



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

NANCY-UNIVERSITÉ
INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy
Laboratoire Environnement, Géomécanique et Ouvrages
Ecole Doctorale RP2E

THÈSE

Présentée en vue du grade de

DOCTEUR DE L'I. N. P. L
en Génie Civil – Hydrosystèmes - Géotechnique

Par

Mouhammed ABDALLAH

Vulnérabilité des ouvrages en maçonnerie à des mouvements de terrain :
méthodologie d'analyse par méthodes statistiques et par plans d'expériences
numériques sur les données de la ville de Joeuf

Soutenue publiquement le 06 mai 2009

Devant le jury composé de

Isam SHAHROUR	Rapporteur
Fabrice EMERIAULT	Rapporteur
Jack-Pierre PIGUET	Président
Ahmed MEBARKI	Examineur
Marwan AL-HEIB	Examineur
Thierry VERDEL	Examineur, Directeur de thèse
Olivier DECK	Invité

REMERCIEMENTS

Mes profonds remerciements s'adressent d'abord à mon directeur de thèse, Monsieur Thierry Verdel, pour avoir dirigé ma thèse au niveau scientifique et pratique et pour son aide compétente, sa patience et ses encouragements à parfaire ce travail entrepris il y a 3 ans. Son œil critique m'a été très utile pour structurer ce travail et en améliorer les contenus.

Je tiens à remercier Monsieur Jack-Pierre Piguet qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de mon jury de thèse, sans oublier toutes ses contributions en faveur du Laego.

Je remercie Monsieur Isam Shahrour et Monsieur Fabrice Emeriault pour leur accord à rapporter sur ma thèse et leur attention accordée à mon travail.

Je remercie également Monsieur Ahmed Mebarki et Monsieur Marwan Al Heib pour tous les efforts fournis à examiner ma thèse.

Je remercie aussi considérablement Monsieur Yves Gueniffey et Monsieur Deck pour leurs conseils permanents et leurs compétences apportées à la bonne réalisation de cette recherche et je remercie également ce dernier d'avoir accepté d'apporter son point de vue au moment d'évaluer ce travail

Mes remerciements vont aussi à Mme Véronique Soukatchoff pour sa générosité et sa sympathie ainsi qu'à Mme Siatka, pour les mêmes raisons.

Je voudrais cordialement accorder toutes mes remerciements à tous ceux qui ont été disponibles pour répondre à des questions utiles et éclaircir mes incertitudes, à ceux qui m'ont encouragé et poussé mes efforts tout au long de ces 3 années.

Et je remercie aussi la société Total pour son soutien financier et scientifique à la réalisation de ce travail, qui s'est partiellement inscrit dans le projet « Etude de phénomènes complexes par plans d'expériences et surfaces de réponse » coordonné par M. Bernard Corre.

Mes vifs remerciements à la fondation Harriri, coordonnée par M. Zanhour Marwan responsable de la formation d'étude, pour leur soutien financier. Ma gratitude aussi à toute la famille Harriri (M^{me} Nazek Harriri) et également à Monsieur Saad Harriri.

Je remercie M. Ali Ismail, directeur de la formation à l'Université Libanaise (Institut universitaire de Technologie à Saïda) et à tous mes enseignants au Liban sans exception.

Ma gratitude exceptionnelle à Mon oncle Ghassan ABDALLAH qui m'a soutenu de près et de loin afin de contribuer à réussir mon travail.

Enfin, je remercie ma très chère femme Bochra à qui je dédie mon travail pour son soutien moral et sa présence permanente à mes côtés durant ces dernières années.

Sans oublier ma propre famille pour son support, ses encouragements et son sacrifice afin de me permettre de réaliser mes ambitions.

TABLE DES MATIERES

Introduction	17
Chapitre 1 : Contexte théorique et Pratique	23
1. Le Risque.....	25
2. Aléa et Risque minier	26
2.1. Les affaissements miniers	26
2.2. Description générale des mouvements de terrain et de leurs conséquences	28
3. La vulnérabilité	34
3.1. Généralités.....	34
3.2. Endommagement des ouvrages en maçonnerie	36
4. Interaction Sol-Structure	40
Chapitre 2 : Matériel et Méthodes.....	43
1. Matériel : données et outils utilisées	45
1.1. Site de Joeuf (54).....	46
1.2. La base de données sur la ville de Joeuf	48
1.3. Méthode des éléments distincts et modèle numérique de base employé	54
1.3.1. Méthode des éléments distincts.....	54
1.3.2. Modèle numérique de base employé.....	55
1.4. Modèle de cuvette retenu	57
1.5. La méthodologie des plans d'expérience	60
2. Méthodes	62
2.1. Analyse de la variance.....	62
2.1.1. Résultat de l'analyse pour un mur en position 1 (Zone convexe).....	63
2.1.2. Résultat de l'analyse pour un mur en position 2 (zone concave).....	66
2.2. Régression linéaire multiple.....	68
2.2.1. Résultat de l'analyse pour un mur en position 1 (zone convexe).....	68

2.2.2.	Résultat de l'analyse pour un mur en position 2 (zone concave).....	70
2.3.	Analyse en composantes principales (ACP)	71
2.4.	Classification ascendante hiérarchique	71
2.5.	Régression sur les composantes principales (ou orthogonale).....	72
2.6.	Conclusions	73
Chapitre 3 : Résultats et Discussions		77
1.	Résultats et Discussions	79
1.1.	Analyse statistique préliminaire et typologie des habitations de la ville de Joëuf	79
1.2.	Présentation et analyse du groupe 1	85
1.2.1.	Comportement mécanique des maisons du groupe 1 en zone convexe	87
1.2.2.	Régression multiple et colinéarité (ouvrages en zone convexe)	88
1.2.3.	Régression sur les composantes principales du groupe 1 (ouvrages en zone convexe) 90	
1.2.4.	Comportement mécanique des maisons du groupe 1 en zone concave.....	93
1.2.5.	Régression sur les composantes principales de groupe 1 (ouvrages zone concave) 94	
1.3.	Présentation et analyse du groupe 2	95
1.3.1.	Comportement mécanique des maisons du groupe 2 en zone convexe	97
1.3.2.	Régression multiple et colinéarité (ouvrage en zone convexe).....	98
1.3.3.	Régression sur les composantes principales du groupe 2 (ouvrages en zone convexe) 99	
1.3.4.	Comportement mécanique des maisons du groupe 2 en zone concave.....	101
1.3.5.	Régression sur les composantes principales du groupe 2 (ouvrages en zone concave) 102	
1.4.	Présentation et analyse du groupe 3	103
1.4.1.	Comportement mécanique des maisons du groupe 3 en zone convexe	105
1.4.2.	Régression sur les composantes principales du groupe 3 (ouvrages en zone convexe) 106	
1.4.3.	Comportement mécanique des maisons du groupe 3 en zone concave.....	108

1.4.4. Régression sur les composantes principales du groupe 3 (ouvrages en zone concave) 109	
1.5. Présentation et analyse du groupe 4	110
1.5.1. Comportement mécanique des maisons du groupe 4 en zone convexe	112
1.5.2. Régression sur les composantes principales du groupe 4 (ouvrages en zone convexe) 113	
1.5.3. Comportement mécanique des maisons du groupe 4 en zone concave.....	115
1.5.4. Régression sur les composantes principales du groupe 4 (ouvrages en zone concave) 116	
Conclusions et Perspectives	119
Références bibliographiques	125

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

Notations principales :

τ : Contraintes tangentielles

$\tau_{\max}$: Contraintes tangentielles maximale

σ_1 : Contraintes principales majeure

j_{ks} : Raideur tangentielle de joints

j_{kn} : Raideur normale de joints

j_{tens} : Résistance à la traction de joints

j_{fric} : Angle de frottement de joints

ρ : Masse volumique
linéaire

b_i : coefficients de régression estimés
fissures

U_s : déplacements en cisaillement

S : espacement des joints

σ_n : Contraintes normales

E : Module de Young

j_{coh} : cohésion de joints

E_e : Module de Young Equivalent

E_e : Module de Young Equivalent

β_i : Coefficients de régression

L_c : Longueur cumulée des

Abréviations principales :

Long : Longueur des maisons

Haut : Hauteur des maisons

NOD : Nombre d'ouvertures
et fenêtres

H/L : Elancement
ouvertures à la surface totale

Niv : Nombre d'étages

St : Surface totale

Sv : Surface des ouvertures (portes

(Sv/St) : Rapport de la surface des

RESUME

Le contexte de notre étude est celui des affaissements miniers, plus particulièrement en Lorraine. Quand ils surviennent en milieu urbanisé, ils engendrent des dommages aux habitations dont la plupart sont des maisons en maçonnerie traditionnelle.

Quand de telles habitations sont soumises aux effets d'un affaissement minier, elles subissent en effet des désordres qui résultent des efforts engendrés dans la structure par le mouvement du terrain. Il en résulte une réponse de la structure qui dépend de ses caractéristiques géométriques, physiques et mécaniques. Or, la nature discontinue des maçonneries et la complexité des interactions entre blocs dans ces maçonneries rend complexe et difficile la détermination de cette réponse. Il en est de même de l'interaction sol-structure.

L'objectif de la recherche consiste donc à étudier, par modélisation numérique avec la méthode des éléments distincts et par la technique des plans d'expérience et des surfaces de réponse, le comportement d'ouvrages en maçonnerie soumis à un affaissement minier caractéristique et à dégager de cette étude des critères permettant d'estimer, à l'échelle d'une ville entière, la vulnérabilité de tous ses bâtiments.

Une première analyse simplifiée expose le principe de la démarche qui est ensuite mise en œuvre à l'échelle de la ville de Joeuf, utilisée comme site pilote. Elle repose sur l'analyse de la longueur cumulée des joints ouverts, assimilés à la formation de fissures dans la structure.

Pour cela, une analyse typologie permet de distinguer tout d'abord 4 groupes de maisons aux caractéristiques proches. Sur chacun de ces groupes, la démarche est ensuite appliquée de manière systématique. Elle repose sur la prise en considération des caractéristiques géométriques des façades et aboutit à la formulation de fonctions de vulnérabilité.

Ces formulations font appel à la technique de régression sur composantes principales qui permet de s'affranchir des colinéarités entre variables explicatives. De même, elles sont obtenues pour les deux positions les plus défavorables dans la cuvette d'affaissement où la courbure du terrain est maximale.

L'analyse mécanique montre que, malgré la non-prise en compte de l'interaction sol-structure, nous arrivons à restituer un endommagement compatible avec des observations de terrains.

Les résultats obtenus sont donc encourageants et permettent d'envisager l'implémentation des fonctions de vulnérabilité ainsi obtenues dans un simulateur de dommages qui reste à développer.

Mots clés : Risque, Aléa, vulnérabilité, modélisation numérique, plans d'expérience, régression multiple, ACP, CAH, régression orthogonale

ABSTRACT

The context of our study concerns mining subsidence, particularly in Lorraine (France). When mining subsidence events occur in an urban environment, they cause damages on housing which most of them are traditional masonry houses.

When those houses are subjected to a mining subsidence event, they suffer disorders resulting from efforts in the structure caused by the movement of the ground. The result is a response of the structure that depends on its geometrical, physical and mechanical characteristics. However, the discontinuous nature of the masonry and the interactions complexity between masonry blocks makes it difficult to determine that response. The same is true of the soil-structure interaction.

The purpose of this research is to study, by numerical modeling with the distinct element method, experimental design planning and response surfaces, the behavior of masonry structures subjected to a typical mining subsidence event and to define from this study some criteria making possible the estimation of the vulnerability of all the buildings of a city.

A first simplified analysis describes the principle of the used methodology which is then applied to the study of all houses of the city of Joeuf, used as a pilot site. This methodology is based on an analysis of the total length of the opened joints, which are considered as similar to cracks in the structure.

For this, a typology analysis helps first to distinguish 4 groups or types of houses which have similar characteristics. On each of these groups, the methodology is applied consistently, is based on the geometrical characteristics of the houses facades and then leads to the formulation of vulnerability functions.

These formulations rely on the technique of regression on principal components that allow to get rid of co-linearity between variables. Similarly, they are obtained for the two worst positions in the subsidence curve where the curvature is maximal.

The mechanical analysis shows that, even without taking into account the soil-structure interaction, we get damage results consistent with ground surface observations.

The obtained results are encouraging and allow considering the implementation of the vulnerability functions in a damage simulator to be developed.

Keyword: risk, hazard, vulnerability, masonry, experimental design, multiple regression, PCA, HCA, orthogonal regression

INTRODUCTION

De nombreuses régions dans le monde sont affectées par l'effondrement d'ouvrages souterrains (en particulier d'ouvrages miniers) qui se manifestent à la surface par la formation d'une dépression prenant le nom de cuvette d'affaissement. Ces mouvements de terrain, lents ou rapides, menacent alors les ouvrages en surface comme les habitations.

En Lorraine, de tels affaissements se sont produits à plusieurs reprises. Parmi les plus récents, les deux affaissements d'Auboué et Moutiers en 1996 ont entraîné la destruction d'une centaine d'habitations (Zihri, 2004). Une très grande partie des zones urbanisées en Lorraine est aujourd'hui exposée à cet aléa et le zonage des zones à risques est en cours. La ville de Joeuf fait partie de ces villes menacées par ce problème, c'est pourquoi nous l'avons choisie comme cas d'étude pour l'analyse des dommages potentiels pouvant survenir après un affaissement minier.

L'évaluation des risques dans chaque zone étudiée impose la détermination, d'une manière ou d'une autre, de la probabilité d'occurrence d'un affaissement d'une part et de la gravité de ses conséquences d'autre part. Le travail présenté ici s'inscrit dans la détermination de cette deuxième dimension du risque qu'on nomme généralement la vulnérabilité.

L'essentiel de l'habitat lorrain traditionnel est constituée de maisons ou de petits immeubles en maçonnerie dont le comportement mécanique, sous l'effet d'une sollicitation, est principalement gouverné par la nature discontinue de la maçonnerie. Cela rend son analyse relativement complexe, même avec les outils (numériques) d'aujourd'hui.

Le nombre de paramètres qui interviennent dans la modélisation du comportement mécanique d'un ouvrage en maçonnerie est en effet important. Ces paramètres concernent le comportement élastique ou élasto-plastique des blocs de la maçonnerie d'une part et des discontinuités (joints) d'autre part. Par ailleurs la détermination de certains de ces paramètres est difficile (notamment ceux relatifs aux discontinuités) et il est d'usage courant d'utiliser des estimations à partir de données de littérature. Enfin, la variabilité de ces paramètres d'un ouvrage à l'autre ou au sein même d'un ouvrage, impose généralement d'utiliser des valeurs caractéristiques uniformes, supposées représentatives, dans les modèles.

D'un autre côté, la sollicitation appliquée aux ouvrages de surface par la formation d'une cuvette d'affaissement revêt différentes formes selon l'emplacement de l'ouvrage dans la cuvette. A cela s'ajoute la complexité des interactions possibles entre la déformation du sol et la transmission d'efforts à la structure de l'ouvrage qui dépend notamment des caractéristiques du sol lui-même et des fondations de l'ouvrage.

