seismic) methods efficiently carried out in the laboratory, but also at the gallery scale (e.g.,³³) and (b) those obtained theoretically in a simple poroelastic framework.

5.4. Comparison with kinematic data at the laboratory scale

Table 3 shows the values of the ratio of the hydric strains measured from two sets of clay rock samples. The first set was taken from the Tournemire argillite in which the experimental gallery of our study was excavated. The measurements performed on the second set of sample:

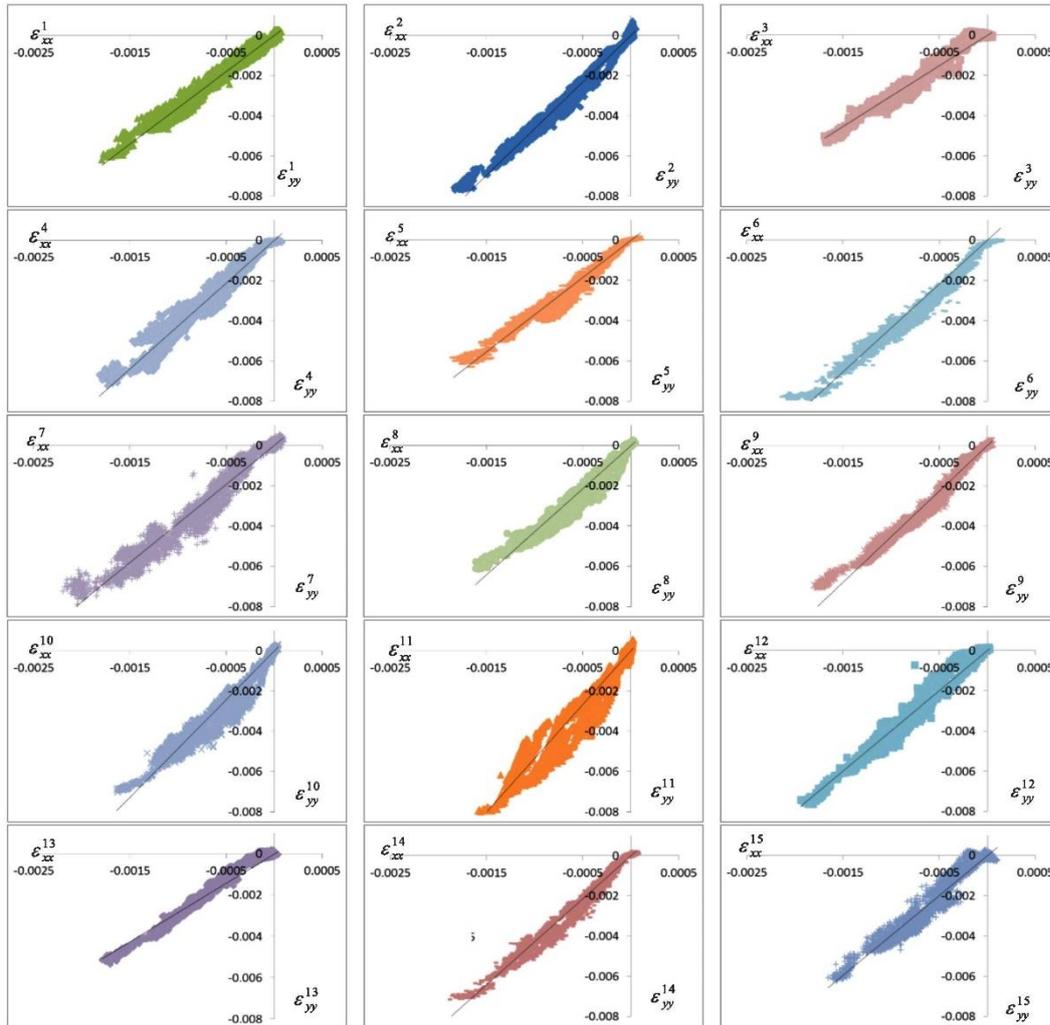


Fig. 3. For each block k ($k = 1-15$), the mean sub-vertical strain ϵ_{yy}^k vs. the mean sub-horizontal strain ϵ_{xx}^k on one more year. The black lines represent linear fits

were acquired in the Callovo-Oxfordian argillite which is being studied at the Underground Research Laboratory of Meuse/Haute-Marne, often referred to as the Bure site, which is located in the eastern part of France. For all values given in Table 3, the anisotropy ratio for the hydric strains is still defined as the ratio of the strain value measured perpendicular to the bedding to that obtained to the parallel bedding. Note that all the results reported in Table 3 have been obtained under stress-free conditions (i.e., no axial stress or lateral confinement). Under this condition, the amplitude of the hydric strains is expected to be higher than the amplitude which would be observed in a constrained condition (i.e., under a confining pressure), as is the case in an underground gallery.

The data given in Table 3 indicates that the values of the anisotropic ratio measured at the gallery scale are larger on average than those

obtained in the laboratory at a lower space scale and at a stress-free condition: the anisotropy of the hydric strains appears to be larger at the larger field scale. At this stage, it is challenging to definitely explain this scale effect, but its origin is likely associated with the damage of the clay rock existing at the gallery front, in the so-called EDZ. Indeed, Refs 13 and 31 showed that the hydric strain amplitude depends on the study scale and that the hydric strain amplitude at the sample scale (centimeter scale) is much higher than that measured at the micrometer scale. They also observed that the damaged and microcracked clay rock exhibits higher hydric strains (swelling and shrinkage) mostly perpendicular to bedding than in undamaged clay rock. Consequently, damage and the corresponding microcracks existing at different space scales would lead to both a larger hydric strain amplitude and a larger anisotropy ratio for the hydric strains at the largest space scale. Note

Table 2
Summary of ratio $\epsilon_{yy}^k/\epsilon_{xx}^k$, $R^2(\epsilon_{yy}^k/\epsilon_{xx}^k)$, ratio $\epsilon_1^k/\epsilon_2^k$ and $R^2(\epsilon_1^k/\epsilon_2^k)$ for fifteen uncracked blocks.

Block	ratio $\epsilon_{yy}^k/\epsilon_{xx}^k$	$R^2(\epsilon_{yy}^k/\epsilon_{xx}^k)$	ratio $\epsilon_1^k/\epsilon_2^k$	$R^2(\epsilon_1^k/\epsilon_2^k)$
1	3.60	0.98	3.60	0.96
2	4.63	0.98	4.67	0.96
3	3.02	0.96	3.27	0.97
4	4.27	0.97	4.39	0.97
5	3.69	0.97	3.86	0.96
6	4.35	0.97	4.71	0.96
7	3.88	0.96	4.00	0.94
8	4.28	0.96	4.40	0.96
9	4.54	0.98	4.87	0.96
10	4.85	0.94	5.06	0.94
11	5.35	0.94	5.42	0.92
12	3.98	0.97	4.23	0.98
13	2.84	0.95	3.15	0.98
14	4.27	0.98	4.45	0.96
15	3.97	0.95	4.46	0.96
Average	4.10	–	4.30	–
Standard deviation	0.65	–	0.64	–

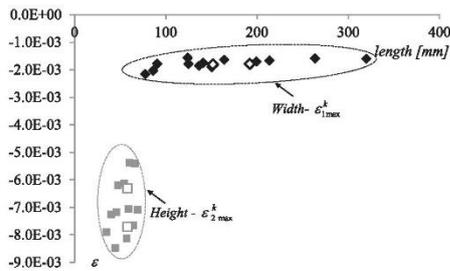


Fig. 4. Plots of the width of k block according to $\epsilon_1^k_{max}$ and the height of k block according to $\epsilon_2^k_{max}$. The transparent marks correspond to the entire blocks ($k = 2$ and 5).

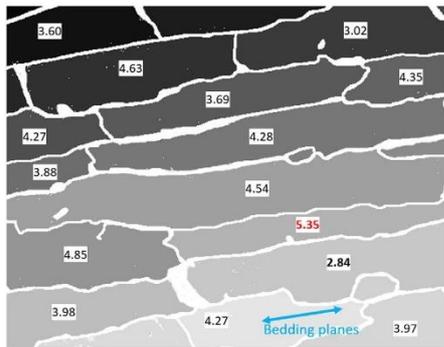


Fig. 5. Spatialization of ratio $\epsilon_{yy}/\epsilon_{xx}$ values.

that the corresponding microcracks and macropores existing in the rock material at the gallery front are not observable to the naked eye (e.g.,¹⁷) and constitute a fortiori evidence in our images.

5.5. Comparison with mechanical properties at the laboratory scale – the physical meaning of the measured anisotropy ratio

Table 4 compares the anisotropy ratio measured in our study to those obtained from other mechanical tests at the laboratory scale. The

Table 3
Comparison of the anisotropy ratio values of hydric strains measured in this study and those of the literature obtained at the laboratory scale.

Ratio range	Scale	RH (%) range	Clay-rock	Ref.
~1–3	cm	> 5–98	Tournemire argillite	¹⁸
2.1–2.4	cm	32–98	Callovo-Oxfordian argillite	³²
1.3–2.2	cm	36–98	Callovo-Oxfordian argillite	¹²
~1–3.6	100–300 μ m	75–99	Callovo-Oxfordian argillite	¹²
2.84–5.35 (average = 4.2)	dm	25–99	Tournemire argillite	This study

latter were obtained predominantly from ultrasonic measurements typically acquired in the 100 kHz to 1 MHz frequency band. These experiments were conducted on intact (undamaged) or near-intact clay rock samples.

The values given in Table 4 are much lower than the values for the anisotropy ratio of hydric strains acquired at the gallery scale. This difference suggests there is no simple and direct physical link between both groups of anisotropy ratios. Indeed, this finding is perhaps not surprising since we are comparing a ratio of a mechanical response (i.e. the anisotropy ratio of hydric strains) to a ratio of intrinsic mechanical properties (i.e., the anisotropy ratio of wave velocities or anisotropy ratio of elastic moduli).

Consequently, one may wonder which physical properties are directly linked to the anisotropy ratio of the hydric strains involved in our work. To answer this question, it is convenient to introduce a simple constitutive equation, i.e., an elastic equation in the framework of a partially saturated clay rock (e.g.,^{34,35}):

$$\delta \bar{\epsilon} = S : \delta \bar{\sigma} \tag{2}$$

where $\delta \bar{\epsilon}$ is the increment of the linearized strain tensor, S is the compliance tensor (i.e., $= C^{-1}$, where C is the elasticity tensor), and $\delta \bar{\sigma}$ is the increment of the effective stress, which given by:

$$\delta \bar{\sigma} = \delta \bar{\sigma} + \delta \Pi \bar{B} \tag{3}$$

where $\delta \bar{\sigma}$ is the increment of the total stress tensor, Π is a fluid pressure term that can be replaced, for instance, by the average of the air and water pressures weighted by the saturation degree for partially saturated porous geomaterials (e.g.,³⁶), \bar{B} is Biot's tensor (where $\bar{B} = \bar{1}$ for soils, with $\bar{1}$ being the identity tensor).