Les affaissements survenus en Lorraine ont rappelé que la région était sous-minée sur une très grande partie de son territoire et qu'il en était de même dans d'autres régions de France. Ils ont également révélé une carence dans la prévention des risques, corrigée depuis, sur le plan juridique, par une réforme du code minier et par la mise en place des plans de prévention des risques miniers en cours d'élaboration. Enfin, ils ont été à l'origine de nouveaux travaux de recherche destinés à améliorer l'état des connaissances et à développer des outils pour

l'évaluation des risques. C'est dans ce cadre que le Laego, à travers sa participation au Gisos¹, a été amené à s'intéresser à la problématique de la vulnérabilité des territoires à des mouvements de terrain.

Définie simplement comme l'estimation des dommages susceptibles de se produire, la vulnérabilité d'un territoire se mesure par sa capacité à être endommagée, de différentes manières (physiques d'une part, mais aussi économique et sociale) lors de l'occurrence d'un aléa, corrigée de sa capacité à faire face à l'apparition de ces dommages ou à en limiter les conséquences.

Dans ce domaine, et jusqu'à aujourd'hui, les efforts avaient porté sur une évaluation globale de la vulnérabilité, zone par zone, à partir de quelques critères caractéristiques, car la demande était pressante de réaliser un zonage des risques à l'échelle de toute la Lorraine. Depuis peu, il est apparu essentiel d'affiner l'approche en s'intéressant à l'évaluation prévisionnelle des dommages, dans chaque zone exposée.

Mais une telle évaluation s'avère rapidement difficile à réaliser. Elle nécessite une identification et une caractérisation assez fines des enjeux susceptibles de subir des dommages ainsi qu'une connaissance des processus par lesquels les dommages physiques peuvent entraîner des dommages dans le fonctionnement des collectivités qui vont eux-mêmes avoir des conséquences sociales et économiques.

Par ailleurs, rien que sur le plan des dommages physiques, il y a une difficulté à prendre en compte tous les types d'enjeux (bâtiments à usage d'habitation individuelle ou collective, bâtiments à usage commerciaux, réseaux divers, ...). De même, si l'on se limite aux bâtiments à usage d'habitation, on rencontre sur le terrain une grande variété d'ouvrages dont la réaction ou le comportement à un mouvement de terrain peut considérablement varier d'un ouvrage à l'autre.

Si on focalise encore davantage notre regard sur les ouvrages d'habitations individuelles les plus fréquents dans les villes et villages lorrains exposés aux affaissements miniers, on a à étudier le comportement de maisons individuelles ou de petits immeubles, le plus souvent en maçonnerie, présentant déjà en eux-mêmes, par leur nature même, une certaine complexité.

C'est cette complexité-là, celle des ouvrages en maçonnerie de hauteur variable, qu'on a choisi d'étudier ici par la méthodologie des plans d'expérience.

Quels sont alors les enjeux de notre recherche ?

Prenant à rebours le principe de focalisation exposé précédemment, il s'agit donc pour nous de déterminer les critères principaux à partir desquels il est possible d'estimer les dommages physiques que peuvent subir des maisons individuelles qui seraient affectées par un affaissement de terrain. Faisant de même pour les autres types de construction, puis pour les

¹ Groupement de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains associant l'Ineris, le Brgm, le Laego et l'Ecole des Mines de Paris

réseaux, on pourrait être en mesure, sur un site donné et pour un scénario d'affaissement donné, de donner une estimation globale des dommages physiques à l'échelle de ce site. Nous resterait alors à tenter d'évaluer les conséquences de ces dommages sur le fonctionnement et l'économie de la zone touchée et sa région. On aurait alors en main les éléments pour construire un simulateur de dommages et de leurs conséquences. Son utilisation nous imposerait une bonne connaissance des enjeux (un repérage et une caractérisation exhaustive), une bonne connaissance du comportement mécanique des ouvrages et des réseaux sous l'effet d'un mouvement de terrain (l'objet d'une partie de cette recherche pour un type d'ouvrage particulier) et une bonne maîtrise du caractère systémique du fonctionnement d'une collectivité. Plusieurs de ces points font l'objet de travaux de recherche récents ou en cours au Laego et les travaux présentés dans ce mémoire constituent un des éléments du puzzle à construire.

Plus concrètement, les finalités de nos travaux de recherche furent les suivantes :

- illustrer, par l'ensemble des exemples traités, l'intérêt de la méthodologie des plans d'expérience et des surfaces de réponse pour l'analyse des systèmes complexes ;
- dans le cadre de l'un des exemples traités, identifier l'influence respective (et leur éventuelle interaction) de deux variables particulières sur la réponse globale d'une structure en maçonnerie simplifiée, soumise à une sollicitation induite par un affaissement minier ;
- construire une typologie des bâtiments de la ville de Joeuf à partir d'une base de données préalablement établie ;
- pour chaque type ainsi défini, étudier le comportement géométrique des ouvrages en maçonnerie de la ville de Joeuf, en supposant que les ouvrages sont placés dans les pires conditions, c'est-à-dire au point de courbure maximale, convexe ou concave. Il est en effet impossible à ce jour de prévoir exactement où pourrait se situer une telle cuvette ;
- caractériser l'influence respective de l'ensemble des variables géométriques des ouvrages de ce site sur la réponse globale choisie lors d'un affaissement minier ;
- élaborer ainsi une fonction de dommage, pour chaque groupe et pour chaque type de sollicitation (convexe ou concave), soit 8 fonctions.

Après cette introduction générale, le chapitre 1 propose un cadre théorique et pratique concernant la notion de risque en général, l'aléa minier et ses conséquences sur les maisons en maçonnerie puis, plus généralement la notion de vulnérabilité. Le dernier point de cette partie concerne le problème de l'interaction sol-structure qui sera consciemment exclu des analyses qui suivront.

Le chapitre 2 présente dans un premier temps les données, outils et méthodes utilisées dans ce mémoire. On présentera ainsi : la base de données des bâtiments de la ville de Joeuf, la méthode des éléments distincts et le modèle de base pour l'analyse, le modèle de cuvette d'affaissement choisi puis le principe des méthodes d'analyse statistique comme l'analyse de la variance, l'analyse par régression linéaire multiple, l'analyse en composante principale et la classification hiérarchique qui ont été utilisées dans nos travaux.

Le chapitre 3 présente ensuite la plupart des résultats et discussions sur l'ensemble des travaux réalisés durant ces trois années de recherche.

La mémoire se termine alors par une conclusion générale qui, outre le rappel des principaux résultats, proposera quelques perspectives possibles de notre travail.

CHAPITRE 1 : CONTEXTE THEORIQUE ET PRATIQUE

1. Le Risque

Notre travail se situant dans la problématique des risques, il est intéressant de rappeler tout d'abord quelques éléments sur cette notion.

Le risque renvoie généralement à une situation pouvant engendrer des conséquences dommageables. Plus exactement, il constitue une mesure de cette potentialité de dommages, contrairement à l'incertitude qui, dans le cas qui nous intéresse ici, renvoie à une situation dont le niveau de dommages potentiels est impossible à évaluer ou à prévoir.

On distingue le plus souvent les risques technologiques (ou industriels) des risques naturels. Les premiers trouvent leur origine dans une activité humaine, généralement industrielle (il s'agit de risques d'origine technologique et non pas de nature technologique comme le laisse entendre l'expression de « risques technologiques ») tandis que les seconds résultent d'un phénomène naturel sur lequel l'homme n'a a priori aucune influence.

Il existe de nombreuses propositions de définitions pour la notion de risque, d'aléa ou encore de vulnérabilité (Leroy et Signoret, 1992, Nations Unies, 1992, Leone et al., 1996, MATE, 1997, Prim.net, 2002, Manche, 2000, Asch et Ninèze, 2003). Selon la spécialité des auteurs, les définitions proposées diffèrent plus ou moins, mais relativement à notre domaine, nous pouvons retenir les deux définitions suivantes les plus courantes (Verdel, 2007) :

- pour les risques « technologiques » : $\text{Risque} = \text{Probabilité} \otimes \text{Gravité}$
- pour les risques « naturels » : $\text{Risque} = \text{Aléa} \otimes \text{Vulnérabilité}$

Nous retiendrons plus particulièrement cette deuxième définition avec les explications suivantes données par le Commissariat Général du Plan (1997) :

- L'origine d'un Aléa naturel revient à un fait « naturel » au contraire d'un fait incité par une action humaine comme c'est le cas des risques technologiques. C'est donc un fait réalisable se développant à l'origine dans un milieu naturel ;
- Le risque est un concept engendré par un fait dommageable, doté d'une certaine probabilité, résultat d'un aléa naturel survenant dans un milieu vulnérable. Le risque résulte donc de la conjonction d'un aléa et d'un enjeu ; la vulnérabilité étant la mesure des dommages de toutes sortes rapportée à l'intensité de l'aléa. A cette définition technique du risque, doit être associée la notion d'acceptabilité, pour y intégrer sa composante sociale.

En France, on distingue généralement 4 types de risques « technologiques » : le risque nucléaire, le risque industriel, le risque de transport de matières dangereuses et le risque de barrage tandis que l'on compte 7 types de risques « naturels » : les inondations, les séismes, les éruptions volcaniques, les mouvements de terrain, les avalanches, les feux de forêts, les cyclones et tempêtes.

2. Aléa et Risque minier

2.1. Les affaissements miniers

La France fut une grande nation minière jusqu'à la deuxième moitié du 20^e siècle avec, en particulier, de grands gisements de charbon et de fer dont l'exploitation est maintenant arrêtée. En Lorraine, ce sont ainsi près de 40 000 km de galeries qui ont été creusés laissant en place des vides résiduels dont le volume global est évalué à plus de 500 millions de m³. Des 1300 km² de terrains qui ont été excavés, plus de 3 milliards de tonnes de minerai de fer ont été extraites (DDE, 2005). La technique adoptée (par chambres et piliers) pour l'exploitation a amené, dans la plupart des cas, au foudroyage des piliers abandonnés et à la fissuration consécutive des terrains au-dessus des zones exploitées (Fayad 2004). Sous les zones habitées ou traversées par des infrastructures, les chambres et piliers, initialement dimensionnés pour résister indéfiniment au poids des terrains de recouvrement, ont été abandonnés.

Le mode d'exploitation, notamment la technique adoptée par chambres et piliers, la géométrie de ces ouvrages, la profondeur de l'exploitation, la nature des terrains, le vieillissement des piliers résiduels, la qualité des foudroyages, la situation vis-à-vis de l'ennoyage constituent les paramètres essentiels permettant d'apprécier l'évolution des anciens travaux miniers. Le risque est principalement évalué sur la base de ces éléments, de l'amplitude éventuelle des mouvements de terrain et de l'enjeu de surface potentiellement touché.

L'exploitation minière en Lorraine s'est progressivement arrêtée, la dernière mine fermant ses portes en 1995 (DDE, 2005). Dès lors, les problèmes ont commencé à prendre effet et le premier désordre minier en Lorraine, postérieur à la fin de l'exploitation minière, est l'affaissement minier survenu dans la ville d'Auboué en octobre 1996. L'amplitude de l'affaissement a dépassé 1m et les dommages ont porté sur les maisons de surface (Figure 1a), les chaussées (Figure 1b) et la rupture de conduits enterrés. D'autres communes comme Moutiers en 1997 et Roncourt en 1999 (Deck, 2002) ont connu des désordres semblables. Suite à ces désordres, des familles ont du quitter leur maison et ces événements ont suscité une émotion considérable dans une population déjà durement touchée par les difficultés économiques liées à la fermeture des mines et au déclin de la sidérurgie. Ils furent à l'origine d'une prise de conscience, au plus haut niveau de l'État, des problèmes liés à "l'après-mine" et de la nécessité d'y apporter une réponse adaptée qui s'est traduite dans la réforme du code minier en 1999.



(a) : Dommages sur une maison de la rue de Metz
(photo : Gisos)



(b) : Rupture de la chaussée (photo : Ineris)

Figure 1. Exemples de désordres miniers à Auboué en 1996

On distingue généralement trois types d'aléa minier : l'affaissement progressif, l'effondrement généralisé et l'effondrement localisé.

Un affaissement progressif induit une dépression surfacique qui se manifeste à la surface sous forme d'une cuvette de grand rayon de courbure due au fléchissement lent, progressif et souple des terrains de couverture sans rupture cassante importante (MATE 1999, Zihri 2004) comme on le voit sur la Figure 2.



Figure 2. Illustration d'un affaissement progressif sous une zone agricole suite à une exploitation minière (source : Ineris)

Un affaissement brutal se produit lorsqu'une zone d'extension de l'exploitation souterraine s'effondre. Ce type d'affaissement est qualifié d'effondrement généralisé à l'opposé d'un effondrement localisé comme les fontis. Ce type d'effondrement est exclusivement lié aux exploitations partielles, plus particulièrement, aux exploitations par chambres et piliers abandonnés, généralement, très proches de la surface. La Figure 3 illustre ce type d'effondrements se manifestant à la surface sous forme d'une rupture brutale des terrains suite à un endommagement de piliers sous-jacents consécutifs à une rupture du toit ou une rupture en chaîne d'un grand nombre de piliers (Ineris 2005)



Figure 3. Exemple d'un affaissement brutal (source : Ineris)

La Figure 4 présente quant à elle un effondrement localisé de type fontis. Ce type d'effondrement se caractérise par l'apparition soudaine en surface d'un trou qui résulte d'une dégradation progressive du toit d'un vide souterrain situé en général à faible profondeur. L'extension des dégâts en surface est limitée, mais les conséquences potentielles peuvent être importantes lorsque les accidents se situent à proximité d'habitations ou d'infrastructures importantes. On peut citer les sinistres historiques de Thill (1946-57) et ceux de Moyeuve-Grande en 1998.



Figure 4. Exemple d'effondrement localisé (fontis) en zone pavillonnaire (source : BRGM)

Dans la suite, nous nous intéressons plus particulièrement à l'affaissement progressif qui peut survenir au-dessus d'une zone d'exploitation par chambres et piliers abandonnés.

2.2. Description générale des mouvements de terrain et de leurs conséquences

On connaît assez bien les grandes caractéristiques des affaissements progressifs notamment ceux volontairement provoqués par le dépilage des piliers. Les cuvettes d'affaissement prennent une dimension de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de diamètre. Les

mouvements sont assez rapides au début puis l'affaissement se poursuit durant quelques semaines à quelques mois. La stabilité définitive des terrains sus-jacents nécessite une durée de plusieurs années. Ces mouvements sont accompagnés de déformations horizontales du terrain comme indiquées sur la Figure 5 où Am représente l'amplitude maximale du déplacement vertical, en milieu de cuvette. On distingue une zone de compression des terrains dans la couronne intérieure de la cuvette (entre le centre et le point d'inflexion) et une zone d'extension des terrains dans la couronne externe de la cuvette, au-delà du point d'inflexion. Ce sont principalement ces déformations qui sont responsables des plus importants dommages, en particulier sur les ouvrages en maçonnerie. Les mouvements différentiels du terrain se traduisent également par la mise hors d'équerre des encadrements de fenêtres et portes qui sont souvent le premier signe perceptible de l'affaissement pour les occupants du lieu (Martin, 2004).