At this stage, two remarks should be made. First, an incremental formulation is preferred in (Eqs. (2) and (3)) since most of the poroelastic parameters in these equations likely depend on state variables (e.g., the fluid pressures, capillary pressure, saturation degree and damage). Second, the thermal strains are not accounted for here since our experiments have shown that the natural fluctuations of temperature in the gallery do not significantly influence the kinematic fields measured in our study.¹¹

In our experiment, no change in the total stress occurred (i.e., no stress was applied on the gallery front), meaning that it is safe to assume that $\delta \bar{\sigma} = 0$. Consequently, by considering Eqs. (2) and (3), the measured strain fields are governed by the following equation:

$$\delta \bar{\epsilon} = S : \delta \bar{\sigma} \tag{4}$$

The latter equation can be more explicitly written considering the compliance tensor and Biot's coefficient for a transversely isotropic clay rock (e.g.,³⁷):

Table 4
Comparison of the anisotropy ratio values of hydric strains measured in this study and the anisotropy ratio values of mechanical parameters obtained at the laboratory scale.

Ratio range	Mechanical parameters	Mechanical test	Clay-rock	Ref.
1.2	P-wave velocities ^a	Ultrasonic measurement	Northern Taiwan argillite	34
1.2	S-wave velocities ^b			
~1.0–1.6	P-wave velocities ^a	Ultrasonic measurement under hydrostatic loading	Opalinus clay	35
1.3	P-wave velocities ^a	Ultrasonic measurement	Callovo-Oxfordian argillite	36
1.2–1.4	P-wave velocities ^a	Ultrasonic measurement	Callovo-Oxfordian argillite	37
1.0–1.1	S-wave velocities ^b			
1.05–1.4	Young moduli ^c	Triaxial test	Callovo-Oxfordian argillite	38
1.0–1.1	P-wave velocities ^a	Ultrasonic measurement under hydrostatic loading	Norwegian Sea shale	39
1.0–1.1	S-wave velocities ^b			
1.2–1.4	P-wave velocities ^a	Ultrasonic measurement under hydrostatic loading	Callovo-Oxfordian argillite	40
1.2	S-wave velocities ^b			
1.2–2	Young moduli ^c	Triaxial test	Callovo-Oxfordian argillite	41
2.84–5.35 (average ≈ 4.2)	Hydric strains	H-DIC method	Tournemire argillite	This study

^a V_{ij}^p/V_{ij}^p where V_{ij}^p and V_{ij}^p are the P-wave velocity parallel to bedding and the P-wave velocity perpendicular to bedding, respectively.
^b V_{ij}^s/V_{ij}^s where V_{ij}^s and V_{ij}^s are the S-wave velocity parallel to bedding and the S-wave velocity perpendicular to bedding, respectively. Both S-wave velocities are polarized in the plane of wave propagation.
^c E_{ij}/E_{ij} where E_{ij} and E_{ij} are the Young modulus parallel to bedding and the Young modulus perpendicular to bedding, respectively.
^d V_{ij}^{p1}/V_{ij}^{p1} , V_{ij}^{p2}/V_{ij}^{p2} and V_{ij}^{p3}/V_{ij}^{p3} are the S-wave velocity parallel to bedding and polarized parallel to bedding and the S-wave velocity parallel to bedding and polarized perpendicular to bedding.

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_L}{E_L} & -\frac{\nu_L}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_L}{E_L} & \frac{1}{E_{ij}} & -\frac{\nu_{ij}}{E_{ij}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_L}{E_L} & -\frac{\nu_{ij}}{E_{ij}} & \frac{1}{E_{ij}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\mu_L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\mu_{ij}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\mu_L} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[B_{ij}] = \begin{bmatrix} b_L \\ b_{ij} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

where the transverse symmetric axis is axis number 1 (perpendicular to the bedding). The variables E_L and E_{ij} are the Young's moduli parallel and perpendicular to the bedding, respectively, ν_L and ν_{ij} are the Poisson's ratios parallel and perpendicular to the bedding, respectively, μ_L and μ_{ij} are the shear moduli parallel and perpendicular to the bedding, respectively, b_L and b_{ij} are the Biot's coefficients parallel and perpendicular to the bedding, respectively.

By substituting Eqs. (5) and (6) into Eq. (4) and by noting that δIIZ is a scalar, the following anisotropy ratio is obtained:

$$\frac{\delta \varepsilon_L}{\delta \varepsilon_{ij}} = \frac{\frac{b_L}{E_L} - \nu_L \frac{b_{ij}}{E_{ij}}}{-\frac{\nu_L}{E_L} b_L + \frac{1 - \nu_{ij}}{E_{ij}} b_{ij}} \quad (7)$$

The anisotropy ratio given in Eq. (7) is a complex function of two Young's moduli, two Poisson's ratio and two Biot's coefficients and is independent on the hydric loading δIIZ , which is confirmed by the experimental results in the gallery. Indeed, since our experimental results have shown that the anisotropy of the hydric strains does not depend on changes in the hygrometry, the poroelastic parameters in Eq. (7) (a) did not depend on changes in hygrometry as well or (b) that their evolutions with RH cancel out the effects of each other.

Moreover, an order of magnitude of this anisotropy ratio can be obtained on Callovo-Oxfordian argillite for which the elastic moduli and Biot's parameters have been extensively investigated in the laboratory.³⁸ By considering the following values corresponding to undamaged and near-saturated argillite, we obtain $E_{ij}/E_L = 1.2$, E_L

($E_L = 4$ GPa), $\nu_L = \nu_{ij} = 0.3$, and $b_L = b_{ij} = 0.6$ (the existence of bedding planes does not induce anisotropy in the Poisson's ratio and Biot's coefficients³⁸); thus, the anisotropy ratio given by Eq. (7) is close to 1.8. This value of 1.8 is significantly lower than that measured in our experimental investigation [2.84–5.35]. This difference may be due again to the damage existing on the gallery front, leading to microcracking in the clay rock. This interpretation is consistent with the scale effect observed for the kinematic data mentioned in the previous section.

6. Conclusions

A non-destructive full-field optical method associated with a new DIC algorithm, H-DIC, was used on a gallery front in argillaceous rock exposed to a natural seasonal cycle (one year) with the RH and T being measured. The experimental configuration was designed to investigate the kinematic fields and patterns (e.g., displacement, strains and crack locations) at the gallery scale. This experimental in situ investigation on a ZOI of 344×275 mm² with a magnification of 0.269 mm.pixel⁻¹ has shown the ability of our approach to monitor deformations, locate sub-horizontal and sub-vertical desiccation cracks and extract fifteen uncracked blocks in which the sub-horizontal and sub-vertical strains have been quantified. Their area varies between 1528 and 8522 mm² with an average of 4805 mm². These sub-horizontal and sub-vertical strains correspond to strains parallel and perpendicular to the bedding respectively. Consequently, the quantification of both strain groups allows quantification of anisotropy ratio of hydric strains at the gallery scale for the first time. The values of the anisotropy ratio for the hydric strains (i.e., the ratio of the sub-vertical strains to the sub-horizontal strains, or the ratio of the strains perpendicular to the bedding to those parallel to the bedding) are in the range of 2.84–5.35, with a mean value close to 4.2. These new data were obtained using a new DIC algorithm (H-DIC), which more accurately locates desiccation cracks than classical DIC algorithms.

From a phenomenological perspective, several results have been obtained. First, the anisotropy ratio for the hydric strains appears to be independent of the natural cycle (i.e.; hygrometry) in the gallery. This observation was confirmed through a theoretical estimation of the anisotropy ratio for the hydric strains, suggesting that the poroelastic parameters of the clay rock are insensitive to climatic changes or that their evolutions roughly cancel out their effects. Second, regarding to the geometrical patterns (i.e., area, width, height, aspect ratio and orientation) calculated for the fifteen uncracked blocks, the anisotropy

ratio for the hydric strains does not depend on the area of these uncracked blocks. The maximum major principal strain $\varepsilon_{1\max}^k$ (strains sub-parallel to the bedding planes) is independent of the width of the blocks, and the minor principal strain $\varepsilon_{2\max}^k$ (strains sub-perpendicular to the bedding planes) ε_2^k values is not correlated with the height of blocks.

A literature review shows that the values of the anisotropy ratio of the hydric strains determined in this study are significantly larger than those obtained at the laboratory scale or measured in terms of other mechanical properties, which were both acquired on undamaged samples. The values of the anisotropy ratio obtained at the gallery scale are also significantly larger than those estimated from a theoretical relationship established in a poroelastic framework. These comparisons strongly suggest that the damage to the clay rock existing on the gallery front contributes significantly to increase the anisotropy ratio of the hydric strains.

Our entire set of kinematic data (comprising strains fields, displacements fields, anisotropy ratios, and locations and apertures of desiccation cracks), acquired on a gallery front for which the climatic parameters (RH and T) were measured, constitutes a comprehensive dataset for hydromechanical or even thermohydromechanical modeling of the 3D evolution and propagation of desiccation cracks induced by ventilation at the scale of an underground facility. The objective of such modeling, which represents a natural extension of this work, is two-fold: (a) to identify the relevant state equations (e.g., the retention curve and constitutive equations) and their associated parameters and (b) to contribute to a better understanding of the desiccation cracking mechanisms induced by drying/wetting paths occurring in clay rock.

Acknowledgments

The authors would like to express their acknowledgment to the NEEDS-MIPOR Program (Nucléaire, Energie, Environnement, Déchets, Société-Milieus POReux) and to the French Institute for Nuclear Safety and Radioprotection (IRSN) for supporting and funding this work.