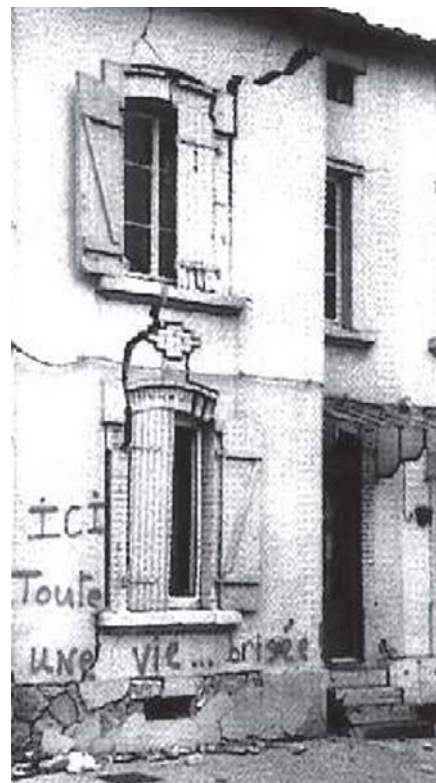
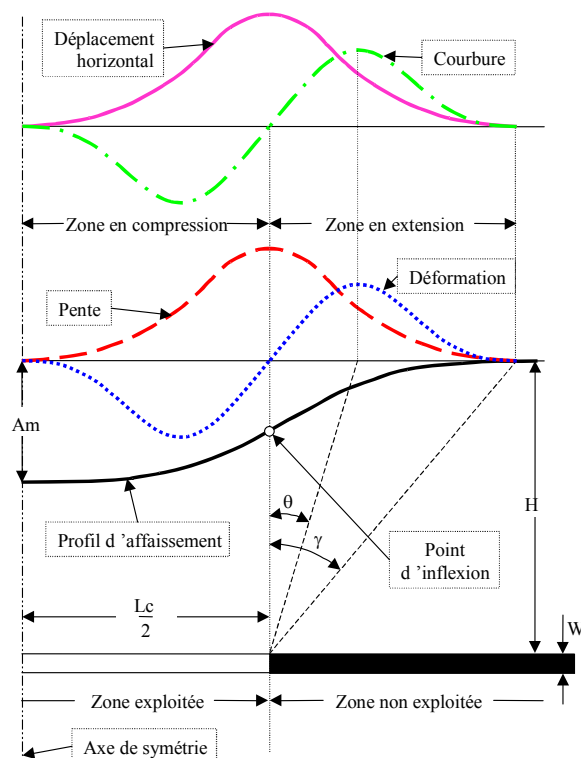


Figure 5. Caractéristiques du mouvement des terrains associés à un affaissement minier (à gauche) et endommagement structurel d'une maison à la ville d'Auboué en 1996 (Deck, 2007)

Ces divers types de déformation ou de sollicitation peuvent se succéder pour une même habitation durant la formation d'une cuvette d'affaissement au fur et à mesure de son extension. Une construction peut donc successivement être soumise à des contraintes en traction puis à une mise en pente suivie d'une remise à niveau et d'une sollicitation en compression.

Certaines études ont fait l'objet d'une investigation sur ces mouvements et les dommages induits sur les habitations. C'est le cas des travaux de Skempton et MacDonald (1956), de Bjerrum (1963), de Grant et al. (1974), de Burland et Wroth (1974) ou plus récemment de Boone (2001). Leurs efforts ont été dirigés vers la détermination des critères de dommage provoqués par les mouvements du terrain (courbure de terrain, zone convexe et concave).

Beaucoup moins d'attention ont été données aux mouvements horizontaux représentés par la déformation horizontale du terrain qu'on estime redoutable d'après Al Heib (2003) et qui est qualifiée de prédominante dans la dégradation des constructions.

La Figure 6 fournit une illustration des déplacements et déformations induits par un mouvement de terrain sur une structure. Une structure peut être sollicitée de toutes ces manières, mais l'essentiel est de déterminer, en amont, dans la cuvette d'affaissement, les mouvements du terrain à l'origine de cette sollicitation.

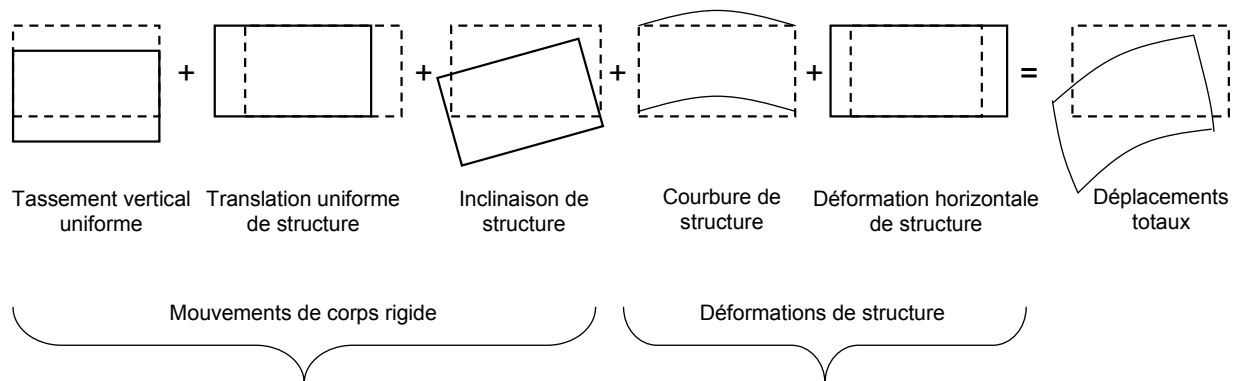


Figure 6. Comportement des mouvements du terrain associé aux dommages structurels (Geddes 1984)

On trouve dans la littérature de nombreux modèles mathématiques proposés par différents auteurs, pour représenter un affaissement minier (voir Deck, 2002). Ces formulations mathématiques sont généralement obtenues à partir de données d'affaissements observés et dessine ce qu'on appelle un profil de l'affaissement représenté le plus souvent du centre au bord de la cuvette. On détermine ainsi, comme indiqué sur la Figure 5, le profil de l'affaissement vertical, le profil de la pente et le profil de la courbure du terrain.

Le profil de l'affaissement vertical permet de déterminer les déplacements différentiels verticaux susceptibles d'être induit à la base d'un ouvrage et dont les conséquences peuvent être très dommageables.

Concernant la pente, la Figure 7 illustre comment les efforts peuvent être redistribués dans une structure et engendrer en conséquence des dommages en particulier dans les structures les plus hautes qui y sont plus sensibles (Piguet, 2004) et Al-Heib, 2003).

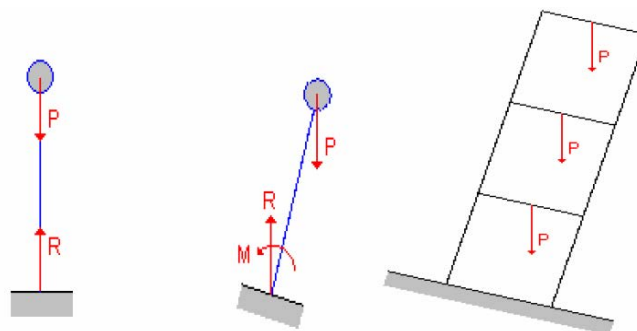
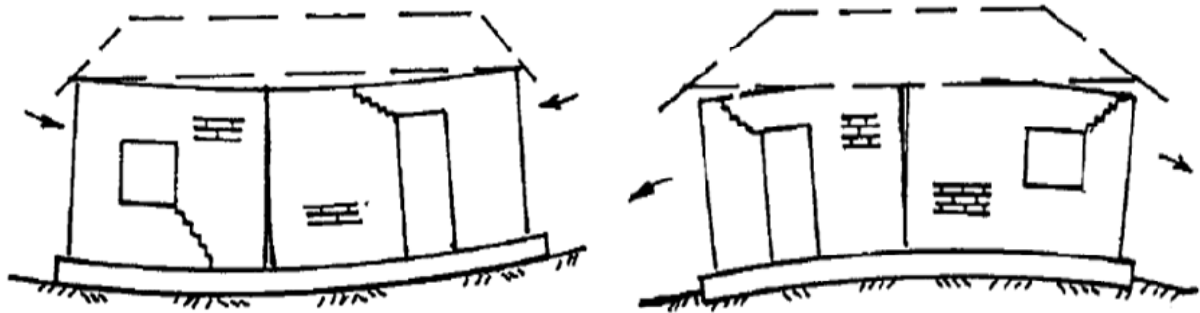


Figure 7. Distribution des efforts dans la structure sous l'influence de la pente (Ineris, 2003)

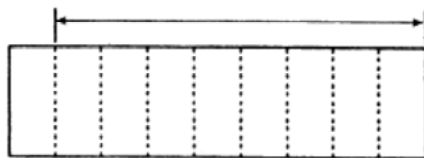
Quant à la courbure du terrain, dont le profil prend typiquement la forme indiquée sur la Figure 5, elle entraîne potentiellement dans la structure des efforts de compression ou de traction qui dépendent de la position des ouvrages dans la cuvette et de l'interaction entre le sol et les structures exposées. La Figure 8 montre schématiquement le type de désordre auquel on peut s'attendre sur une structure en maçonnerie se trouvant en zone de courbure concave (zone de compression) ou en zone de courbure convexe (zone de traction) et la Figure 9 montre plus particulièrement les différents modes de ruptures possible en zone de courbure concave.



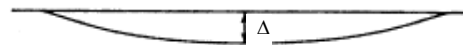
(a) : Réaction typique d'une structure en maçonnerie à l'effet de la courbure concave (zone de compression)

(b) : Réaction typique d'une structure en maçonnerie à l'effet de la courbure convexe (zone de traction)

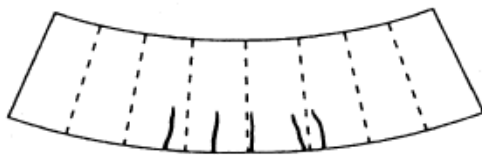
Figure 8. Comportements types d'une maison en maçonnerie exposée à une courbure du terrain de fondation (Page, 2001)



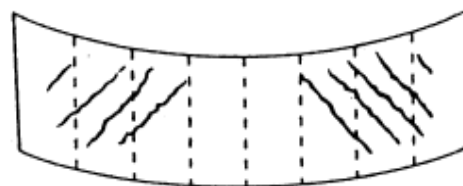
a) dimensionnement de la structure



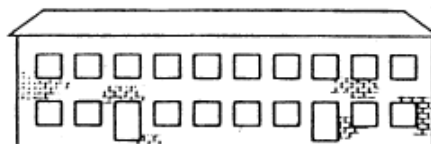
b) la structure subit à la flexion



c) Mode de rupture en flexion



d) Mode de rupture en cisaillement



e) Etat actuel de la structure

Figure 9. Modes de rupture d'une structure en zone concave (en aval de l'affaissement) (Burland, 1977)

Enfin, tous les auteurs reconnaissent le rôle prépondérant joué par les déformations horizontales dans l'endommagement des ouvrages exposés à un affaissement de terrain. Deck (2002) a particulièrement documenté cet aspect. Les déformations horizontales se transmettent directement aux structures sous la forme d'une pression des terrains sur les murs verticaux enterrés ou semi enterrés ou par frottement au contact avec les murs porteurs ou l'ensemble de fondations d'une maison. Suivant sa position dans la cuvette d'affaissement, une structure bâtie est alors soumise des efforts d'extension (zone convexe : en amont de la cuvette d'affaissement) soit de rétrécissement (zone concave : en aval de la cuvette d'affaissement) comme le montre la Figure 10.

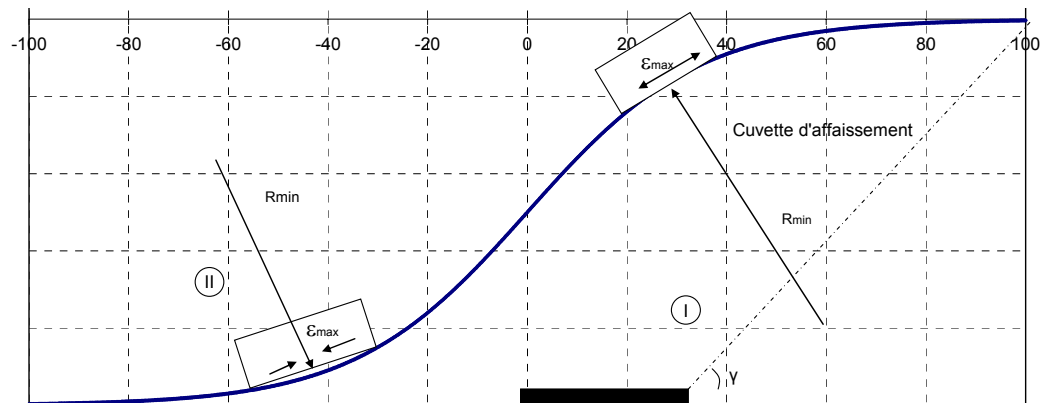


Figure 10. Sens des déformations principales imposées à une structure selon sa position dans une cuvette d'affaissement

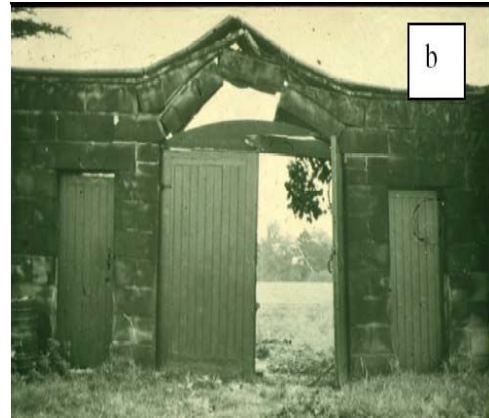
De nombreux auteurs comme Burland (1977), Boscardin et Cording (1989) ou encore Boones (1996) et Potts et al. (1997) considèrent et tiennent compte, dans leurs études, de la déformation horizontale d'extension maximale ($\epsilon_{\max}$) dans les zones les plus sollicitées dans la structure en fonction de la déflexion relative (Δ/L) imposée à l'ouvrage, où Δ est la flèche maximale au centre de la structure en maçonnerie (Boones et al., 1996).

Comme illustré sur la Figure 9, les ruptures observées en zone convexe sont soit des ruptures en traction résultant de la flexion de l'ouvrage (fissures quasi verticales) ou des ruptures en cisaillement prenant la forme de fissures diagonales (Figure 11 a) qui prennent souvent naissance au niveau des ouvertures.

En zone concave, le comportement de la structure en maçonnerie est différent, il engendre dans la partie supérieure de la structure, un champ des contraintes en compression qui conduit à des déformations au front de la structure (Figure 11 b). Dans certaines conditions, l'apparition de pliures peut alerter de l'existence des contraintes. Les conséquences sont aussi remarquables sur les chaussées (élévation de trottoir, écrasement de réseaux d'égouts par exemple)



(a) : Rupture engendrée par extension-cisaillement



(b) : Rupture engendrée par compression

Figure 11. Exemples de ruptures dans les ouvrages en maçonnerie exposés à un affaissement minier (source : Ineris 2005)

3. La vulnérabilité

Le terme « vulnérabilité » définit un ensemble de conditions et de processus résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques et environnementaux, qui accentuent la sensibilité d'une communauté aux effets du risque (ou hasard).