References

- Tsang C-F, Bernier F, Davies C. Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays—in the context of radioactive waste disposal. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2005;42(1):109–125. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmm.2004.08.003>.
- Bossart P, Meier PM, Moeri A, Trick T, Mayor JC. Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. *Eng Geol*. 2002;66(1–2):19–38. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00140-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00140-5).
- Blimling P, Bernier F, Lebon P, Derek Martin C. The excavation damaged zone in clay formations time-dependent behaviour and influence on performance assessment. *Phys Chem Earth Parts ABC*. 2007;32(8–14):588–599. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.04.034>.
- Cabrera J, Beaucaire C, Bruno G, De Windt L, Genty A, Ramambaso N, et al. Synthèse des Résultats des Programmes de Recherche 1995/1999. IRSN Report; 2001.
- Méri A, Bossart P, Matray JM, Franck E, Fatmi H, Ababou R. Mont terri project: cyclic deformations in the opalinus clay. In: Proceedings of the International Meeting of Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinements. Nantes; 2010.
- Desrués J, Lanier J, Stutz P. Localization of the deformation in tests on sand sample. *Eng Fract Mech*. 1985;21(4):909–921. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90097-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90097-9).
- Besuelle P, Viggiani G, Desrués J, Bornert M. X-ray micro CT for studying strain localization in clay rocks under triaxial compression. *X-Ray Tomography for Geomaterials*. London: ISTE Ltd; 2006:35–52.
- Bornert M. X-ray micro CT for studying strain localization in clay rocks under triaxial compression. *Adv X-Ray Tomogr Geomater*. 2010;118:35.
- Yang D, Chanchole S, Valli P, Chen L. Study of the anisotropic properties of argillite under moisture and mechanical loads. *Rock Mech Rock Eng*. 2013;46(2):247–257. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0267-5>.
- Hedan S, Cosenza P, Valle V, Dudoignon P, Fauchille A-L, Cabrera J. Investigation of the damage induced by desiccation and heating of Tournemire argillite using digital image correlation. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2012;51:64–75. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmm.2012.01.001>.
- Hedan S, Fauchille A-L, Valle V, Cabrera J, Cosenza P. One-year monitoring of desiccation cracks in Tournemire argillite using digital image correlation. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2014;68:22–35.
- Wang LL, Bornert M, Chanchole S, Yang DS, Hérispré E. Micro-scale experimental investigation of the swelling anisotropy of the Callovo-Oxfordian argillaceous rock. *Clay Miner*. 2013;48(2):391–402.
- Wang LL, Bornert M, Hérispré E, Chanchole S, Tanguy A. Full-field measurements of low-strained geomaterials using environmental scanning electron microscopy and digital image correlation: improved imaging conditions. *Strain*. 2014;50(5):370–380. <https://doi.org/10.1111/str.12076>.
- Jin H, Bruck HA. Pointwise digital image correlation using genetic algorithms. *Exp Tech*. 2005;29(1):36–39.
- Poissant J, Barthelat F. A novel “subset splitting” procedure for digital image correlation on discontinuous displacement fields. *Exp Mech*. 2010;50(3):353–364.
- Valle V, Hedan S, Cosenza P, Fauchille AL, Berdjane M. Digital image correlation development for the study of materials including multiple crossing cracks. *Exp Mech*. 2015;55(2):379–391. <https://doi.org/10.1007/s11340-014-9948-1>.
- Matray JM, Savoye S, Cabrera J. Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite (Aveyron, France). *Eng Geol*. 2007;90(1):1–16. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.021>.
- Valès F, Nguyen Minh D, Gharbi H, Rejeb A. Experimental study of the influence of the degree of saturation on physical and mechanical properties in Tournemire shale (France). *Appl Clay Sci*. 2004;26(1–4):197–207. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.12.032>.
- Bonin B. Deep geological disposal in argillaceous formations: studies at the Tournemire test site. *J Contam Hydrol*. 1998;35(1):315–330. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(98\)00132-6](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(98)00132-6).
- De Windt L, Cabrera J, Boisson J-Y. Hydrochemistry in an indurated argillaceous formation (Tournemire site, France). In: Water-Rock Interaction:145–148; 1998.
- Charpentier D, Mosser-Ruck R, Cathelineau M, Guillaume D. Oxidation of mudstone in a tunnel (Tournemire, France): consequences for the mineralogy and crystal chemistry of clay minerals. *Clay Miner*. 2004;39(2):135–149.
- Niandou H, Shao JF, Henry JP, Fourmaintraux D. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale. *Int J Rock Mech Min Sci*. 1997;34(1):3–16. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80029-9](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80029-9).
- Cosenza P, Ghoreychi M, De Marsily G, Vasseur G, Violette S. Theoretical predictor of poroelastic properties of argillaceous rocks from in situ specific storage coefficient. *Water Resour Res*. 2002;38(10).
- Bailly D, Matray J-M, Ababou R. Temporal behavior of a ventilated claystone at the Tournemire URL: cross-spectral analyses focused on daily harmonics. *Eng Geol*. 2014;183:137–158. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.005>.
- Fatmi H. Méthodologie d'analyse des signaux et caractérisation hydrogéologique: application aux chroniques de données obtenues aux laboratoires souterrains du MontTerri. *Tournemire Meuse/Haute-Marne*. 2004.
- Sutton M, Wolters W, Peters W, Ranson W, McNeill S. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image Vis Comput*. 1983;1(3):133–139. [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(83\)90064-1](https://doi.org/10.1016/0262-8856(83)90064-1).
- Bruck HA, McNeill SR, Sutton MA, Peters WH. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction. *Exp Mech*. 1989;29(3):261–267.
- Jin H, Bruck HA. Theoretical development for pointwise digital image correlation. *Opt Eng*. 2005;44(6) 067003–067003.
- Réthoré J, Tinnes J-P, Roux S, Buffière J-Y, Hild F. Extended three-dimensional digital image correlation (X3D-DIC). *Comptes Rendus Mécanique*. 2008;336(8):643–649. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2008.06.006>.
- Grégoire D, Maigre H, Morestin F. New experimental techniques for dynamic crack localization. *Eur J Comput Mech Eur Mécanique Numér*. 2009;18(3–4):255–283.
- Fauchille A-L, Hedan S, Valle V, Pret D, Cabrera J, Cosenza P. Multi-scale study of the deformation and fracture evolution of clay rock sample subjected to desiccation. *Appl Clay Sci*. 2016;132–133:251–260. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.054>.
- Pham QT, Vales F, Malinsky L, Nguyen Minh D, Gharbi H. Effects of desaturation–resaturation on mudstone. *Phys Chem Earth Parts ABC*. 2007;32(8–14):646–655. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.03.012>.
- Cosenza P, Hedan S, Valle V. Caractérisation non destructive de la zone endommagée des galeries souterraines excavées dans les roches argileuses. *Rev Fr Géotech*. 2016;148:4.
- Coussy O. *Poromechanics*. John Wiley & Sons; 2004.
- Cariou S, Duan Z, Davy C, Skoczylas F, Dormieux L. Poromechanics of partially saturated COX argillite. *Appl Clay Sci*. 2012;56:36–47.
- Bishop AW. The principle of effective stress. *Tek Ukebl*. 1959;39:859–863.
- Christensen RM. *Mechanics of Composite Materials*. Courier Corporation; 2012.
- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs-ANDRA. Stockage réversible profond- Tome 2. Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne. Report C.RP.ADS.09.0007.B; 2009.
- Dewhurst DN, Siggins AF, Sarout J, Raven MD, Nordg/a ard-Bol/a as HM. Geomechanical and ultrasonic characterization of a Norwegian Sea shale. *Geophysics* 2011;76(3):WA101–WA111.
- Sarout J, Guéguen Y. Anisotropy of elastic wave velocities in deformed shales: Part 1—experimental results. *Geophysics*. 2008.
- Armand G, Noiret A, Zghondi J, Seyedi DM. Short- and long-term behaviors of drift in the Callovo-Oxfordian claystone at the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory. *J Rock Mech Geotech Eng*. 2013;5(3):221–230. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.05.005>.

A5

Experimental Mechanics
<https://doi.org/10.1007/s11340-018-0415-2>



New Development of Digital Volume Correlation for the Study of Fractured Materials

V. Valle¹ · P. Bokam¹ · A. Germaneau¹ · S. Hedan²

Received: 9 March 2018 / Accepted: 28 June 2018
 © Society for Experimental Mechanics 2018

Abstract

This study reports on Digital Volume Correlation and its limitation in the case of fracture mechanics. Due to its sensitivity, detecting the crack opening in sub pixel level is extremely difficult and in-turn it does not provide an accurate estimation of the stress intensity factors. To address these limitations an improved DVC method was proposed to solve the uncertainty problems in the vicinity of cracks. The method (H-DVC) was developed using classical minimization process, including Heaviside functions in the kinematical field representation. Initial simulation has been performed for opening and sliding modes using classical DVC and proposed H-DVC. From these tests, crack detection limit has been evaluated to a jump of 0.1 voxels. A direct comparison of performances of DVC and H-DVC has been carried out on a fractured polymer sample to detect the kinematics discontinuity and to highlight the significant contribution of this novel approach. Furthermore, the local Crack Opening Displacement and local Stress Intensity Factor (KI) are calculated for mode-I loading (opening mode activated) condition. Parallelized computation of the proposed H-DVC method gave an access to high-resolution details, which indeed are not observable using classical DVC method. This allows a better evaluation of the distribution of localization phenomena in volumes under loading.

Keywords Digital volume correlation · Fracture · Full field measurement · Cracks · High resolution

Introduction

Full-field deformation and strain measurements is an important task in experimental mechanics. Within the available methods, the digital volume correlation (DVC) technique became a powerful and widely accepted tool to capture the 3D kinematic field measurement of solid objects or structures. The process of DVC is the extension of DIC from area pixel subsets to volume voxel subsets. DVC has undergone many technical advancements since its initial developments in 1999 by Bay et al. [1]. Bay et al. [1] only considered three

translational freedoms with a simple objective function. Smith et al. [2] considered the other three, rotational freedoms. In 2007, Franck et al. [3] and Germaneau et al. [4] further considered normal and shear strain/deformation utilizing twelve high-order freedoms in the objective function. Beside the local subset-based DVC presented above, Roux et al. [5] proposed the finite-element-based or global DVC implementation. In the past few years with the advancements in the optical field, paramount progress had taken place in digital volume correlation methods. The DVC combined with X-ray tomography enabled the measurement of 3D displacement and strain field throughout the material. DVC is continuously under development and during the last decade it has been applied to a number of different material applications such as rock [6], various foams [7], granular materials [8], composite materials [1, 9], bones [10, 11] and wood [12].

In recent times, to evaluate 3D displacement fields near the crack tip in a specimen under load the X-ray tomography images are used. Digital Volume Correlation (DVC) is also used to extract the kinematical displacement components [13] and the crack opening displacement maps in the cross-section of a pre-cracked specimen [14] and the analysis of measured

✉ V. Valle
 valery.valle@univ-poitiers.fr

¹ Institut Pprime UPR 3346, CNRS – Université de Poitiers – ISAE-ENSMA, S.P.2M.I., Bd. M. et P. Curie, Téléport 2, B.P. 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil, Cedex, France

² IC2MP, UMR 7285, CNRS-Université de Poitiers, HydrASA, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de POITIERS, 1 rue Marcel Doré, 86022 Poitiers, Cedex, France



3D displacement field allows to compute Stress Intensity Factor (SIF's) [15].

However, as DVC is an extension of 2D (DIC), the amount of data as well as the degree of freedom for DVC is considerably more. This makes the DVC algorithms demand for high computer resources. Thus, the major drawback in the implementation of DVC is the computational costs associated with the huge amount of data. This makes the calculations tedious, especially for high-resolution displacement and strain measurements. Therefore, the present work deals with the numerical aspects of DVC by proposing a particular kinematical transformation model based on Heaviside's functions referred to as Heaviside-based Digital Volume Correlation (H-DVC) hereinafter. The theoretical framework of the H-DVC is explained in later sections "Introduction", 1 and 1.2. One of the main objective of this study is to propose an adapted DVC method to improve the measurement resolution and spatial resolution close to 3D cracks.

The work conferred here was reported in four parts:

- A novel algorithm, Heaviside based DVC (H-DVC) was proposed which can address and capture displacements fields in subsets containing cracks in section "Introduction".
- A comparison between performances of the new proposed method (H-DVC) with the classical DVC method was demonstrated in sections "Proposed analysis method H-DVC, First simulation: Opening Mode, 4 and 5".
- Application of this novel method to the case of a fractured specimen under mode I loading explained in section "Extraction of the discontinuities for the opening and sliding cases".
- Finally, evaluation and comparison of COD and SIF obtained with the classical and the proposed method (DVC and H-DVC) in section "Extraction of the discontinuities for the opening and sliding cases".