D'après la mission spécialisée d'inspection environnement (MISE 1999), le principal objectif de la politique publique, dans les années à venir, est la réduction de vulnérabilité. Il en résulte que le succès de cette politique dépend de notre capacité de construire des indicateurs permettant d'estimer la vulnérabilité. C'est un peu cet objectif que nous nous sommes fixés, pour le cas des habitations en maçonnerie exposés à un aléa minier.

3.1. Généralités

L'évaluation de la vulnérabilité n'est pas une chose facile car elle dépend, plus ou moins, de l'ampleur du mouvement du terrain considéré. La vulnérabilité peut en effet être considérée comme une grandeur caractérisant le niveau potentiel d'endommagement des éléments exposés à l'action d'un phénomène comme les mouvements du terrain.

L'évaluation pose donc un problème de la connaissance et de la prévision de l'interaction entre le phénomène et les éléments sollicités. Cette interaction peut être décrite par des fonctions ayant le nom d'endommagement, ou par extension, fonctions de vulnérabilité comme on le verra au chapitre 3. Ces fonctions permettent de hiérarchiser les facteurs pertinents qui expliquent l'endommagement des biens.

En 1996, Leone a présenté un point de vue sur l'évaluation de la vulnérabilité permettant de structurer les différentes composantes du concept de vulnérabilité (Figure 12). Il y distingue notamment la vulnérabilité des biens, des personnes et des activités humaines et, pour chacune de ces catégories, définit une fonction d'endommagement. Zihri (2004) a également proposé une approche similaire permettant d'évaluer la vulnérabilité « systémique » à des affaissements miniers.

Pour la première catégorie, la fonction d'endommagement dépend de l'intensité du phénomène considéré ainsi que des facteurs de résistance des biens exposés à ce phénomène. Pour les autres catégories, de nombreux autres facteurs interviennent comme indiqués sur la Figure 12.

Le phénomène d'affaissement minier intervient tout particulièrement et en premier lieu au niveau de l'endommagement structurel. Mais la définition analytique d'une fonction d'endommagement, comme proposé par Leone reste à ce jour un défi dans la plupart des situations.

Pour pouvoir progresser en matière d'évaluation de la vulnérabilité ou, ce qui revient au même, de prévision des dommages, il apparaît donc fondamental de récolter de nombreuses informations sur les biens exposés, l'intensité de l'affaissement susceptible de se produire et de s'appuyer sur l'expérience passée pour relier les deux et en déduire les dommages potentiels.

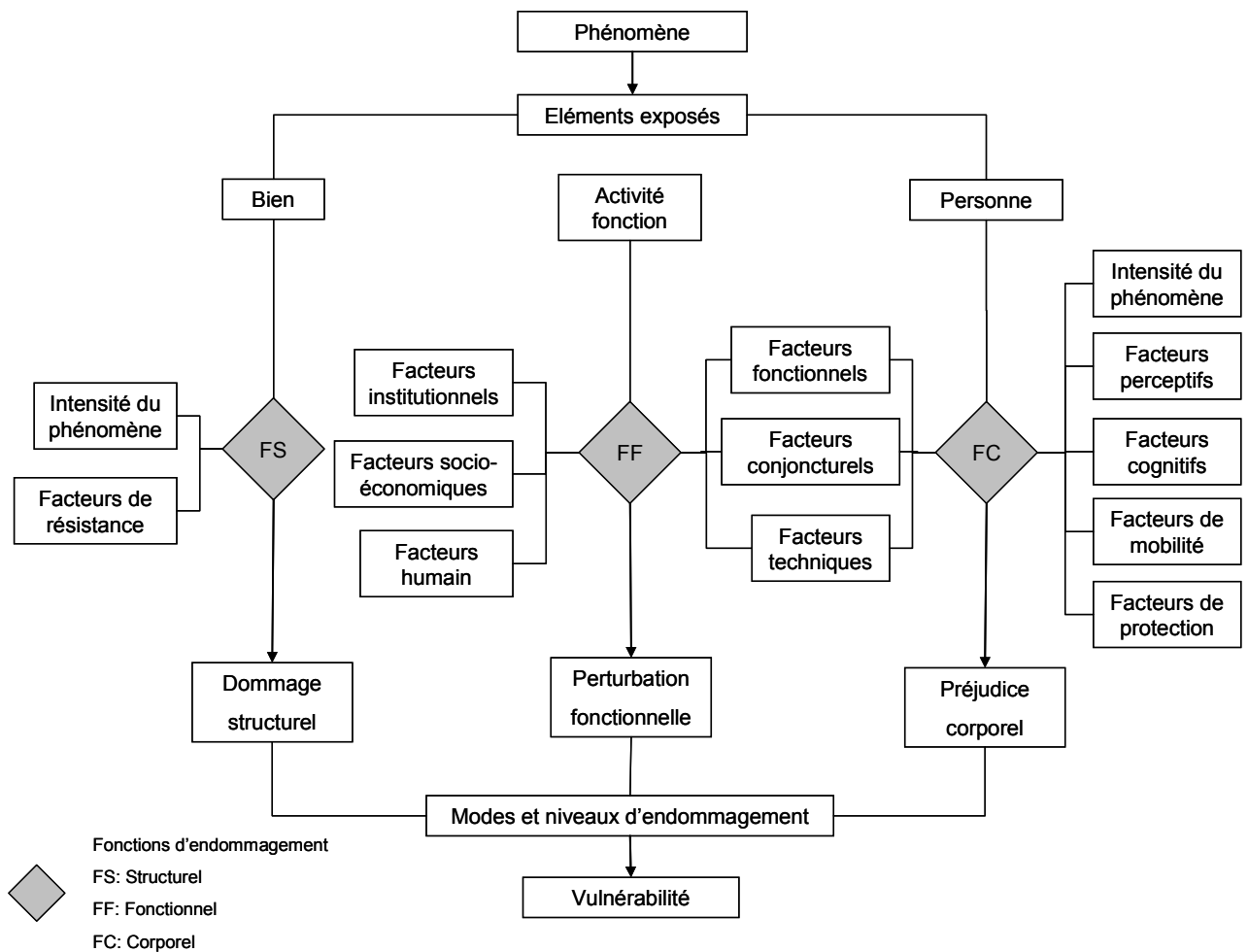


Figure 12. Principe conceptuel d'évaluation de la vulnérabilité (Leone, 1996)

Si dans la suite de notre travail, nous nous limiterons à travailler sur la vulnérabilité directe des habitations en maçonnerie (comme illustré sur la Figure 13), il nous faut garder à l'esprit que la vulnérabilité aux affaissements miniers couvre également d'autres aspects comme les dommages indirects sur les activités humaines et sur l'activité économique en particulier qui est autrement plus difficile à estimer (Manche, 1997). C'est par exemple le cas quand les réseaux qui structurent le territoire sont affectés (Figure 14).



Figure 13. Dommages directs aux habitations de la rue de Metz à Auboué après l'affaissement minier de 1996 (Source : Gisos)



Figure 14. Effondrement brutal à la Pouéze en 1990, qui met fin à l'exploitation minière
(Source : W. Zumbo, LRPC Angers)

3.2. Endommagement des ouvrages en maçonnerie

Compte tenu de la variété des sollicitations induites sur les ouvrages exposés lors d'un affaissement minier ainsi que de la variété des ouvrages exposés eux-mêmes, il est d'usage de réduire cette variété à une typologie plus simple, représentative du processus d'endommagement et de la nature des sollicitations qui s'exercent sur les éléments exposés.

De nombreuses méthodes ont ainsi été proposées dans le monde pour évaluer les dommages dans les bâtiments résultant d'un affaissement minier. Ces méthodes, élaborées dans des contextes d'exploitation minière différents, en Angleterre, aux Etats-Unis, en Pologne ou en Afrique du Sud, sont presque toutes empiriques ou quasi-empiriques et basées sur l'exploitation de données d'observation de dommages des bâtiments (Saeidi, 2008). On en distingue trois familles : les méthodes pondérales, les abaques et les méthodes analytiques.

Les méthodes pondérales considèrent plusieurs paramètres, comme la longueur, la forme, le type des bâtiments ou encore le type de fondations pour déterminer la classe de vulnérabilité d'un bâtiment donné. C'est le cas de la méthode américaine de Yu et al. (1988), issue de la méthode de Bhattacharya et Singh (1984), et de deux méthodes polonaises développées par Dzegniuk et Hejmanowski (2000) ou par Kwiatek (1998) de l'Institut Central Minier de Katowice.

Parmi les méthodes par abaques, on peut principalement citer la méthode du National Coal board (NCB) (1975, Figure 15) et la méthode similaire de Wagner et Schumann (1991, Figure 16), toutes deux construites à partir de données d'observations sur des exploitations de

charbon respectivement au Royaume Uni et en Afrique du Sud. Ces deux méthodes relient le niveau de dommage à la longueur des bâtiments d'une part et à la valeur de la déformation horizontale d'autre part. La méthode de Wagner et Schumann est particulièrement adaptée à des bâtiments de longueur inférieure à 50 m tandis que la méthode NCB est plus adaptée à des bâtiments plus longs, jusqu'à 250 m de longueur.

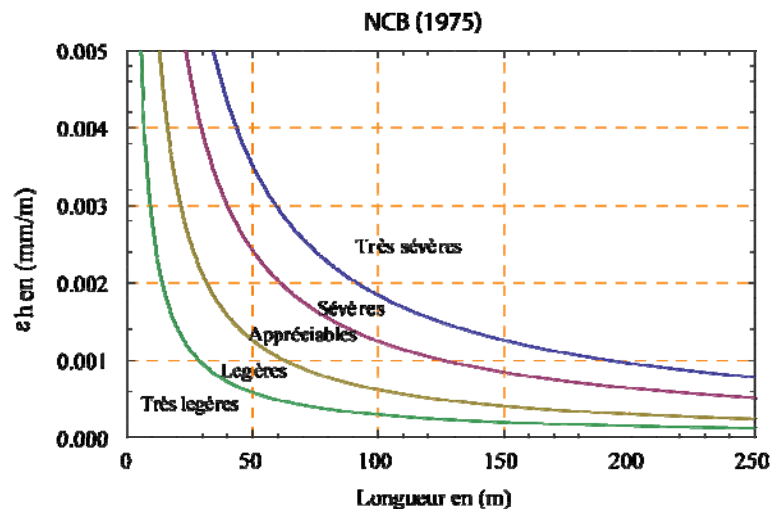


Figure 15. Prévion de dommages selon NCB (1975)

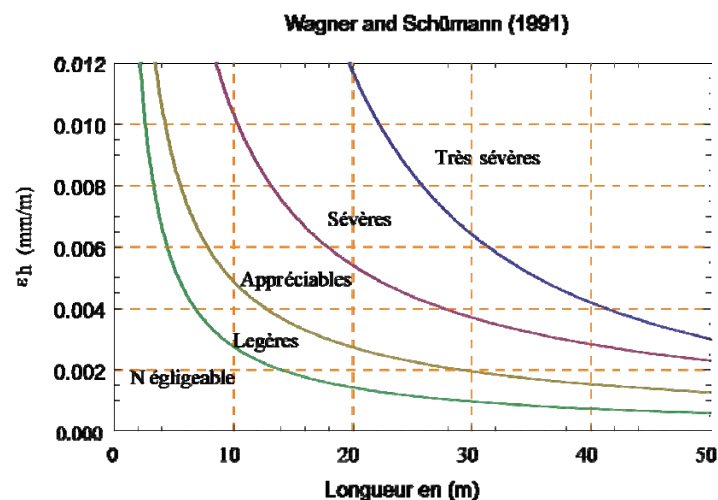


Figure 16. Prévion de dommages selon Wagner et Schumann (1991)

Quant aux méthodes analytiques, on peut citer celle de Boscardin et Cording (1989, Figure 17), la méthode de Burland (1997, Figure 18) ou encore l'approche de Boones (1996, 2001) qui reposent sur un modèle mécanique simple à trois paramètres : l'angle de distortion ($\beta = L/2R$) et la déflexion ($\Delta = L^2/8R$) qui dépendent tous deux de la longueur du bâtiment (L) et de la courbure du terrain ($1/R$) ainsi que la déformation horizontale du terrain. Boscardin et Cording ont notamment effectué plusieurs tests au laboratoire sur des modèles physiques et ont montré que la déformation de compression acceptable d'un mur en maçonnerie (briques) est la valeur seuil de 1mm/m et la déformation de traction limite est de 0,35 mm/m. Le Tableau 1 rassemble certaines formulations utilisées dans ces méthodes.

Dans le cas des maçonneries (milieux anisotropes ou isotropes transverses) et avant de procéder au calcul de la flèche et de la déformation maximale (en traction et en cisaillement), il est essentiel dans ces méthodes d'homogénéiser le domaine (blocs et joints). Pour cela, Singh (1973) a développé des relations analytiques (Itasca, 1992) permettant de déterminer les propriétés mécaniques d'un milieu continu équivalent (E_{eq} , ν_{eq} et G_{eq}) dans le cas de deux familles perpendiculaires de discontinuités (voir aussi Piguet (1983), Vuillod (1995) et Fougeron (2007)).

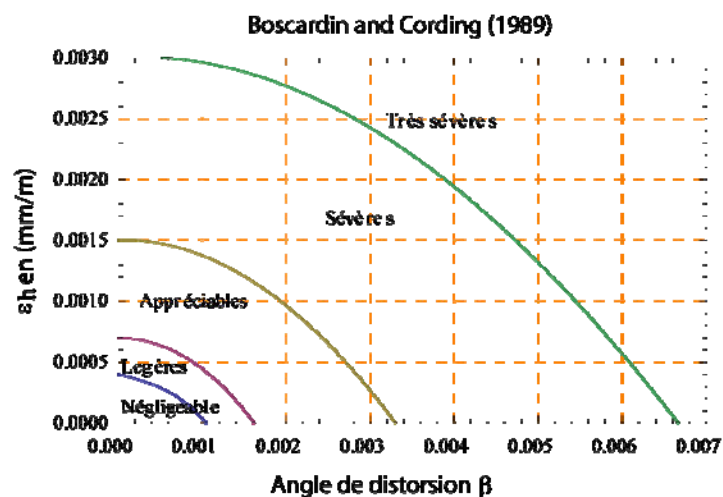


Figure 17. Prévion de dommages selon Boscardin et Cording (1989)

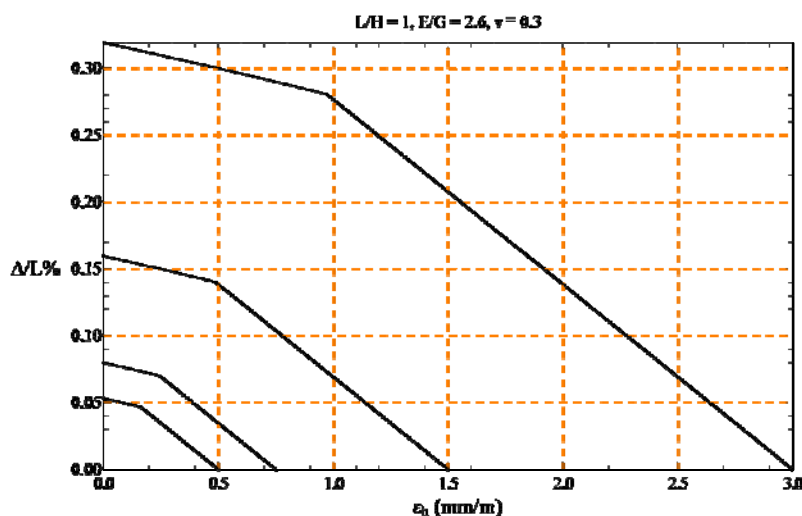
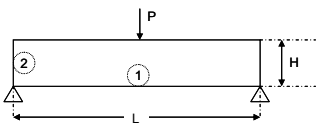
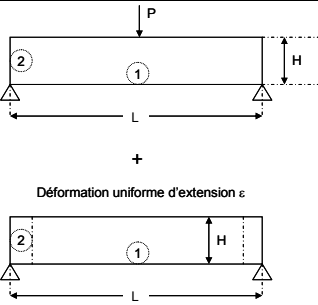
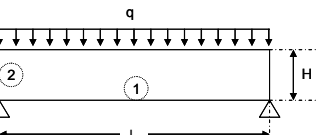
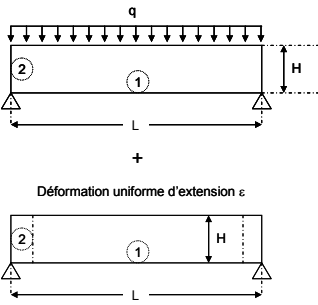


Figure 18. Interaction entre la déflexion relative et la déformation horizontale dans la structure d'après Burland (catégories de dommages de Négligeable (0) à Très Sévères (5)) ; pour les bâtiments situés en zone convexe et pour les valeurs suivantes : $L/H=1$, $E/G=2.6$ et $\nu=0.3$

Tableau 1. Calcul analytique de la déformation maximale de traction dans une structure assimilée à une poutre simple (Timoshenko, 1953)

	Δ	Endroit 1	Endroit 2
	$\frac{\Delta}{L} = \frac{P}{EbH} \left[\frac{L^2}{4H^2} + \frac{3E}{8G} \right]$	$\sigma_{\max} = \frac{3PL}{2bH^2}$ $\sigma_{\min} = 0$ $\frac{\Delta}{L} = \left[\frac{L}{6H} + \frac{HE}{4LG} \right] \varepsilon_{\max}$	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = \tau_{\max} = \frac{3P}{4bH}$ $\frac{\Delta}{L} = \frac{L^2}{3(1+\nu)H^2} \left[1 + \frac{3H^2E}{4L^2G} \right] \varepsilon_{\max}$ $\varepsilon_{\max} = \frac{(1+\nu) \frac{\Delta}{L}}{\left[\frac{L^2}{4H^2} + \frac{E}{2G} \right]}$
 Déformation uniforme d'extension ε	$\frac{\Delta}{L} = \frac{P}{EbH} \left[\frac{L^2}{4H^2} + \frac{3E}{8G} \right]$	$\sigma_{\max} = \frac{3PL}{2bH^2} + E\varepsilon$ $\sigma_{\min} = 0$ $\frac{\Delta}{L} = \left[\frac{L}{6H} + \frac{HE}{4LG} \right] (\varepsilon_{\max} - \varepsilon)$	$\sigma_{\max} = \frac{E\varepsilon}{2} + \sqrt{\left(\frac{E\varepsilon}{2} \right)^2 + \left(\frac{3P}{4bH} \right)^2}$ $\sigma_{\min} = \frac{E\varepsilon}{2} - \sqrt{\left(\frac{E\varepsilon}{2} \right)^2 + \left(\frac{3P}{4bH} \right)^2}$ $\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon}{2} (1-\nu) + (1+\nu) \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{2} \right)^2 + \left(\frac{\frac{\Delta}{L}}{\frac{L^2}{3H^2} + \frac{E}{2G}} \right)^2}$
	$\frac{\Delta}{L} = \frac{qL^2}{EbH} \left[\frac{5L^2}{32H^2} + \frac{3E}{16G} \right]$	$\sigma_{\max} = \frac{3qL^2}{4bH^2}$ $\sigma_{\min} = 0$ $\frac{\Delta}{L} = \left[\frac{5L}{24H} + \frac{HE}{4LG} \right] \varepsilon_{\max}$	$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} = \tau_{\max} = \frac{3qL}{4bH}$ $\frac{\Delta}{L} = \frac{5L^2}{24(1+\nu)H^2} \left[1 + \frac{6H^2E}{5L^2G} \right] \varepsilon_{\max}$ $\varepsilon_{\max} = \frac{(1+\nu) \frac{\Delta}{L}}{\left[\frac{5L^2}{24H^2} + \frac{E}{4G} \right]}$ $\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} - \nu \frac{\sigma_{\min}}{E}$
 Déformation uniforme d'extension ε	$\frac{\Delta}{L} = \frac{qL^2}{EbH} \left[\frac{5L^2}{32H^2} + \frac{3E}{16G} \right]$	$\sigma_{\max} = 0$ $\sigma_{\min} = -\frac{3qL^2}{4bH^2} + E\varepsilon$ $\frac{\Delta}{L} = -\left[\frac{5L}{24H} + \frac{HE}{4LG} \right] (\varepsilon_{\max} - \varepsilon)$	$\sigma_{\max} = \frac{E\varepsilon}{2} + \sqrt{\left(\frac{E\varepsilon}{2} \right)^2 + \left(\frac{3qL}{4bH} \right)^2}$ $\sigma_{\min} = \frac{E\varepsilon}{2} - \sqrt{\left(\frac{E\varepsilon}{2} \right)^2 + \left(\frac{3qL}{4bH} \right)^2}$ $\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon}{2} (1-\nu) + (1+\nu) \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{2} \right)^2 + \left(\frac{\frac{\Delta}{L}}{\frac{5L^2}{24H^2} + \frac{E}{4G}} \right)^2}$

Δ : déflexion ou flèche maximale au centre de la structure ; Δ/L : déflexion relative sous la structure ; $\varepsilon_{\max}$: déformation maximale d'extension dans la structure ; L : longueur de la structure ; $\sigma_{\max}$ et $\sigma_{\min}$: les contraintes principales (traction=valeur positive) ; H : hauteur de structure ; G : Module de cisaillement ; E : Module d'Young ; ν : coefficient du poisson

4. Interaction Sol-Structure

Le terme d'*interaction* « sol-structure » concerne tous les ouvrages de génie civil en contact avec des sols (terrain) ou des roches. Il désigne en particulier le phénomène particulier de transmission des efforts ou des mouvements du sol à une structure ou d'une structure au sol, via les interfaces de contact entre le sol et la structure.

De nombreux auteurs ont étudié le comportement d'interfaces et leurs études concernent principalement l'une des approches suivantes :

- Approche de type contact : le contact sol-structure est modélisé par une interface (joint fictif) n'ayant pas d'épaisseur. Ce joint est affecté d'une loi de comportement reliant les contraintes et les déplacements relatifs à l'*interaction*.
- Approche de type couche mince : le contact sol-structure est modélisé par une interface mince (faible épaisseur) à laquelle on attache un comportement rhéologique propre.

La Figure 19 illustre deux approches différentes de calcul sur un problème d'interaction sol-structure illustré à gauche de la figure et portant sur un portique avec fondations ponctuelles enterrées (Magnan 1997, Soukatchoff 2007).

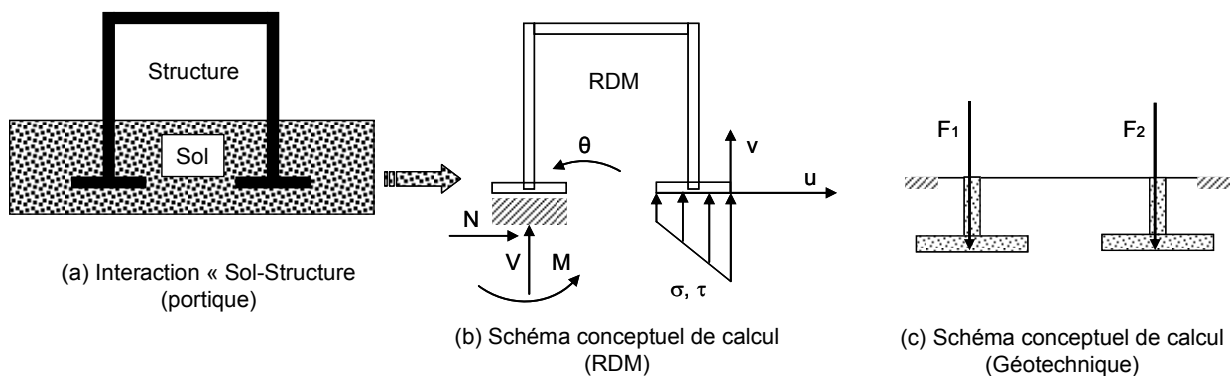


Figure 19. Analyse de comportement d'un ouvrage simple : point de vue de la structure (portique) et point de vue du sol

La Figure 19b présente schématiquement un calcul analytique typique (RDM) d'une structure en portique. Dans le cas d'une structure isostatique, le calcul est déterminé par la connaissance des conditions limites au niveau du contact avec le sol (appui simple, rotule ou encastrement par exemple) supposées fixes. Pour les structures hyperstatiques, dont les efforts internes dépendent des déformations, il est par contre essentiel d'estimer la réaction du sol sous les charges appliquées, en tenant compte du déplacement (et de la déformation) de l'interface. Les géotechniciens traitent ce type de problème différemment (Figure 19c) sous la forme d'une condition à la limite appliquée au sol et prenant la forme d'une force ponctuelle ou répartie selon la nature de la fondation.

Dans le cas où une cavité souterraine est présente dans le sol, cette dernière influence la capacité portante du sol et plus généralement son interaction avec toute structure de surface. La Figure 20 montre par exemple le cas d'une cavité circulaire souterraine située à proximité d'une fondation filante. On montre que l'interaction disparaît quand la profondeur D (distance de la surface au centre de la cavité) est supérieure à une profondeur critique D_{crit} , évaluée environ à 5 fois le diamètre w de la cavité. En deçà de la profondeur D_{crit} , la capacité portante de la fondation est perturbée par l'orientation et la position de la cavité.

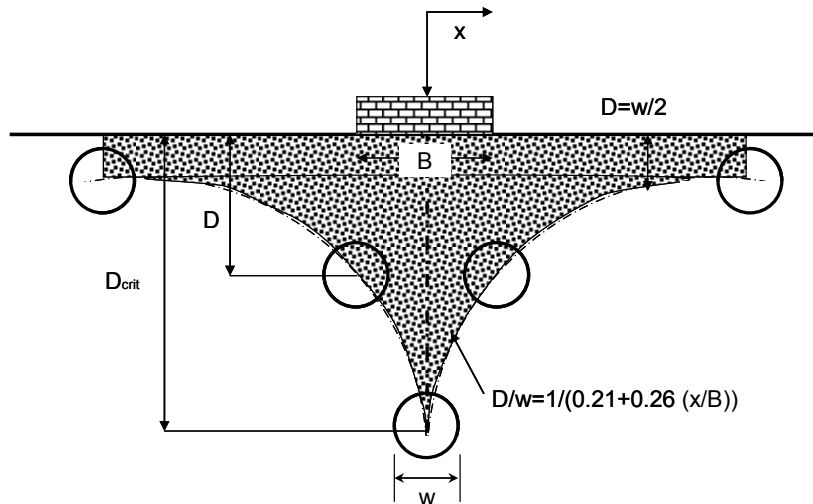


Figure 20. Modèle d'interaction entre une fondation filante et une cavité souterrain circulaire en plusieurs positions (Wood et Larnach, 1975)

Les problèmes d'interaction sol-structure sont également l'objet de nombreuses investigations dans le cas du creusement des tunnels urbains et de l'étude de leurs effets sur les structures de surface.

Comme le montre la Figure 21, les affaissements de terrains engendrés par le creusement des tunnels prennent des formes de cuvettes plus ou moins semblables aux cuvettes d'affaissement minier.

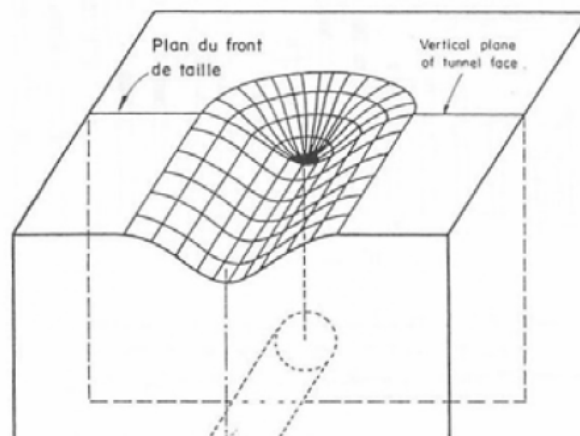


Figure 21. Forme d'une cuvette d'affaissement de surface (Schlosser, 1989)

De nombreux travaux ont donc porté sur la détermination prévisionnelle des mouvements du terrain induit par le creusement d'ouvrages souterrains et de tunnel en particulier, par :

- des méthodes empiriques basées sur des mesures de chantier (Atkinson et al. 1997 ; Sagaseta et al., 1980 ; Oteo et al., 1982 ; Poupelloz et al., 1984 ; Cetu et al., 1993 ; Mair et al. 1993 ou Aftès 1998) ;
- des méthodes analytiques (Panet et al., 1969 ; Berry et al. 1977 ; Resendiz et al., 1979 ; De Beer et Buttiens cités par Poupelloz et al., 1984 ; Sagaseta, 1987, etc.) ;
- ou des méthodes numériques

Dans ce dernier cas, certains travaux ont plus particulièrement porté sur la détermination d'une rigidité relative « sol-structure » (travaux de Potts et al., 1997 développés par Franzius et al., 2006).

La rigidité relative peut être expliquée par un terme de couplage adimensionnel qui fait intervenir le rapport entre le module d'Young du terrain et celui de la structure multiplié par une fonction de ses dimensions caractéristiques (largeur de la structure (B) si on considère un joint fictif entre le sol et la structure, largeur de la fondation si les fondations sont implantées dans le sol, épaisseur et/ou le diamètre de l'excavation (tunnel)).

Les équations suivantes montrent un exemple de modèle de couplage entre un sol et une structure de surface exposée à la présence d'une excavation souterraine (creusement du tunnel dans un massif de sol) où EI et EA sont respectivement la rigidité en flexion et la rigidité normale de la structure, Es est la rigidité du terrain (qui dépend de l'état de contraintes dans le sol), et B est la largeur de la structure (Potts et al., 1997, voir aussi Figure 20) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho^* = \frac{EI}{E_s (B/2)^4} \\ \alpha^* = \frac{EA}{E_s (B/2)} \end{array} \right.$$

Les termes de couplage ρ^* et α^* correspondent à la mesure du niveau d'interaction sol-structure et on peut aussi utiliser un critère de la forme ($\rho^* \leq n$) ou ($\alpha^* \leq n$) pour discriminer les structures ayant un comportement souple des structures ayant un comportement rigide (Thepot, 2004).