Proposed Analysis Method H-DVC

Classical DVC Process

The Digital Volume Correlation (DVC) procedures used in this work were developed in a classical way. It compares gray levels from a subset in an initial state to one in a deformed state. The calculation process consists in retrieving the lower differences in gray levels between the initial volume (initial subset) and a kinematical transformation of the deformed volume (final subset). To do this, a minimization process was employed based on a system of equations. This system is composed of many equations, S as the number of pixels in a subset. For each pixel i , the associated equation S_i expressed in

equation (1) corresponds to the difference between the gray levels of pixel i at the initial configuration f and the corresponding one at the final configuration g .

$$S_i(\underline{P}) = S_i\left(u, v, w, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial w}{\partial z}\right) = \frac{f(\underline{X}_i) - \bar{f}_D}{\sigma_D} - \frac{g(\underline{X}_i) - \bar{g}_{D'}}{\sigma_{D'}} = \tilde{f}(\underline{X}_i) - \tilde{g}(\underline{X}_i) = 0 \quad (1)$$

Where, \underline{P} represents the unknowns and f and g are the volumes in the initial and the final configurations respectively. \underline{X}_i and \underline{x}_i are the positions of the pixel i in the initial and final configurations respectively. $\bar{f}_D, \bar{g}_{D'}, \sigma_D$, and $\sigma_{D'}$ are the averages and standard deviations of the subset gray levels in the initial configuration D and the final configuration D' . This expression was developed to minimize the influence of the light source variation and is inspired by the correlation functions S_{zmc} and S_{zmsd} , which are widely used for Digital Image Correlation (DIC) and DVC methods in the literature [16, 17]. Even if this process seems to be different from that of literature approach, these differences are negligible. This expression simplified by using \tilde{f} and \tilde{g} as zero normalized volumes:

$$S_i(\underline{P}) = \tilde{f}(\underline{X}_i) - \tilde{g}(\varphi(\underline{X}_i)) = 0 \quad (2)$$

Where φ is the kinematical transformation of the analyzed mechanical problem.

The problem is to solve $S_i = 0$ for all pixel i , with the same unknowns \underline{P} . To find the zero for a system of equations, Newton's method is used, and the iterative process can be written as follows:

$$\underline{P}_{j+1} = \underline{P}_j - [J(\underline{P})]^{-1} \begin{pmatrix} S_0(\underline{P}) \\ \vdots \\ S_n(\underline{P}) \end{pmatrix} = \underline{P}_j - [J(\underline{P})]^{-1} \underline{S}(\underline{P}) \quad (3)$$

with the Jacobian matrix

$$J(\underline{P}) = \frac{\partial S}{\partial \underline{P}} \quad (4)$$

At each iteration j , the solution \underline{P} was found. The process was stopped when the difference between \underline{P}_{j+1} and \underline{P}_j is smaller than a chosen limit. This optimization technique has proven its efficiency in a previous work [18].

DVC to H-DVC Developments

The modification of the standard Digital Volume Correlation (DVC) to the extended Heaviside based Digital Volume Correlation (H-DVC) is similar to that of the DIC algorithm to the H-DIC (Heaviside based Digital Image Correlation)



[19] (and from the stereoscopic version S-DIC to H-SDIC [18]). To consider to the nearness of a discontinuity of the kinematical field in the subset D (crack, shear bands), it is proposed to modify the kinematical transformation permitting to retrieve the material point of the last state in the underlying one. The mathematical principle can be written on the entire domain D as:

$$\underline{x} = \underline{\varphi}(\underline{X}) = \underline{X} + \underline{U} + \frac{\partial \underline{U}}{\partial \underline{X}} (\underline{X} - \underline{X}_0) + \underline{U}' H (\underline{X} - \underline{X}_0) \quad (5)$$

Where, the first part is the first terms of a Taylor development issued from the classical DVC [4], and the second part corresponds to a jump vector activated (or not) using a Heaviside function.

According to the properties of the Heaviside function, this representation can be interpreted as a cutting of the domain D in two sub-domains D_1 and D_2 with two different kinematical transformations φ_1 and φ_2 , with:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1(\underline{X}) = \underline{X} + \underline{U}_1 + \frac{\partial \underline{U}}{\partial \underline{X}} (\underline{X} - \underline{X}_0) \text{ on domain} \\ \quad D_1 (H = 0) \text{ depending on } r, \theta, \gamma \\ \varphi_2(\underline{X}) = \underline{X} + \underline{U}_2 + \frac{\partial \underline{U}}{\partial \underline{X}} (\underline{X} - \underline{X}_0) \text{ on domain} \\ \quad D_2 (H = 1) \text{ depending on } r, \theta, \gamma \end{array} \right. \quad (6)$$

From equation (1) and equation (5), equations S_i formulated:

$$S_i(\underline{p}) = S_i \left(u, v, w, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial w}{\partial z}, u', v', w', r, \theta, \gamma \right) \quad (7)$$

where $\underline{U}' = \underline{U}_2 - \underline{U}_1 = (u', v', w')$ is the jump vector, and $H(\underline{X} - \underline{X}_0) = H((x \cos(\theta) + z \sin(\theta)) \cos(\gamma) + y \sin(\gamma) - r) = H(r, \theta, \gamma)$ defines the plane separating two domains in the spherical base (r, θ, γ) and it is represented in Fig. 1. It can be recalled that all parameters are optimized in the similar process and all subsets are enriched. When there is no discontinuity present in the subset, the optimization gives a jump near zero, and automatically deactivates the Heaviside part.

The entire process was implemented in a software (XDVCorrel) using four GPU (GP104) and Massively Parallelized Computation [18, 19]. This gives 100,000 data to be analyzed at the same time. For a subset size of $32 \times 32 \times 32$ voxels and a tricubic gray level interpolation, the computation speed is equal to 100,000 data per minute [20] for classical DVC, and 6000 data per minute for H-DVC algorithm. As mentioned by Valle et al., 2015 [19] there is a significant runtime difference between classical DIC and HDIC as it requires a higher number of parameters to optimize (i.e. 18 parameters for HDIC when compared to 12 parameters for classical DIC). For high resolution, to compute the data

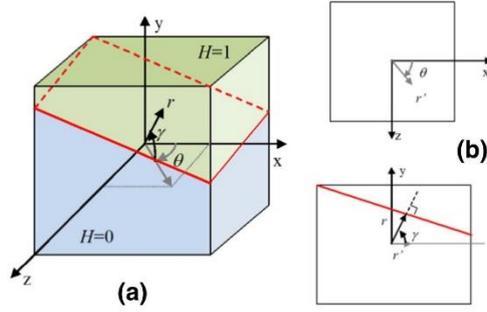


Fig. 1 Schematization of the Heaviside function effect on a subset defining the position of the sliding/opening plane in the centered spherical base. a) The volume representation depending on the spherical parameters r , θ and γ . b) The two-dimensional decomposition of the sliding/opening plane position. Where r' is the projection of r in xz plane

volume of few millions requires a minimum of 15 min for DVC whereas H-DVC takes around 5 h of time. In order to evaluate the advances of H-DVC over the classical DVC in fractured structures, a comparison of two algorithms miming the mode I and mode II of fracture was contrived. In addition, the choice of interpolation (trilinear vs. tricubic) discussed on the simulated volumes submitted to the subpixel displacements, as done in the 2D case with DIC [21].

Trilinear Interpolation Vs. Tricubic Interpolation

During the minimization process, gray level interpolation of voxels was employed similar to that used in a two-dimension version of the correlation method (DIC) [22, 23]. In the literature, most of the researcher's utilized trilinear interpolation [4] and only a couple of them used tricubic interpolation [24, 25]. In order to compare trilinear and tricubic interpolations on same speckle and computational conditions, synthetic volumes were made to mimic the speckle distribution in 8 bits. To generate these synthetic volumes, a gray level random error of ± 10 gray levels added to simulate the digitalization process (noise). An initial volume of $1000 \times 1000 \times 1000$ voxels was made, and then a chosen integer displacement was applied in a range of 1 to 10 voxels. Finally, eleven new volumes (Fig. 2) were constructed by averaging $10 \times 10 \times 10$ voxels to obtain a dimension of $100 \times 100 \times 100$ voxels and a subpixel displacement in a range of 0 to 1 voxel with the increments of 0.1 voxel (Fig. 3).

The classical systematic error [21] obtained using trilinear and tricubic interpolation demonstrated in below Fig. 3 using a subset size of $32 \times 32 \times 32$ voxels. It is evident that there is an improvement of accuracy using a tricubic interpolation of gray levels, with an accuracy of 0.015 voxels for a trilinear interpolation against 0.005 voxels for a tricubic interpolation. These results are coherent and satisfying when compared



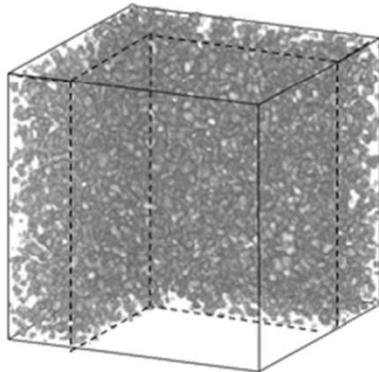


Fig. 2 Simulated volume of $100 \times 100 \times 100$ voxels. A part of the volume sliced for better representation of the internal volume

those obtained in three-dimensional approach by classical DVC for trilinear [26] and tricubic [24] interpolations.

Comparison of DVC and H-DVC Methods

For establishing a better comparison between DVC and H-DVC methods, few classical criteria parameters are consid-

ered. The first one is the residual indicator Φ of the minimization process [27] and can be written as:

$$\Phi^2 = (f(\underline{X}) - g(\underline{x}))^2 \tag{8}$$

The second parameter is the von Mises equivalent strain $\langle \epsilon_{Mises} \rangle$, which can efficiently present the discontinuity position in all directions and in all mechanical modes (sliding and opening). In order to access this parameter, it is necessary to calculate the strain tensor, given by the displacement gradient tensor G .

Total displacement gradient tensor G is evaluated by finite differences of the displacement field:

$$G = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{xx} & G_{xy} & G_{xz} \\ G_{yx} & G_{yy} & G_{yz} \\ G_{zx} & G_{zy} & G_{zz} \end{pmatrix} \tag{9}$$

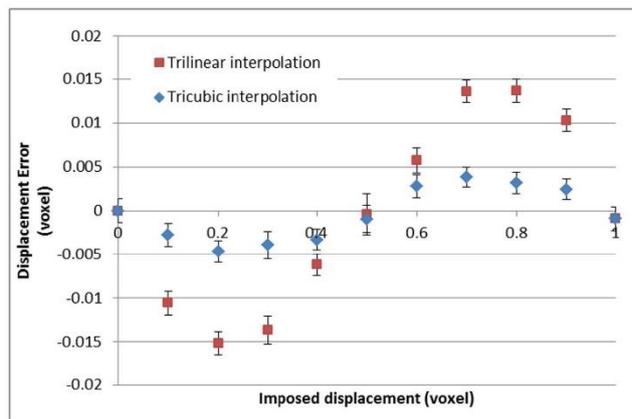
Von Mises's pseudo strain $\langle \epsilon_{Mises} \rangle$ can be rewritten as [19]:

$$\langle \epsilon_{Mises} \rangle = \frac{2}{3} \sqrt{G_{xx}^2 + G_{yy}^2 + G_{zz}^2 - G_{xx}G_{yy} - G_{xx}G_{zz} - G_{zz}G_{yy} + \frac{3}{4} \left((G_{xy} + G_{yx})^2 + (G_{xz} + G_{zx})^2 + (G_{zy} + G_{yz})^2 \right)} \tag{10}$$

The strain maps calculated using a matrix of 3×3 displacement values centered at image coordinates \underline{X} and at the initial configuration.