Bien d'autres auteurs ont travaillé sur ce problème d'interaction comme Potts et al. (1997), Franzius et al. (2006), en faisant intervenir la déflexion relative ($DR = \Delta/L$) comparée du sol et de la structure pour faire des corrections sur le calcul des déformations horizontales. Ils ont notamment établi des corrélations entre la déflexion relative et la rigidité normale ou de flexion.

De nombreuses études ont donc été menées pour tenter de caractériser et de quantifier l'« interaction sol-structure » ainsi que de la prendre en compte dans divers types de calcul portant sur les structures d'une part ou le sol d'autre part, considérés séparément. Le plus souvent néanmoins, seul un calcul global par modélisation numérique intégrant dans un même modèle le sol et la structure permet aujourd'hui de tenir compte valablement de cette interaction. Cela rend donc encore difficile (en raison de la complexité et de la lourdeur des modèles à utiliser) la bonne prise en compte de ce problème dans des modèles simplifiés.

CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES

1. Matériel : données et outils utilisées

Parmi les éléments indispensables à nos travaux de recherche, on trouve une base de données des habitations de la ville de Joeuf établie par un groupe d'élèves du cours de Cindyniques de Thierry Verdel², à l'Ecole des Mines de Nancy durant l'année universitaire 2004-2005. Les données recueillies portent sur la caractérisation et la localisation de la plupart des habitations de la ville reportées dans une base de données accessibles en ligne et dont la Figure 22 montre l'interface de consultation.



Figure 22. Exemple de fiche individuelle d'une maison recueillie

Quoique imparfaite par nature car les données relevées sont essentiellement des données recueillies visuellement (hormis les coordonnées reprises du cadastre), nous avons repris les éléments descriptifs de cette base pour dresser une typologie des habitations de la ville, nécessaire à notre analyse.

Dans ce sous-chapitre, nous présenterons donc tout d'abord le site de Joeuf et les données recueillies dans cette base. Ensuite, nous présenterons succinctement la méthode de modélisation que nous avons mise en œuvre, en tant qu'outil de travail, dans les plans d'expériences numériques qui constituent le cœur de notre travail de recherche. Nous présenterons à cette occasion le modèle de base sur lequel nous avons travaillé, les données de modélisation retenues, et le modèle d'affaîssement utilisé. Enfin, nous exposerons le principe des plans d'expérience et les résultats qu'on peut en attendre.

² <http://www.mines.inpl-nancy.fr/~verdel/cindy/mod.php?id=1.php>

C'est au sous-chapitre suivant que nous présenterons plus particulièrement la démarche d'exploitation des plans d'expériences numériques pour modéliser la vulnérabilité des habitations en maçonnerie ainsi que les méthodes statistiques employées notamment pour réaliser une typologie des habitations de la ville de Joeuf à partir de laquelle les plans d'expérience ont été conduits.

1.1. Site de Joeuf (54)

L'ensemble des départements (Meuse (55), Moselle (57), Meurthe et Moselle (54) et les Vosges (88)) forment la Lorraine. La ville de Joeuf est une petite ville, qui appartient à la Meurthe et Moselle (54) et qui est située dans le « pays-haut », au Nord du département, dans la vallée de l'Orne (Figure 23).

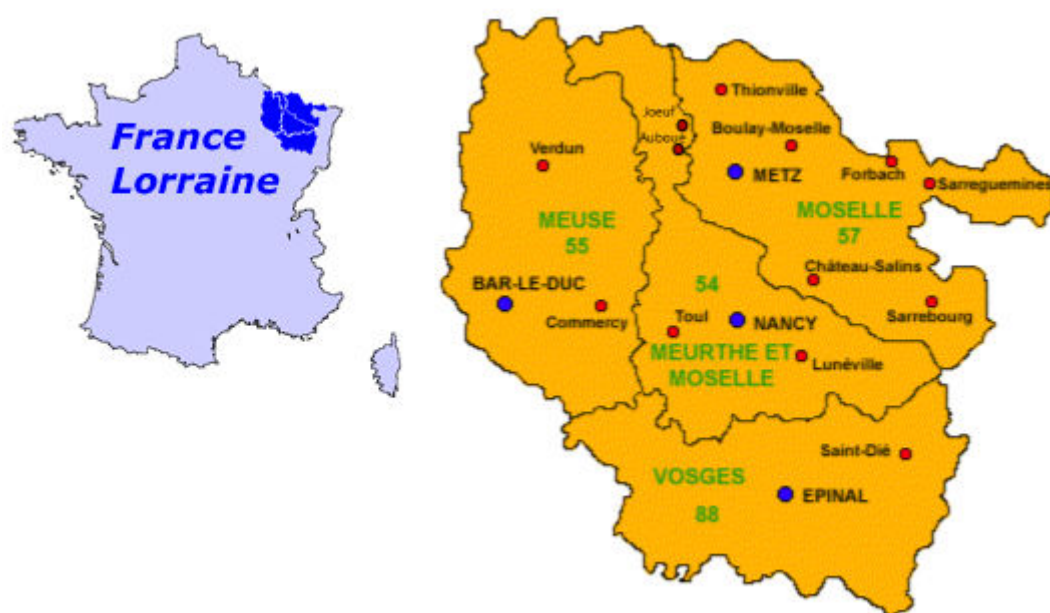


Figure 23. Localisation de la ville de Joeuf en France et en Lorraine

La ville compte un peu plus de 7000 habitants (INSEE, 2004, cité dans le Plan Local d'Urbanisme) après une baisse importante de sa population depuis les années 70, suite à la fermeture des activités minières et sidérurgiques de la région. On recense actuellement environ 1500 bâtiments dans la ville dont la majorité, qui constitue le tissu urbain traditionnel, comprend principalement des maisons individuelles en maçonnerie à rez-de-chaussée ou à un étage et de petits immeubles en maçonnerie à 1 ou 2 étages (Figure 24). On trouve aussi quelques plus grands immeubles collectifs à trois ou quatre étages, en ville et en enceinte (Ineris, 1998).

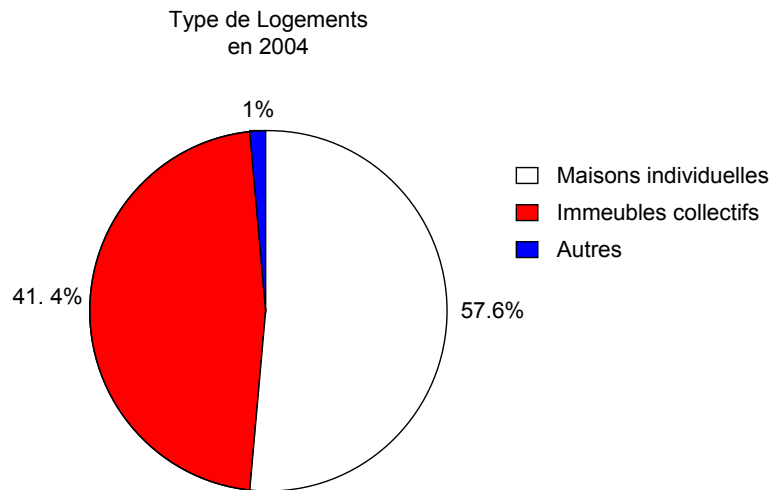


Figure 24. Types de maisons à Joeuf (INSEE 2004)

La majorité des maisons individuelles en maçonnerie sont soit jumelées soit accolées à d'autres maisons. En cas d'affaissements miniers cela contribue à l'apparition de dommages spécifiques, en particulier quand les hauteurs des maisons accolées sont différentes (Figure 25).

La ville est exposée à l'aléa « affaissement minier » comme l'indique la Figure 26 et à ce titre elle est concernée par un Plan de prévention de risques miniers (DDE, 2005).

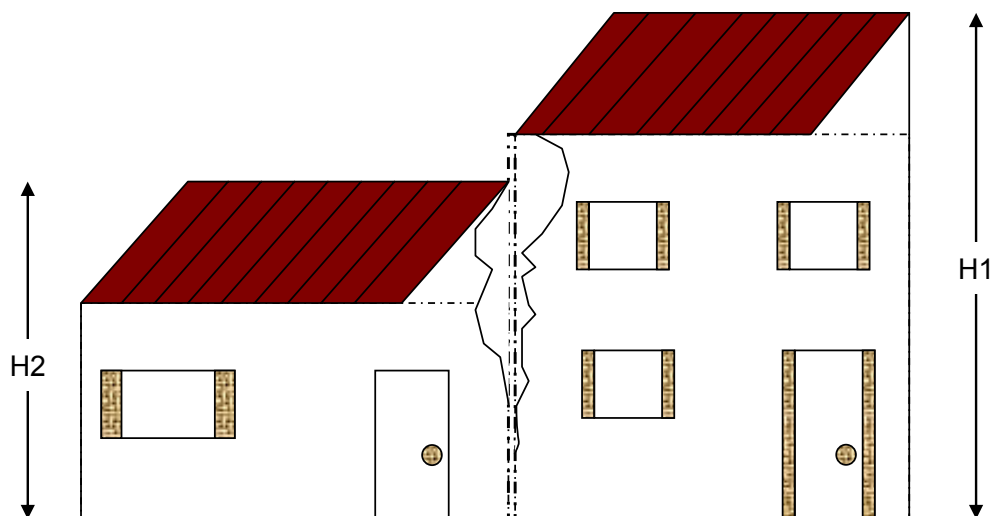


Figure 25. Dégâts sur les murs jointifs en raison de la variation de la hauteur (Zacek 1996)

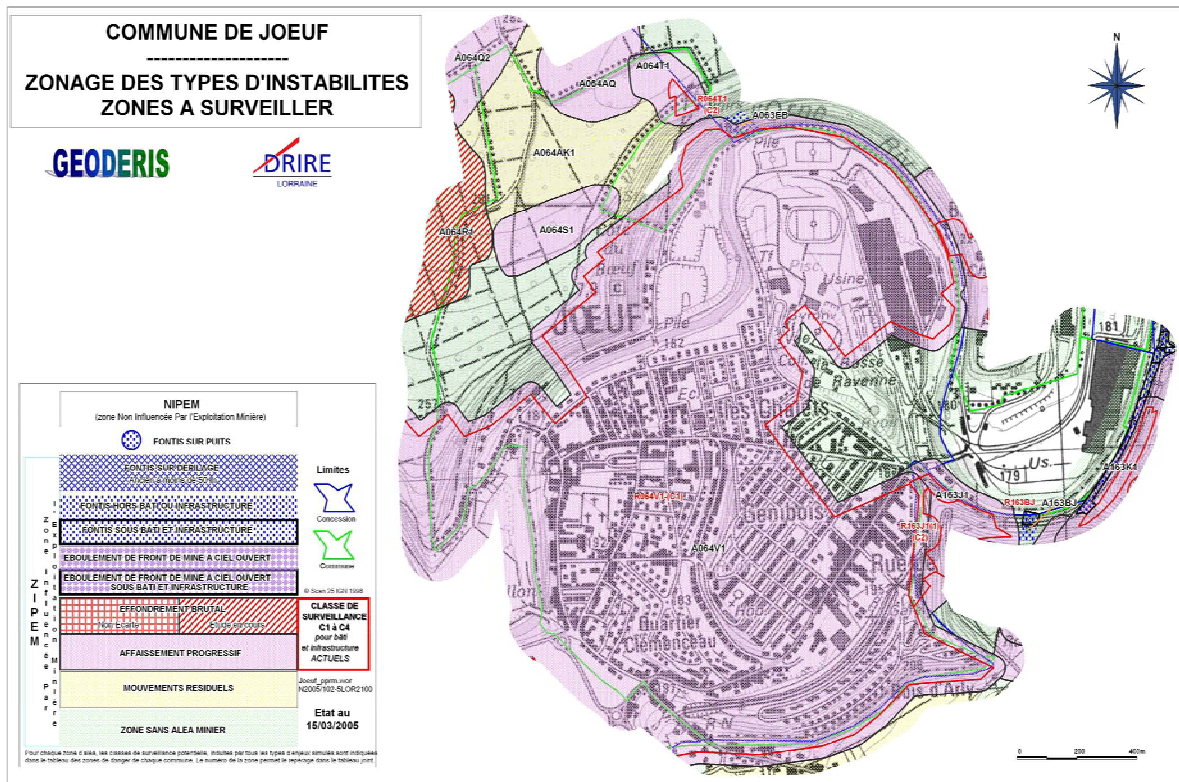


Figure 26. Zonage des types d'instabilités et des zones à surveiller vis-à-vis de l'affaissement minier

1.2. La base de données sur la ville de Joeuf

Grâce à la base des données rassemblées sur la ville de Joeuf, il est possible de se faire une idée du bâti traditionnel de la ville. Ont ainsi été répertoriées 705 habitations en maçonnerie. Pour chacune d'elle, nous disposons de sa localisation et d'une description générale obtenue à partir de l'observation de la façade visible depuis la rue, seul élément accessible durant l'enquête de terrain. Certaines données ont été recueillies directement sur le terrain lors de l'enquête de 2005. D'autres sont obtenues à partir de la photographie de chaque maison dont nous disposons également. Nous avons donc rassemblé les données aisément accessibles qui nous paraissent pouvoir jouer un rôle dans le comportement de ces ouvrages lors d'un affaissement minier.

Le Tableau 2 montre la structure des données. Pour chaque maison, indiquée en ligne, nous disposons d'un ensemble de variables caractéristiques quantitatives ou qualitatives.

Tableau 2. Forme finale de la base de données utilisées ; les maisons en ligne et les variables caractéristiques de chaque maison en colonne

Objets = Maisons = éléments	Caractères = Variables = dimensions								
		Nature	Terrain	Forme	Age	Toiture	Long.	Var. j	Var. p
	1	m(1, 1)	m(2,1)						
	2	m(2, 1)							

	i							m(i, j)	
	n								m(n,p)

Commençons par décrire les variables qualitatives que sont : le terrain, le type de maison, la forme de maison, le type de toit, l'âge de la maison.

Le terrain : Joeuf ressemble à une cuvette (Figure 27). On y trouve donc des zones plates et des zones pentues. Par cette variable, nous indiquons simplement si la maison est située sur un terrain en pente ou un terrain sensiblement plat (Tableau 3, Figure 28)

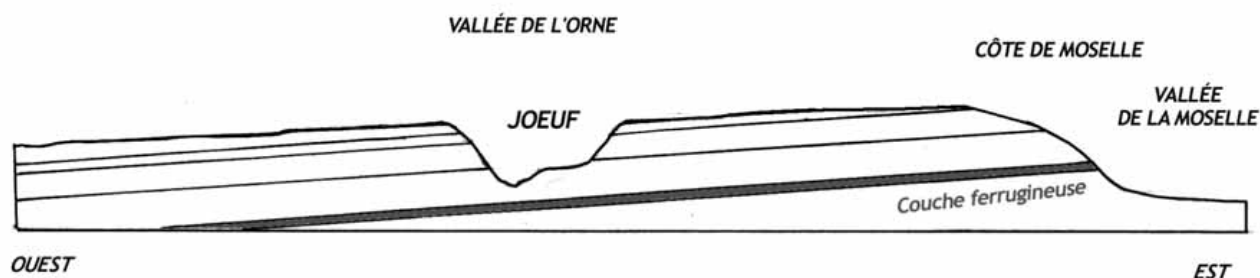


Figure 27. Coupe de l'organisation des couches géologiques dans la région de Joeuf (P.L.U. 2005)

Tableau 3. Variable « Terrain » (deux modalités)

Terrain	
Codage partiel	Codage numérique
Plat	1
Pente	2



Figure 28. Exemple de maison située en terrain plat à gauche ou en pente à droite

Le type de maison : à Joeuf, concernant l'habitat traditionnel en maçonnerie, on dénombre principalement 3 type de maisons : les pavillons individuels, les maisons mitoyennes (type corons) et les petits immeubles (Tableau 4, Figure 29).

Tableau 4. Variable « Type de maison » (trois modalités)

Type de maison	
Codage partiel	Codage numérique
Mitoyenne	1
Pavillon individuel	2
Immeuble	3



Figure 29. Exemple d'une maison mitoyenne à gauche et d'un immeuble à droite

Forme des maisons : Cette variable est déterminée à partir du plan parcellaire et selon 4 modalités (Tableau 5). Cette variable est très importante car elle peut gouverner le comportement mécanique d'une maison durant un affaissement minier.

Tableau 5. Variable « Forme des maisons » (quatre modalités)

Forme des maisons		
	Codage partiel	Codage numérique
Carré	C	1
Rectangle	R	2
En L	L	3
En H	H	4

On sait notamment la sollicitation en torsion des maisons en forme de L, H, T, etc., est très supérieure à celle des maisons symétriques et compactes (maisons individuelles ayant une forme rectangulaire ou carré). Le problème se porte notamment à la jonction des ailes où des concentrations de contraintes très importantes sont inévitables étant donnée la différence de rigidité des ailes dans une direction donnée (G.T.P.B.M.I, 2003) comme mentionnée sur la Figure 30.

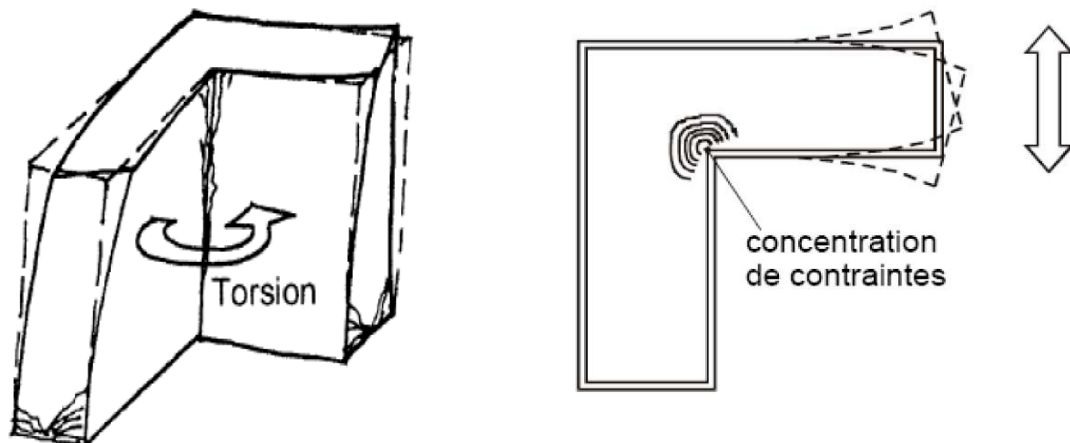


Figure 30. Influence de la forme de maison sur la résistance à la torsion (à gauche) avec possibilité concentration de contraintes dans les angles rentrants, à droite (AFPS 2002)

Type de toiture : Cette variable décrit principalement la présence de combles ou non et le cas particulier des toitures en forme de chapeau dont il existe de nombreux cas à Joeuf. C'est une variable descriptive qui a relativement peu d'importance sur le comportement des maisons en cas d'affaissement mais on peut tout de même noter que les toits sont vulnérables dans ce type de situation car ils résistent pas à des déplacements différentiels imposés à leur base, les facteurs principaux contribuant à la rupture d'une toiture étant (Zacek 1996) : l'absence ou la faiblesse des liaisons des murs à la toiture et aux diaphragmes de plancher ; la lourdeur de la toiture (poids propre) ; un défaut dans l'installation de toiture contreventée, peu raide dans son plan.

Tableau 6. Type de toiture (trois modalités)

Type de toiture		
	Codage partiel	Codage numérique
Comble	C	1
Sans comble	R	2
Chapeau (ex en Figure 28 à gauche)	L	3

Age des maisons : Ne connaissant pas la date de construction de chacune des maisons de la ville, une variable qualitative à trois modalités a été retenue pour coder cette information (Tableau 7, Figure 31). C'est une variable qui peut avoir son importance en cas d'affaissement minier car elle peut traduire soit un système constructif différent, soit un vieillissement de la structure.

Tableau 7. Age des maisons (trois modalités)

Age des maisons		
	Codage partiel	Codage numérique
Avant 1940	>1940	3
Avant 1970	>1970	2
Récent	R	1

**Figure 31. Maison d'avant 1940 à gauche, maison récente à droite**

Voyons maintenant les variables quantitatives utilisées. Elles proviennent réalisées par nous-mêmes sur le plan cadastral ou d'estimations faites à partir des photographies. Nous avons : la longueur des maisons mesurée sur le plan cadastral, leur hauteur estimée à partir d'une photographie de la façade visible, le nombre d'étages, le nombre d'ouvertures, la surface des ouvertures puis, à partir des données, nous calculons la surface totale, le rapport de la surface des ouvertures à la surface totale ainsi que l'élancement des maisons.

Longueur des maisons (Long) : Nous avons déjà vu que la longueur est un paramètre utilisé dans la plupart des méthodes empiriques ou analytiques d'estimation des dommages aux

bâtiments soumis à un affaissement minier (chapitre 1). Les bâtiments longs sont notamment plus sensibles que les bâtiments courts.

Hauteur des maisons (Haut) : C'est la hauteur totale à compter depuis le niveau du sous-sol jusqu'à pied de la toiture des maisons. Une maison étroite mais haute peut être particulièrement sensible à l'effet de pente.

Nombre d'ouvertures (NOD) : C'est une variable quantitative discrète. Elle comprend le nombre de fenêtres et de portes, indépendamment de leur taille. Un mur qui comprend de nombreuses ouvertures est a priori plus sensible aux mouvements de terrains car il amène à des concentrations de contraintes autour de ces ouvertures plus importantes ou plus nombreuses. L'expérience de Cox (1980) montre l'influence des ouvertures et de leur répartition dans les murs.

Nombre d'étages (Niv) : C'est une variable quantitative discrète, directement liée à la hauteur. En zone de mouvements de terrain, la flexibilité d'un étage de plus grande hauteur que les autres peut entraîner la rupture de cet étage (AFPS, 2002).

Surface totale (St) : C'est une variable calculée à partir de la hauteur et de la longueur (longueur x hauteur).

Surface des ouvertures (portes et fenêtres) (Sv) : C'est une variable estimée à partir des photographies pour la façade visible. Indépendamment du nombre d'ouverture, il nous paraissait utile d'en connaître la surface cumulée afin de différencier les maisons avec des petites ouvertures de celles qui en ont des grandes (portes de garage par exemple).

Rapport de la surface des ouvertures à la surface totale (Sv/St) : Calcul à partir des deux variables citées respectives. Elle traduit la fraction vide (et inversement la fraction pleine) de l'ensemble de la façade.

Élancement (H/L) : Calculée facilement, cette variable permet de discriminer des types de maisons distinctes (immeubles avec fort élancement contre maisons individuelles à plus faible élancement en général). C'est une variable susceptible de déterminer certains comportements en cas d'affaissement.

De l'analyse de ces données, nous présenterons, au chapitre 3, une typologie des bâtiments de la ville de Joeuf et comment nous avons, pour chaque type, conduit une analyse de vulnérabilité par la méthodologie des plans d'expérience et des surfaces de réponse.

Mais, au-delà de ces données et quel que soit le type d'ouvrage considéré, le comportement mécanique des habitations en maçonnerie sous l'effet de la formation d'une cuvette d'affaissement, est principalement gouverné par la nature discontinue de la maçonnerie. Cela rend nécessaire la prise en considération des propriétés mécaniques des blocs et des joints qui constituent l'ouvrage maçonné. C'est pourquoi les analyses présentées par la suite reposent sur des expériences numériques réalisées avec la méthode des éléments distincts. Il convient donc de présenter maintenant cette méthode ainsi que le modèle de base sur lequel nous avons travaillé.

1.3. Méthode des éléments distincts et modèle numérique de base employé

1.3.1. Méthode des éléments distincts

Les modèles numériques que nous avons réalisés ont été mis en œuvre avec la méthode des éléments distincts (MED) telle qu'elle est implantée dans le code de calcul Udec (Itasca Consulting Group). Cette méthode fonctionne par résolution explicite des équations du mouvement et intègre explicitement le facteur « temps ».

La modélisation du problème passe par la discrétisation en éléments (triangulaires) du milieu modélisé. En chacun de ces éléments (ou aux nœuds qui les relient), sont calculés les déplacements, vitesses, forces ou contraintes à chaque instant. Dans un calcul quasi-statique, une procédure automatique détermine le pas de temps et le facteur d'amortissement (variable) qui permettent une convergence rapide du calcul vers la solution d'équilibre des forces.

La principale caractéristique de la méthode des éléments distincts est de prendre en considération explicitement les discontinuités d'un milieu (par exemple les failles dans un massif rocheux ou, dans notre cas, les joints entre les blocs de la maçonnerie). Ainsi, le milieu modélisé est considéré comme un assemblage de blocs qui interagissent entre eux via les propriétés données aux discontinuités, considérées comme les interfaces entre les blocs. La MED accepte la modélisation d'un très grand nombre de blocs qu'on peut considérer comme rigides ou déformables. C'est uniquement dans ce dernier cas que les blocs sont discrétisés en éléments triangulaires pour le calcul des contraintes et déformations. Elle permet la modélisation des grands déplacements et des grandes rotations de ces blocs. Elle gère également le détachement complet de blocs par rapport à d'autres avec lesquels ils sont en interaction ainsi que la reconnaissance automatique des nouveaux contacts susceptibles de s'établir entre blocs, au cours de la simulation.

La Figure 32 illustre le principe de l'interaction entre blocs via les propriétés mécaniques attribuées à la discontinuité qui les sépare.

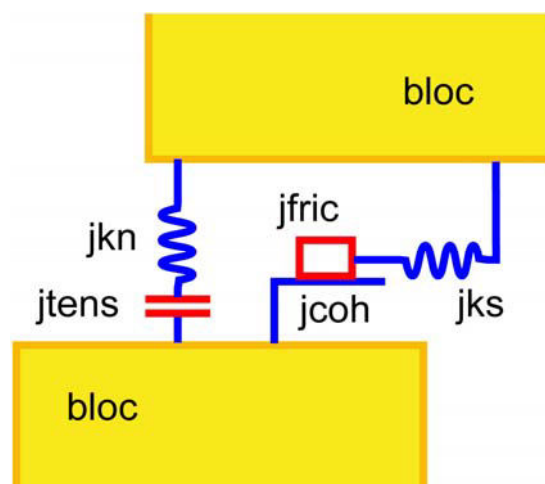


Figure 32. Principe de l'interaction entre blocs dans le code Udec (jkn : raideur normale, jks : raideur tangentielle, jtens : résistance à la traction, jcoh : cohésion, jfric : angle de frottement).

Dans nos calculs, une discontinuité (un joint) obéit à un comportement élasto- plastique parfait suivant le modèle de Mohr- Coulomb. Ce point est illustré par la Figure 33 sur laquelle on montre le principe du critère d'entrée en plasticité de Mohr- Coulomb (à droite) ainsi que le comportement mécanique en cisaillement d'une discontinuité (loi de comportement contrainte- déplacement, à gauche). En traction-compression, un joint obéit à un comportement parfaitement élastique limité en traction par la résistance à la traction. Quand la résistance à la traction est dépassée, il y a séparation des blocs.

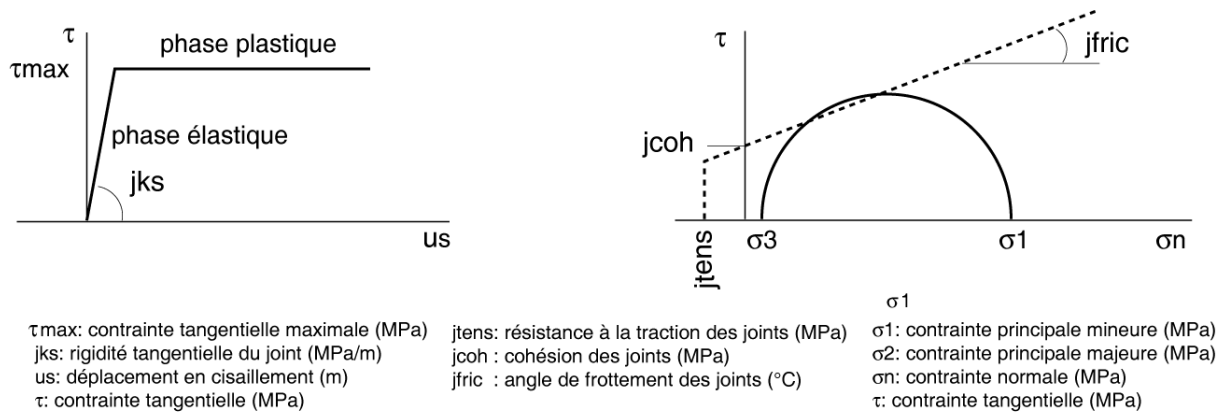


Figure 33. Principe du comportement élasto- plastique en cisaillement (à gauche) et de l'entrée en plasticité (à droite) des joints. L'entrée en phase plastique (qu'on peut assimiler à une rupture) s'opère quand le demi-cercle (qui relie la contrainte majeure à la contrainte mineure) rencontre la limite figurée en pointillés (critère de rupture).

1.3.2. Modèle numérique de base employé

Le modèle de base étudié représente un mur de maçonnerie régulière, représentatif (à l'absence d'ouvertures près) d'une maison ancienne à 2 niveaux. Le mur considéré, dont la Figure 34 montre une image, a une longueur de 10 m et une hauteur de 5,6 m. Il est constitué d'un appareillage régulier de blocs de dimensions 50 x 20 cm.