To evaluate the performances of the proposed method, the synthetic volumes were created and build in a known kinematical field. In order to investigate the performances of the

Fig. 3 Error evaluations (classical systematic and arbitrary errors) for a simulated displacement test obtained using trilinear or tricubic interpolations



H-DVC algorithm to that of classical DVC algorithm, the synthetic volumes have to be simulated in three principal modes of fracture mechanics and at the same time have to define the possible movements of the discontinuity edges (i.e. mode I (opening mode), mode II (in-plane sliding) and mode III (out-of-plane sliding)). In these cases, synthetic volumes have been created using the same principle as described earlier in section 1.2. by adding a step of gray-level trilinear interpolation to generate accurate final volumes.

First Simulation: Opening Mode

A primary evaluation was proposed to demonstrate the performances in mode-I (opening mode) and to investigate the performances of the H-DVC compared to classical DVC. To mimic a volume deformation, an isotropic shrinkage applied on the sphere and at the same time an isotropic swelling of the cubic volume as shown in Fig. 4. These volume deformations (miming an isotropic strain) generate an opening mode with a crack tensile opening mode (COD) of 0.79 voxels.

The calculated displacement maps along the three directions for mode I are presented in the above Fig. 5 (a), (b) and (c) respectively, it could be observed that the performances when H-DVC used are quite efficient when compared to classical DVC. In addition, the imposed kinematical fields were well retrieved in H-DVC method. The residual maps Φ (Fig. 6) confirms excellent

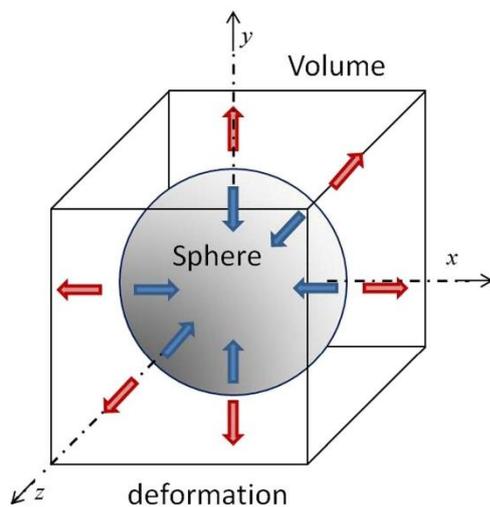


Fig. 4 Schematization of opening mode. The blue arrow shows the isotropic shrinkage of the sphere and the red arrow the isotropic swelling

performance of H-DVC algorithm in retrieving the crack position contrarily to classical DVC algorithm. From von Mises equivalent strain maps as shown in Fig. 6, the crack localization well retrieved and constant in all the directions for H-DVC.

Second Simulation: Sliding Mode

The second test aims to generate sliding modes to demonstrate the performances of the H-DVC compared to classical DVC. To simulate the sliding modes, a rigid body rotation of a sphere with a positive rotation along a rotation axis in a rotating volume with a negative rotation along the same rotation axis have been chosen. These two rotations were along the same rotation axis, but in inverse senses (fig. 7).

As the results obtained are homogeneous along the rotation axis, Fig. 8 presents the displacement maps for rotation along the x -axis. This kind of kinematical fields can engender a sliding mode frame, except along the x -axis rotation. Moreover, it is intriguing because the sliding amplitude decreases moving proximate to this rotation axis, and can show the constraints of the crack captured for different sliding values. The maximum imposed sliding is equipollent to 0.84 voxels (Fig. 8).

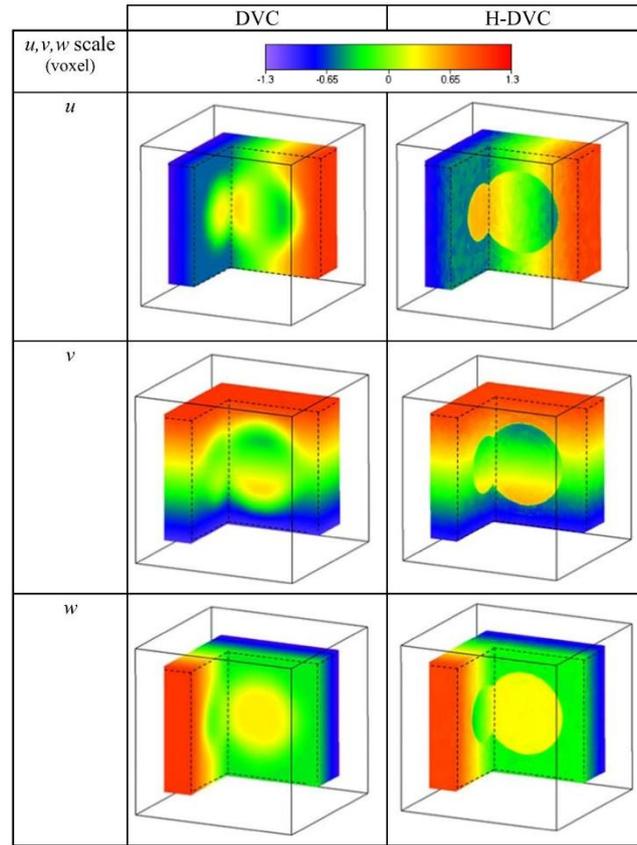
From Fig. 8, it can be observed that the imposed kinematical fields are well retrieved precisely and accurately with H-DVC algorithm when compared to DVC. The residual maps Φ (Fig. 9) show an improvement in the results surrounding the crack position. Consequently, the von Mises equivalent strain maps (Fig. 9) demonstrates a very good localization of the crack using H-DVC contrarily to a low and diffused localization using the classical DVC. From the Fig. 9, it can be observed a decreasing of the equivalent strain when it is calculated near the rotation axis. Therefore, from the above results we can emphasize H-DVC offers a real improvement of the crack detection, and in consequence the capture of kinematical values very near to the crack.

Displacement Jump Error Evaluation

From the opening and sliding tests, it can be easy to evaluate the error measurement of the displacement jump. There are many different values of the discontinuity, because displacement jump varies in function of the distance from each axis (ex: the rotation axis for sliding mode). Figure 10(a) shows a map of w component extracted from the plane at $z=0$. Figure 10(b) shows the results obtained from the opening mode for imposed and the measured component v of the discontinuity jump. They are extracted



Fig. 5 Comparison between DVC and H-DVC results of u , v and w displacements for mode I (opening mode)



from the plane at $z=0$ and depends on orientation centered at $x=y=z=0$. It can be observed that the imposed and measured values superimpose quite good. Figure 10(c) shows the error resulting from the differences between imposed and measured displacement jumps u and v (w is equal to zero). The same principle was applied to the results of the w jump component from the sliding mode ($u=v=0$). Figure 10(d) and (e) show identical behavior in the opening mode. The errors are more important in opening mode and can be explained by the appearance of black volume due to an increasing of the discontinuity volume which perturbs the gray level voxels on both sides of the crack lips. This confirms what has been observed in the previous work of H-DIC [19]. Globally, it can be evaluated with less 0.1 voxels, retrieving the same results as previous works in two-dimensional case (H-DIC) [19].

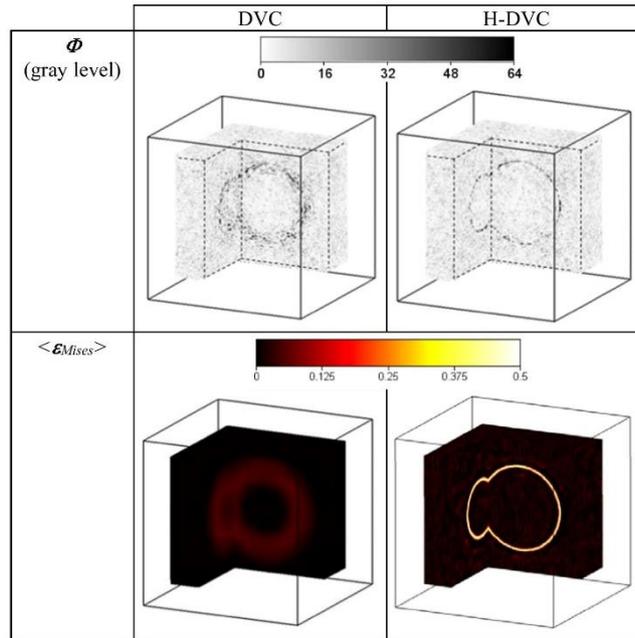
Extraction of the Discontinuities for Opening and Sliding Cases

The above results as shown in Figs. 5, 6, 8 and 9 confirms that H-DVC significantly improves the kinematical field calculation in presence of discontinuities comparing to a classical DVC approach. The two mechanical modes can be well retrieved and by applying a threshold to the von Mises equivalent maps, it can be possible to localize and extract the discontinuity surfaces in 3D (Fig. 11). Figure 11 shows the location where von Mises equivalent data was superior to 0.15. The size and the form of the results correspond to the imposed discontinuity location on the simulated volume and these surfaces are a thick spherical shell of one voxel.

These results exhibit that H-DVC algorithm is necessary to treat data issued from an experimental test and further the H-



Fig. 6 Comparison between DVC and H-DVC results of the residual ϕ of the calculation process in gray level (gl) and the von Mises equivalent strain for the opening mode



DVC was applied in the case of a tensile test (mode I) on a real pre-cracked specimen to demonstrate performance compared to classical DVC.

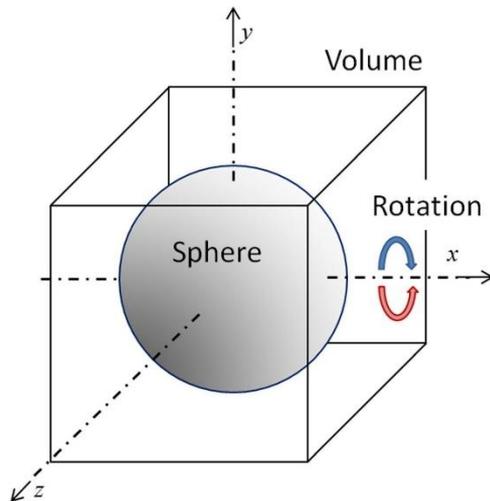


Fig. 7 Schematization of imposed sliding mode along the x-axis. The blue arrow shows the sense of rotation of the sphere and the red arrow the sense of rotation of the volume

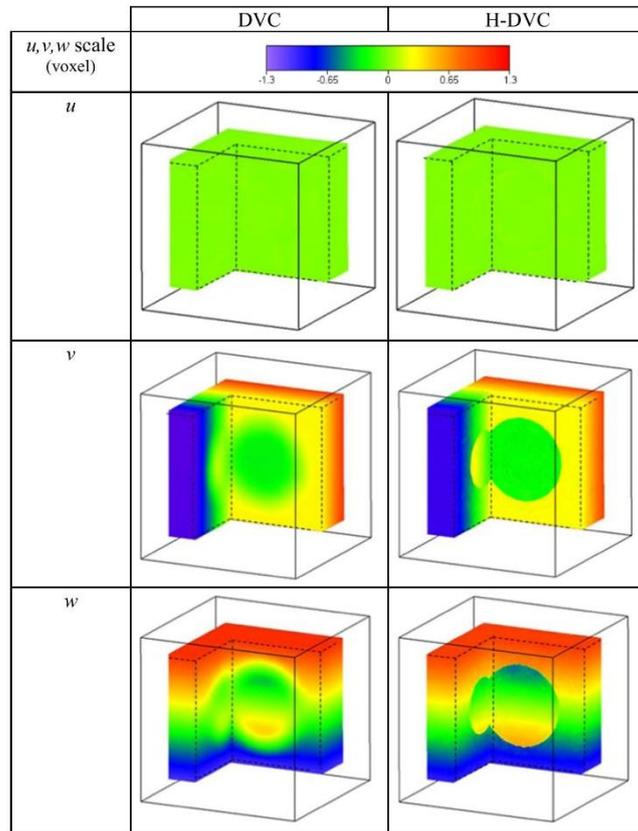
Application to the Study of Polymer under Opening Loading

The proposed application is a three dimensional study of pre-cracked specimen realized in polypropylene polymer and loaded in mode I. The crack was created with a cutter blade before the loading and during the tensile loading. The material of specimen has an elasto-plastic behavior with Young's modulus equivalent to 1.25 GPa, the yield strength of 25 MPa and corresponding yield strain of 4%. However, the two-dimensional tests performed at high loading speed (equal to 5 mm/s given $\dot{\epsilon} = 5 \text{ min}^{-1}$) show a brittle behavior of this material.

The tomography has been carried out in Pprime Institute with an Ultratom scanner from RX Solutions with a Hamatsu X-ray source (150 kV, 75 W) and a Paxscan Varian flat panel imager (1920x1536pixels with a pixel size 127 μm). The scans were performed at 80 kV and 375 μA , with a frame rate of eight images per second. Each projection was the result of an averaging of ten images. A specific tensile testing set-up (Fig. 12) has been loaded into the tomography device for *in situ* testing [9] on the pre-cracked specimen. For each loading step, a set of 1440 projections were recorded during rotation of the sample, step by step, over 360°.



Fig. 8 Comparison between DVC and H-DVC results of u , v and w displacements for the rotation along the x -axis



As the polymer used for this work is homogenous, there were no density variations at the observation scale and thereby no gray level variations observed by X-ray tomography. It is possible to create 3D gray level distribution necessary for DVC by adding some particles with a different density [9]. Particles of zinc (3% of the mass) were added during the manufacturing of the specimen (injection in a mold). To reduce possible residual stresses due to the building process, the specimen has been machined and polished. To verify that no mechanical behavior alterations occur, classical traction tests have been carried out and it exhibits negligible modifications in the domain of study (0 to 0.4 mm/mm). Aftermost, as a polypropylene polymer material have low viscoelastic properties and as a volume recording takes a minimum of 30 min, a couple of precautions been taken like rest time of 5 min between loading and volume recording, and a high speed loading equal to 5 mm/s. Moreover, no crack propagation has been observed during the time acquisition of volumes. After

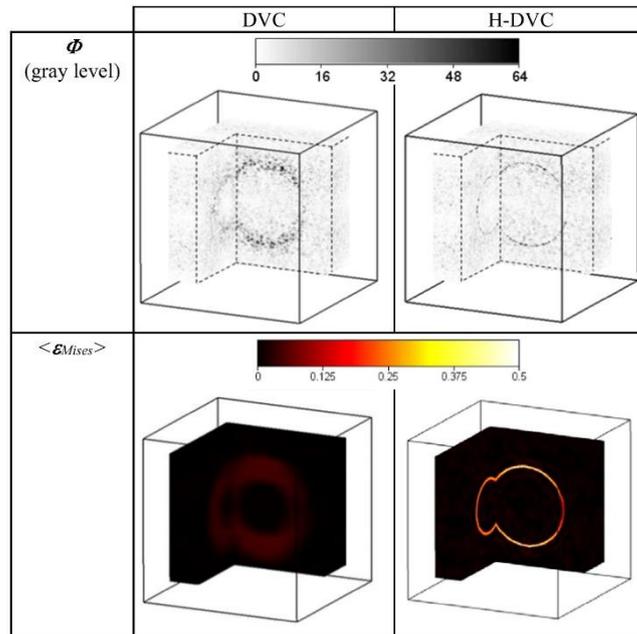
reconstruction, the voxel size is equal to 14.36 μm given a global volume of 1382x1320x1310 voxels.

Due to all these above precautions, volumes obtained do not exhibit any trace of movements during the acquisition. Figure 13(a) represents the dimensions of the specimen. Figure 13(b) illustrates the region of interest (ROI) alongside initial and final volumes used for the “low resolution data” and their location on the entire specimen. It shows the initial and the final volume used for the “high resolution data”, and their location in the volume used for the “low resolution data”.

- Volumes used for “low resolution data” made from 1024x920x968 voxels, with a calculation grid of 8x8x8, given a resulting volume of 128x115x121 data (1.8 M data).
- Volumes used for “high resolution data” built from 394x406x968 voxels, with a calculation grid of 2x2x2, given a resulting volume of 197x203x484 data (20 M data).



Fig. 9 Comparison between DVC and H-DVC results of the residual ϕ of the calculation process in gray level (gl) and the von Mises equivalent strain for the rotations along the x-axis



These two volume properties have been chosen:

- In the first case, to access to the large dimension of measurement, which not provide the powerful of the H-DVC comparing to DVC, but can give kinematical field easily comparable to the literature [13].
- In the second case, to do a focus on the interesting zone in the neighborhood of the crack tip to better observe local phenomena.

All calculations were made using DVC and H-DVC with a subset equal to $40 \times 40 \times 40$ voxels, according to the number of particles present in a subset [28].

The proposed initial loading state corresponds to a displacement of 0.96 mm giving a loading force of 1505 N. From Figs. 14 and 15, exceptional results could be observed for the three displacement components. Globally, symmetrical behaviors of u, w displacement components and anti-symmetrical behavior of v displacement component are observed, with a little mode III observable on the w displacement component on both sides of the lips. Using DVC and H-DVC, from the Fig. 16, it can be noticed on the von Mises equivalent strain map that the development of the deformation was in the form of a classical butterfly wing at the front and the back of the specimen (z axis) and far away from the tip. In the center of the specimen, DVC shows ambiguous results that are difficult to interpret. With

H-DVC, a phenomenon of nearer multiple fractures was observed. Values of von Mises equivalent strain are under the yield strain of the material except at the fracture positions, assumed or known. Assuming that the specimen maintains a confined plasticity it can be possible to evaluate the Stress Intensity Factor (SIF) using classical equations [29]. For a crack length of 5.1 mm and a mean measured Crack Opening Displacement (COD) of 0.35 mm, the global SIF (K_{Ig}) evaluated to $3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ with the assumptions of plane stress.

These results obtained with “low resolution data” are not sufficient to observe accurately what happens near the crack tip. This is why an observation at “high resolution” was performed.

For the same loading condition, another dimension of a subset size ($12 \times 12 \times 12$ voxels) was used for DVC to observe the similitudes and differences between DVC and H-DVC.

Figure 16 shows what was suspected with the low resolution. Initially, the crack line observed with $40 \times 40 \times 40$ DVC is not legitimate, while it is more linear with H-DVC and $12 \times 12 \times 12$ DVC. High resolution data show that the crack was not perfectly along the plane xz , explaining the presence of a little mode III. The proposed method can localize more accurately a developed crack. Moreover, it can be observed that H-DVC can capture little cracks when DVC can only view strain (i.e. strain values inferior to yield strain of 4%). At the front and the back views of the specimen, the



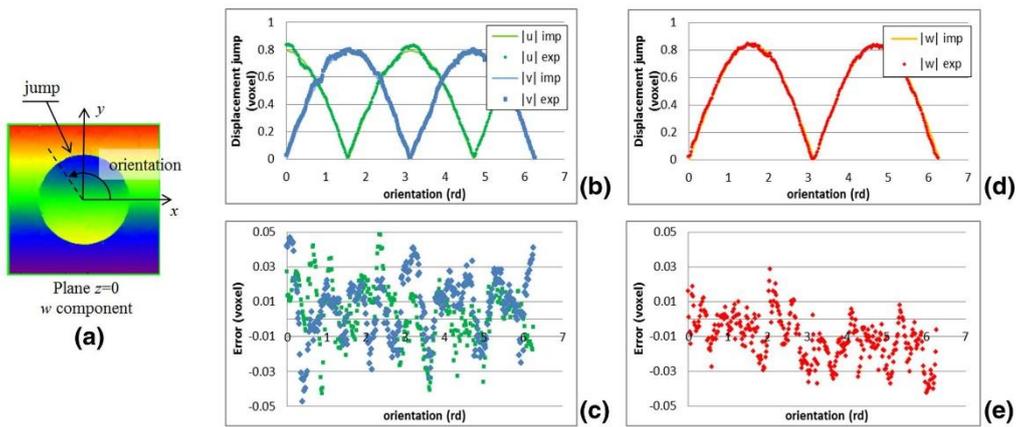


Fig. 10 (a) map of w component extracted from the plane at $z = 0$. The orientation is centered at $x = y = z = 0$. (b) Comparison between absolute values of measured and imposed u, v displacement jumps for the opening mode ($w = 0$). (c) The errors resulting from the differences between imposed and measured displacement jumps along x and y axes. (d) Comparison between absolute values of measured and imposed w displacement jump for the sliding mode ($u = v = 0$). (e) The error resulting from the differences between imposed and measured displacement jumps along the z -axis

phenomenon was less developed even though it is present. At the front view, it can be observed with H-DVC an initiation of crack propagation.

In the center of the specimen, there is no ambiguity and micro cracks observed, which for some of them are very well developed. Reporting details observed using H-DVC, on the $12 \times 12 \times 12$ DVC map, it can be observed the same localization but down in the noise.

The material is not under a plasticity regime, but under a micro-cracks coalescence regime. However, H-DVC offers here a very precious evaluation of the mechanical behavior of the studied material.

From these observations, an extraction of von Mises strain values over the yielding strain limit (4%) confirms that the plasticity was confined (only a few voxels surrounding the front exceeded the yielding strain limit).

Fig. 11 Von Mises results allowing the extraction of the discontinuity sphere in the two previous cases (opening mode and sliding mode). Values under 0.15 are transparent (blue pattern in the legend) to better see the discontinuity in the volume

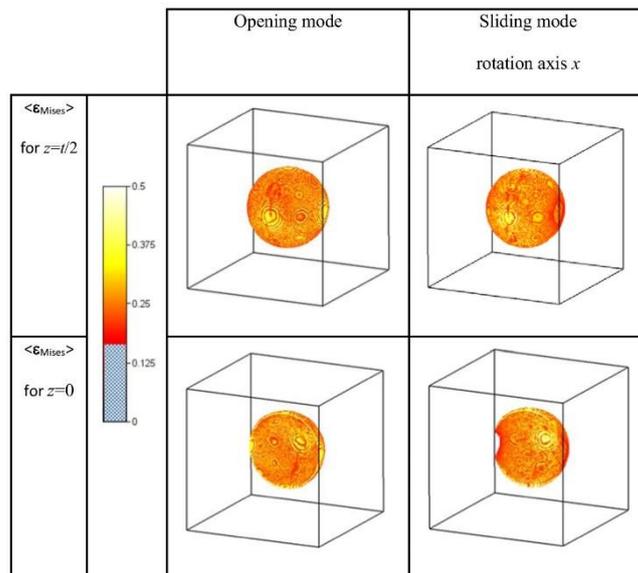
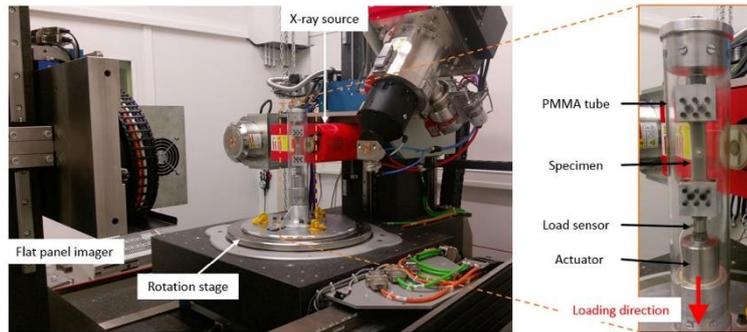


Fig. 12 X- μ CT device with *in situ* specific tensile testing rig and the pre-cracked specimen

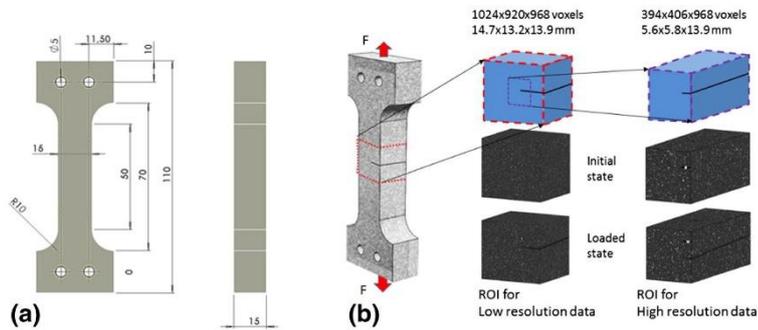


Considering that the principal mode activated locally in this test, is always in opening mode I. The crack opening displacement (COD) along the z -axis can be calculated from the jump in y displacement axis (v component). This extraction was done in all the volume as shown in below Fig. 17. Applying a threshold of 0.1 voxels (limit of crack detection) to the COD map, it perchance possible to show the localization of the micro-cracks in the volume (Fig. 17(a)). Micro-cracks are present all along the z -axis, but widely developed at the center of the specimen (z near 0). This observation confirms that the plasticity is well confined, and corresponds to a brittle behavior of the material due to the high speed loading (5 mm/s). Therefore, it is possible to evaluate the local stress intensity factor (SIF) for this loading. Using the same equations as that of classical fracture mechanics [29] and with the assumption of plane stresses, it is possible to determine the tensile KI from the COD measurement at each z slice and for each method (DVC and H-DVC). Figure 17(b) shows different values of local KI measured along the z -axis, and the global KIg. Theoretical values ($KI_{c th}$) given by the literature [30, 31] represented as a blue zone in Fig. 17(b).

When DVC method used, the local measured KI DVC are higher than the SIF critical value given by the literature ($4.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), and higher than that of global measured KIg as shown in Fig. 17(b). In other words, especially at the center of the specimen (where H-DVC method shows developed micro-cracks) DVC SIF values are higher than the limit of the theoretical critical SIF and different from the global SIF evaluation. This difference can be explained by the under evaluation of the crack length from the DVC method. However, from H-DVC results, the crack length was evaluated precisely (Fig. 17(b)) given lower values of KI. In the center of the specimen, where the cracks are widely developed, local stress intensity factors fall to values lower than those calculated from the specimen borders. It can be observed, a correlation between the local KI values (Fig. 17(b)) and the top view representation of the COD (Fig. 17(a)).

From the observation made from local KI repartition along the z -axis, it shows that the structure is under but very close to the theoretical KI_c limit. Especially at the center of the specimen, where the crack has propagated, leading to a decreasing local stress intensity factor. With H-DVC, local KI is much conformed to that of global evaluation of stress intensity factor.

Fig. 13 (a) Dimensions of the specimen. (b) The region of interest (ROI) in red color for "Low-resolution data" surrounding the crack, and region of interest in purple color for "high resolution data" measurement focused on the crack. For the two chosen ROI, volumes in initial and final states are shown (the crack appears in black)



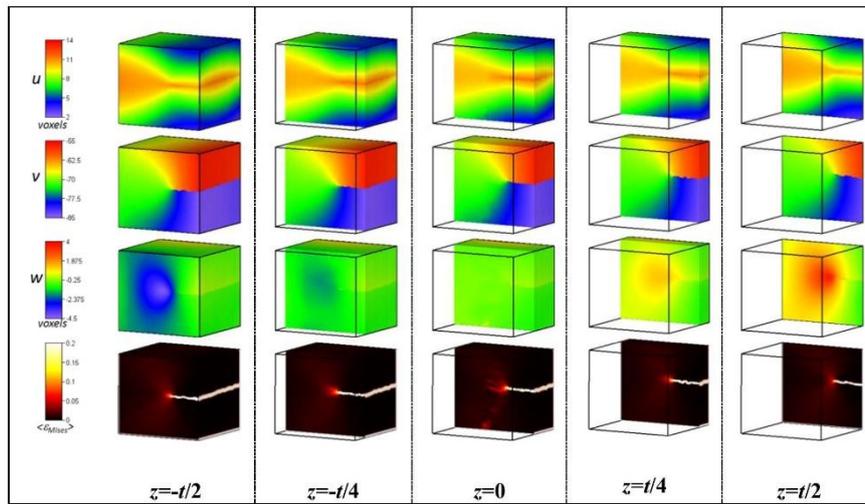


Fig. 14 Conventional DVC results showing the kinematical field (u, v, w) and the von Mises equivalent strain maps, for the first loading 1505 N. These results are conventional compared to those obtained in literature, with a strain development with the well-known butterfly wing

Discussion and Conclusion

A novel Digital Volume Correlation (DVC) approach was proposed for identification of the presence of cracks. The proposed method is based on the classical one, but the kinematical representation was enriched by a Heaviside function allowing the separation of the subset into two parts. A

description of this new principle H-DVC (Heaviside based Digital Volume Correlation) was demonstrated and introduced the process of separation into two part each analyzed subsets. This principal led to adding three components of kinematical jump and three other parameters defining the position of the jump plan in the subset. After arguing the choice of using a tricubic interpolation of gray levels, it was proposed to build

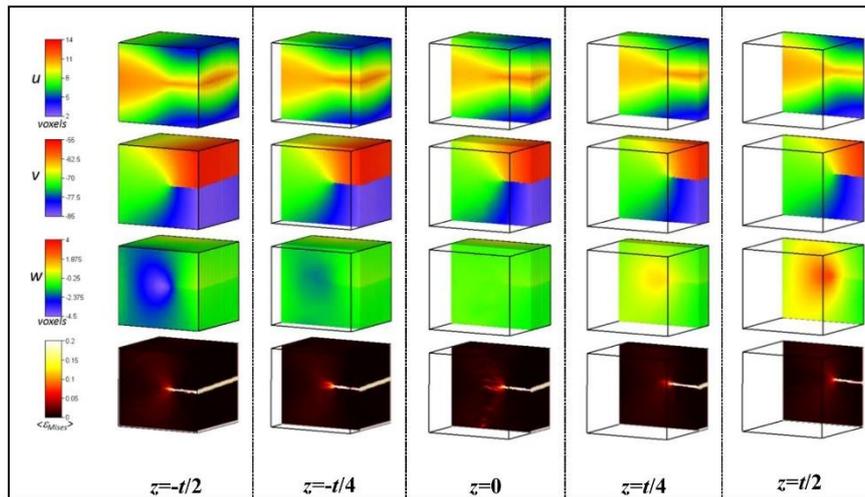


Fig. 15 H-DVC results showing the kinematical field (u, v, w) and the von Mises equivalent strain maps, for the first loading 1505 N. Some particular phenomena can be observed near the crack tip, which can be linked to a starting of crack propagation



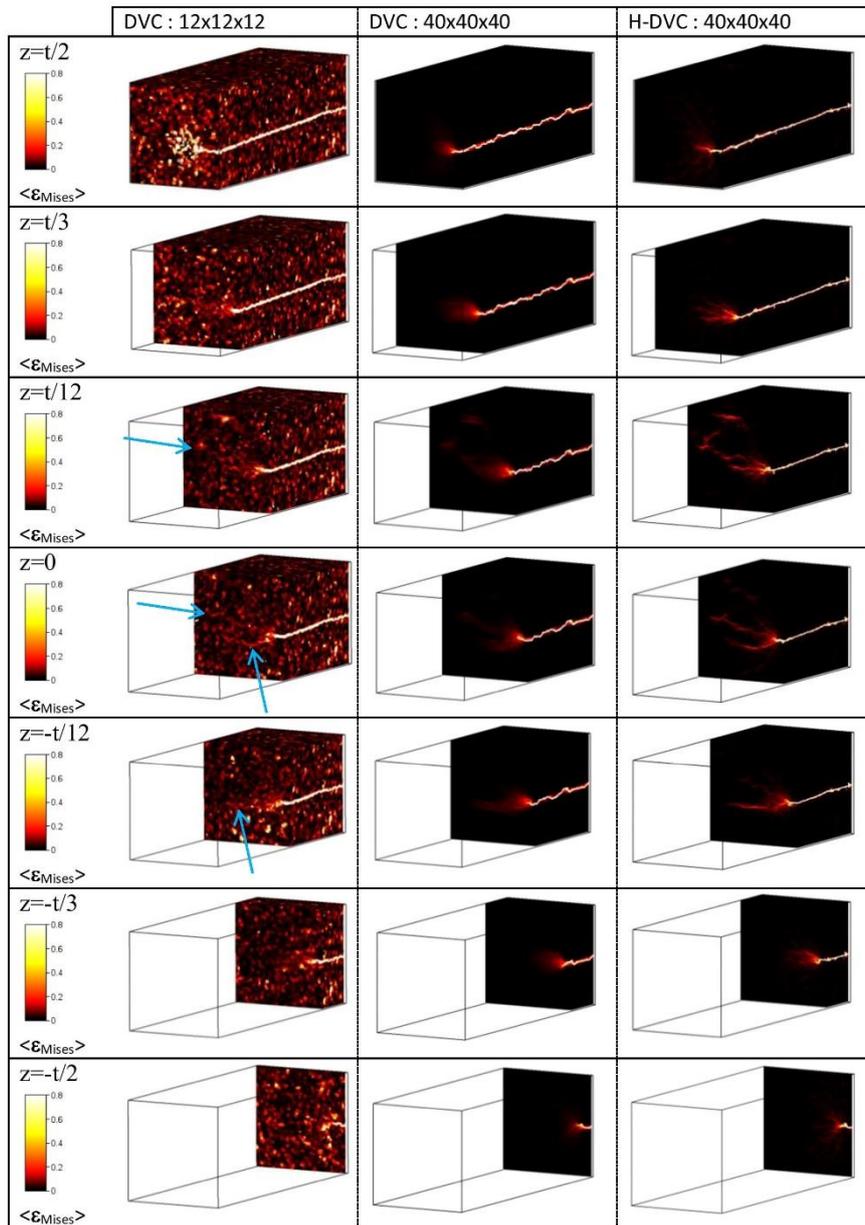


Fig. 16 Comparisons of the high resolution von Mises equivalent strain maps, for two conventional DVC analyses using a subset size of respectively 12x12x12 and 40x40x40 voxels for the subset, and for H-DVC analysis and a subset size of 40x40x40 voxels. This figure shows the benefit of the H-DVC giving low noise and high spatial resolution, very well adapted to the measurement in presence of discontinuities. Blue arrows focus on fracture details observable in the DVC 12x12x12 map



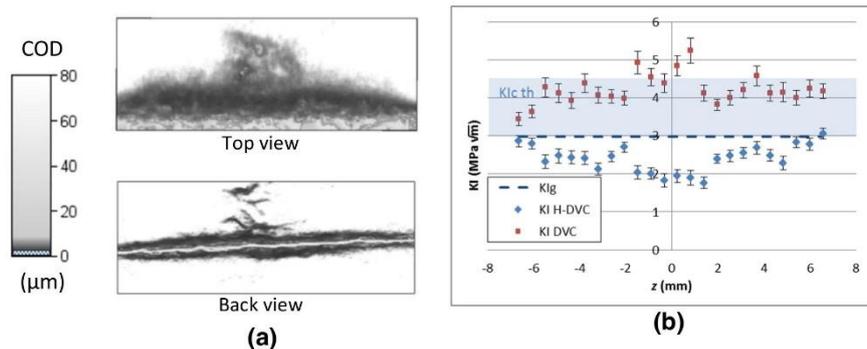


Fig. 17 **a)** Top view and back views of the high resolution Crack Opening Displacement (COD) maps, for H-DVC analysis and a subset size of $40 \times 40 \times 40$ voxels. Values under 0.1 voxels are represented as transparent (blue pattern in the legend) to better observe the development of micro-cracks and their positions in the volume. These cracks localized in the center of the specimen. **b)** Stress Intensity Factor (SIF) calculated from COD and crack length using DVC and H-DVC analyses. Comparison of evaluated global and local KI from these two techniques (respectively KI_g, KI DVC and KI H-DVC) and from literature (KI_{lc th})

volumes that mimic those obtained by tomography. To demonstrate the performances of the proposed method, volumes including opening mode discontinuities and sliding modes were studied. A direct comparison was made between these analyses and those obtained by classical DVC. These first results have confirmed better performances of the proposed H-DVC method and it could precisely detect discontinuities in all directions. The capture limit evaluated to 0.1 voxel as in the two dimensional version of this method. In addition, a study on polypropylene material was schemed to highlight the potentiality of the proposed method. The polypropylene specimens were build using zinc powder, which are to be analyzed using X-ray μ Tomography. A state of Mode I loading was applied to the specimen using a “low resolution” analysis (resolution step equal to 8 voxels). To better examine the benefits of the H-DVC method, a “high resolution” analysis was performed with a step of measurement for every two voxels. In this last condition, a small subset size and large subset size using DVC was compared to a large subset size using H-DVC. At this resolution, the superiority of the proposed H-DVC method was advertised, retrieving small details which can only be observable with small subsets, but without noise. In addition, micro-cracks are observed with low strain surrounding which can conclude that the material exhibit brittle behavior. Thin horizontal cracks, which have propagated far from the initial crack tip and localized at the center of the specimen was observed.

Using local Crack Opening Displacement (COD) and local Stress Intensity Factor (SIF), KI was calculated from slices along the z axis assuming plane stress conditions and compared to the global one (KI_g). From the classical DVC data, local KI is over evaluated, because the real position of the front is unknown. However using H-DVC data, the same calculations gave local KI more immediate to the global one and under the

critical limits as that of literature. The proposed H-DVC method when coupled to a parallelized computation gave access to information which indeed not observable using classical DVC method, allowing a better evaluation of the distribution of localization phenomena in volumes under loading.

Acknowledgements This work was partially funded by the French Government program “Investissements d’Avenir” (EQUIPEX GAP, reference ANR-11-EQX-0018).

References

1. Bay BK, Smith TS, Fyhrie DP, Saad M (1999) Digital volume correlation: three-dimensional strain mapping using X-ray tomography. *Exp Mech* 39:217–226. <https://doi.org/10.1007/BF02323555>
2. Smith TS, Bay BK, Rashid MM (2002) Digital volume correlation including rotational degrees of freedom during minimization. *Exp Mech* 42:272–278. <https://doi.org/10.1007/BF0241098>
3. Franck C, Hong S, Maskarinec SA et al (2007) Three-dimensional full-field measurements of large deformations in soft materials using confocal microscopy and digital volume correlation. *Exp Mech* 47:427–438. <https://doi.org/10.1007/s11340-007-9037-9>
4. Germaneau A, Doumalin P, Dupré J-C (2007) Full 3D measurement of strain field by scattered light for analysis of structures. *Exp Mech* 47:523–532
5. Roux S, Hild F, Viot P, Bernard D (2008) Three-dimensional image correlation from X-ray computed tomography of solid foam. *Compos Part Appl Sci Manuf* 39:1253–1265. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.11.011>
6. Vitone C, Cotecchia F, Viggiani G, Hall SA (2013) Strain fields and mechanical response of a highly to medium fissured bentonite clay. *Int J Numer Anal Meth Geomech* 37:1510–1534. <https://doi.org/10.1002/nag.2095>
7. Bay BK (2008) Methods and applications of digital volume correlation. *J Strain Anal Eng Des* 43:745–760. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA436>



8. Hall SA, Desruets J, Viggiani G, Besuelle P, Ando E (2012) Experimental characterisation of (localised) deformation phenomena in granular geomaterials from sample down to inter- and intra-grain scales. *Procedia IUTAM* 4:54–65. <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2012.05.007>
9. Brault R, Germaneau A, Dupré JC et al (2013) *In-situ* analysis of laminated composite materials by X-ray micro-computed tomography and digital volume correlation. *Exp Mech* 53:1143. <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9730-9>
10. Madi K, Tozzi G, Zhang QH et al (2013) Computation of full-field displacements in a scaffold implant using digital volume correlation and finite element analysis. *Med Eng Phys* 35:1298–1312. <https://doi.org/10.1016/j.medengphys.2013.02.001>
11. Roberts BC, Perilli E, Reynolds KJ (2014) Application of the digital volume correlation technique for the measurement of displacement and strain fields in bone: a literature review. *J Biomech* 47:923–934. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.01.001>
12. Forsberg F, Mooser R, Arnold M et al (2008) 3D micro-scale deformations of wood in bending: synchrotron radiation μ CT data analyzed with digital volume correlation. *J Struct Biol* 164:255–262. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2008.08.004>
13. Barranger Y, Doumalin P, Dupré J-C et al (2009) Evaluation of three-dimensional and two-dimensional full displacement fields of a single edge notch fracture mechanics specimen, in light of experimental data using X-ray tomography. *Eng Fract Mech* 76:2371–2238. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.08.001>
14. Réthoré J, Tinnes J-P, Roux S et al (2008) Extended three-dimensional digital image correlation (X3D-DIC). *Comptes Rendus Mécanique* 336:643–649. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2008.06.006>
15. Limodin N, Réthoré J, Buffière J-Y et al (2009) Crack closure and stress intensity factor measurements in nodular graphite cast iron using three-dimensional correlation of laboratory X-ray microtomography images. *Acta Mater* 57:4090–4101. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.05.005>
16. Pan B, Qian K, Xie H, Asundi A (2009) Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Meas Sci Technol* 20:062001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001>
17. Reu P (2012) Hidden components of DIC: calibration and shape function - part 1. *Exp Tech* 36:3–5. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00821.x>
18. Valle V, Laou L, Léandry I et al (2017) Crack analysis in mudbricks under compression using specific development of stereo-digital image correlation. *Exp Mech*. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0363-2>
19. Valle V, Hedan S, Cosenza P et al (2015) Digital image correlation development for the study of materials including multiple crossing cracks. *Exp Mech* 55:379–391. <https://doi.org/10.1007/s11340-014-9948-1>
20. Wang T, Jiang Z, Kemao Q et al (2016) GPU accelerated digital volume correlation. *Exp Mech* 56:297–309. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0091-4>
21. Sutton MA, McNeill SR, Jang J, Babai M (1988) Effects of subpixel image restoration on digital correlation error estimates. *Opt Eng* 27(10):271070. <https://doi.org/10.1117/12.7976778>
22. Reu P (2012) Hidden components of 3D-DIC: interpolation and matching - part 2. *Exp Tech* 36:3–4. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00838.x>
23. Bruck HA, McNeill SR, Sutton MA, Peters WH (1989) Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction. *Exp Mech* 29:261–267. <https://doi.org/10.1007/BF02321405>
24. Pan B, Wang B, Wu D, Lubineau G (2014) An efficient and accurate 3D displacements tracking strategy for digital volume correlation. *Opt Lasers Eng* 58:126–135. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.02.003>
25. Lekien F, Marsden J (2005) Tricubic interpolation in three dimensions. *Int J Numer Methods Eng* 63:455–471. <https://doi.org/10.1002/nme.1296>
26. Germaneau A, Doumalin P, Dupré J-C (2008) Comparison between X-ray micro-computed tomography and optical scanning tomography for full 3D strain measurement by digital volume correlation. *NDT E Int* 41:407–415. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.04.001>
27. Réthoré J, Hild F, Roux S (2007) Shear-band capturing using a multiscale extended digital image correlation technique. *Comput Methods Appl Mech Eng* 196:5016–5030. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2007.06.019>
28. Sutton MA (2008) Digital image correlation for shape and deformation measurements. In: Sharpe WN (ed) *Springer handbook of experimental solid mechanics*. Springer US, Boston, MA, pp 565–600
29. Williams ML (1957) On the stress distribution at the base of a stationary crack. *J Appl Mech* 24:109–114
30. Ashby MF (2011) *Materials selection in mechanical design*. Butterworth-Heinemann, Burlington, MA
31. Friedrich K (1978) Analysis of crack propagation in isotactic polypropylene with different morphology. In: Fischer EW, Müller FH, Bonart R (eds) *Physik der Duroplaste und anderer Polymerer*. Steinkopff, Darmstadt, pp 103–112