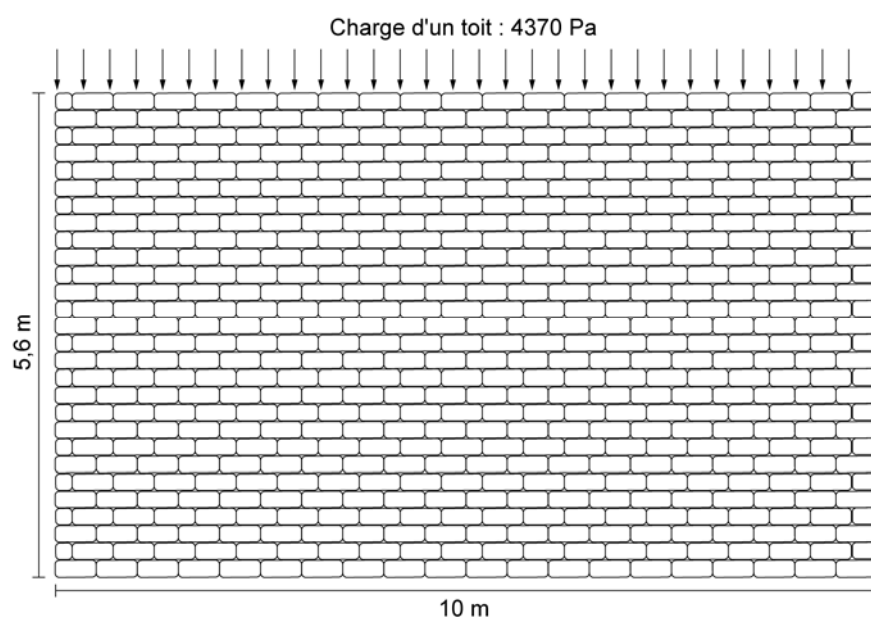


Figure 34. Géométrie du modèle employé

Une charge est appliquée sur la partie supérieure du modèle pour représenter la sollicitation du toit. Cette charge de 4370 Pa correspond à un toit de tuiles avec charpente d'une masse totale de près de 9 tonnes dont on n'a ici qu'appliqué un quart, porté par le mur modélisé.

Par ailleurs, au cours des calculs, le mur est soumis à la charge de son propre poids sous l'effet de la gravité et le calcul est mené en contraintes planes.

Les propriétés physiques et mécaniques de base utilisées dans le modèle sont rassemblées dans le Tableau 8.

Tableau 8. Caractéristiques physiques et mécaniques de base utilisées pour la maçonnerie

Blocs (élastiques)	
Masse volumique (kg/m ³)	2000
Module de Young (GPa)	16
Coefficient de Poisson	0,2
Joints (élasto-plastique avec critère de Mohr-Coulomb)	
Raideur normale (GPa/m)	16
Raideur tangentielle (GPa/m)	6,4
Angle de frottement (°)	30

Les propriétés des blocs correspondent à des valeurs typiques pour du calcaire. Ces blocs sont considérés comme parfaitement élastiques.

Les propriétés des joints choisies correspondent quant à elle à un mur dont le comportement global (milieu continu équivalent) est gouverné par une raideur (module de Young) de 2.67 GPa. Le principe de calcul de cette raideur équivalente, tiré de Hart (1990), est illustré par la Figure 35. Il est similaire pour le calcul de la raideur tangentielle. Dans le calcul, on attribue à ces joints un comportement élasto-plastique parfait avec critère de rupture de Mohr-Coulomb, tel qu'illustré sur la Figure 33.

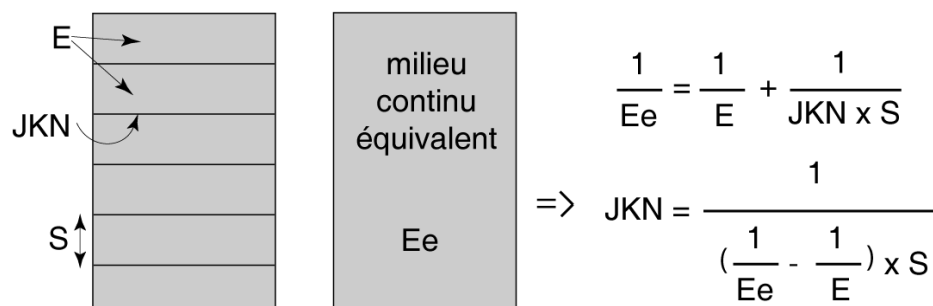


Figure 35. Principe d'estimation de la raideur normale des joints pour obtenir la raideur choisie d'un milieu continu équivalent (JKN : raideur normale des joints, E : module des blocs individualisés, S : espacement entre les joints (espacement entre les joints horizontaux est égal à 0.2 m, Ee : module de Young du milieu continu équivalent)). Dans le cas de la rigidité de cisaillement des joints, S doit être remplacé par un espacement horizontal entre les joints verticaux (ici 0.5 m)

Enfin, avant l'application de la sollicitation imposée par la formation d'une cuvette d'affaissement, un calcul préliminaire est réalisé de manière à mettre en place le champ de contrainte induit par l'action de la gravité et le poids de la toiture et obtenir un état mécanique initial (avant l'occurrence de l'affaissement).

1.4. Modèle de cuvette retenu

L'exploitation des mines souterraines consiste à extraire du sous-sol des matériaux. Plusieurs méthodes d'exploitation peuvent être utilisées selon la morphologie du gisement, sa profondeur et la nature des terrains de recouvrement. Certaines exploitations dites totales consistent à retirer l'intégralité de la couche exploitée et à laisser les terrains s'effondrer immédiatement derrière la zone d'extraction. Cela entraîne des ruptures dans les terrains de recouvrement qui conduisent à déformation du sol en surface. On emploie par exemple ce type de méthode dans l'exploitation du charbon lorrain dont le gisement est situé à grande profondeur (environ 1000 m). Les conséquences en surface sont limitées compte tenu de la profondeur d'exploitation et la déformation du sol est maîtrisée.

Concernant le gisement de fer lorrain situé à des profondeurs variant de 250 m à quelques mètres de profondeur, on a employé plus souvent la méthode des chambres et piliers abandonnés ou dépilés (Figure 36). Quand l'aplomb de la zone exploitée n'était pas urbanisé, on a généralement dépilé les piliers, c'est-à-dire qu'après avoir exploité le gisement de manière plus ou moins régulière en laissant en place des piliers destinés à supporter provisoirement les terrains de recouvrement, on a procédé à un dépilage (destruction des piliers) pour récupérer le minerai restant et pour provoquer l'affaissement des terrains permettant d'assurer une sécurité à long terme. Ce processus était maîtrisé et les conséquences en surface étaient limitées en l'absence d'enjeux. Quand l'exploitation s'est faite sous des zones urbanisées, on a laissé des piliers en place en les dimensionnant de manière à ce qu'ils puissent supporter la charge des terrains de recouvrement à très long terme. Ce fut le cas sous la ville de Joeuf comme le montre la Figure 37.

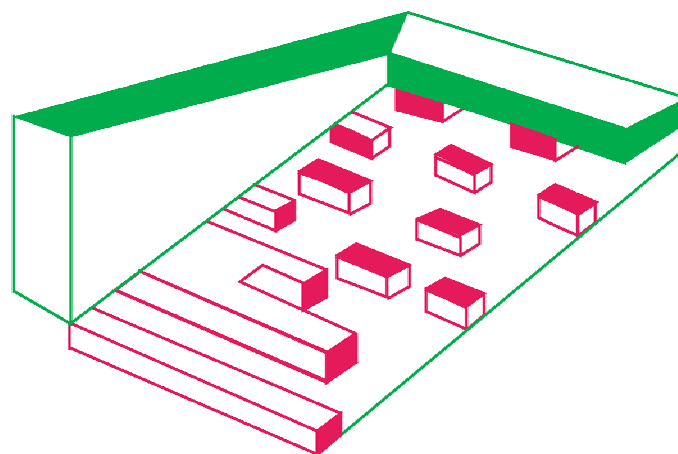


Figure 36. Méthode d'exploitation par chambres et piliers (cas lorrain, Aissaoui 1999)

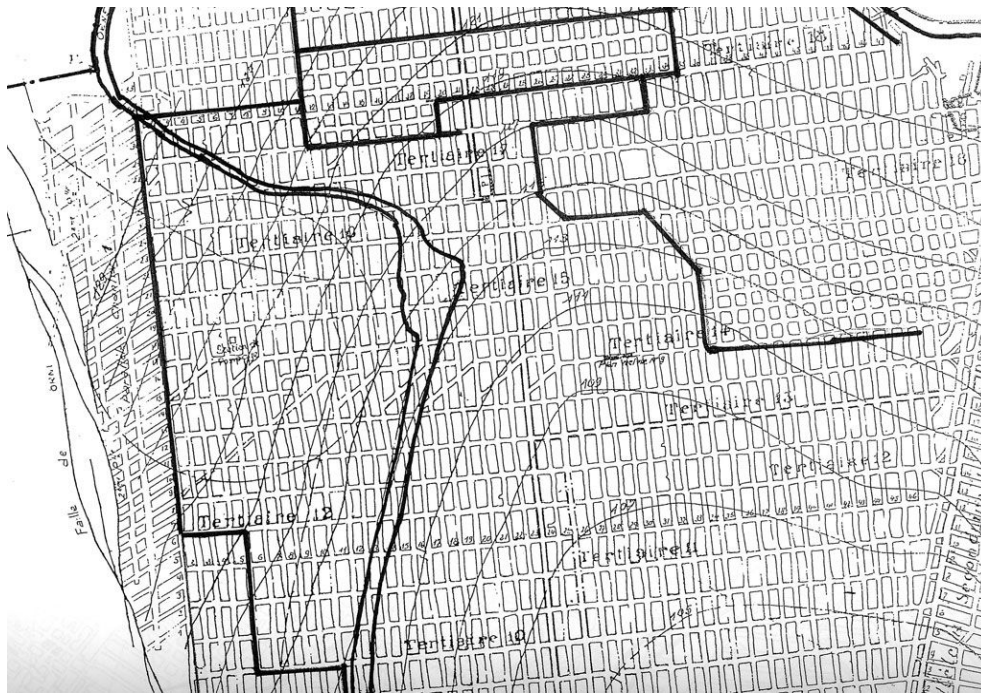


Figure 37. Extrait du plan de mine situé sous la ville de Joeuf dans l'une des couches exploitées (Ineris, 1998)

Dans certains cas, malgré les précautions prises, des ruptures de piliers ou d'intercalaires (dans le cas d'exploitation multicouches par exemple) ont pu causer la rupture complète des ouvrages miniers entraînant, en surface, la formation d'une cuvette d'affaissement responsable de destructions de bâtiments ou d'infrastructure comme ce fut le cas à Auboué en 1996 par exemple (Figure 1). La Figure 38 expose le principe de formation d'un tel affaissement.

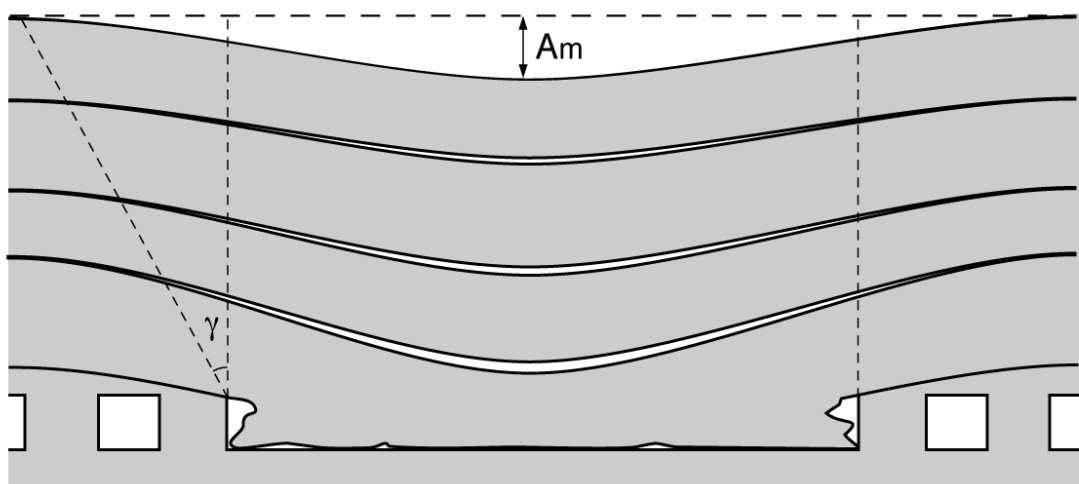


Figure 38. Principe de formation d'une cuvette d'affaissement progressif (γ angle d'influence, A_m : affaissement maximal)

Pour modéliser la forme d'une cuvette d'affaissement, plusieurs formulations existent, proposées par différents auteurs pour différents sites miniers. Ces formulations sont généralement obtenues par ajustement sur des données d'affaissements observés. Pour notre

recherche, on a utilisé le modèle de King et Whetton cité par Whittaker et Reddish (1989). Ce modèle donne la valeur du déplacement vertical $V(x)$ sous la forme mathématique suivante :

$$V(x) = \frac{Am}{2} \left(1 - \tanh \left(\frac{2x}{h \times \tan(\gamma)} \right) \right)$$

où Am est l'affaissement vertical maximal, x est la distance au point d'inflexion, h est la profondeur d'exploitation et γ est l'angle d'influence (voir Figure 39)

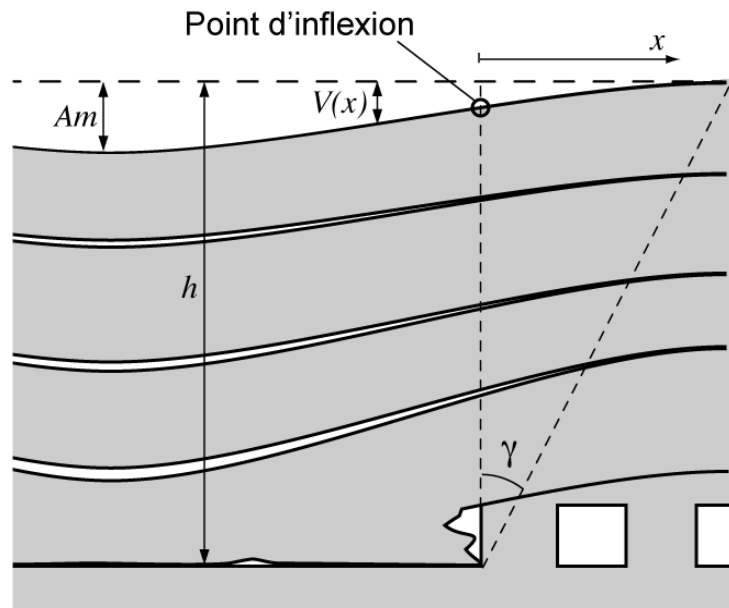


Figure 39. Caractéristiques géométriques d'un affaissement minier pour le modèle de King et Whetton

Pour nos modèles, nous nous sommes placés dans les conditions d'un affaissement minier résultant de l'effondrement d'une exploitation située à 120 m de profondeur et produisant en surface un affaissement maximal de 1 m avec un angle d'influence de 30 degrés. Ce scénario est assez proche de ce qui pourrait se produire sous la ville de Joeuf (54) en Lorraine soumise à l'aléa minier (Ineris, 1998). Le rayon de la zone effondrée est choisi égal à 300 m.

Il conduit à la forme de cuvette illustrée sur la Figure 40 sur laquelle on a indiqué les deux positions du mur modélisé ayant fait l'objet d'une investigation par plan d'expérience et analyse de la variance.

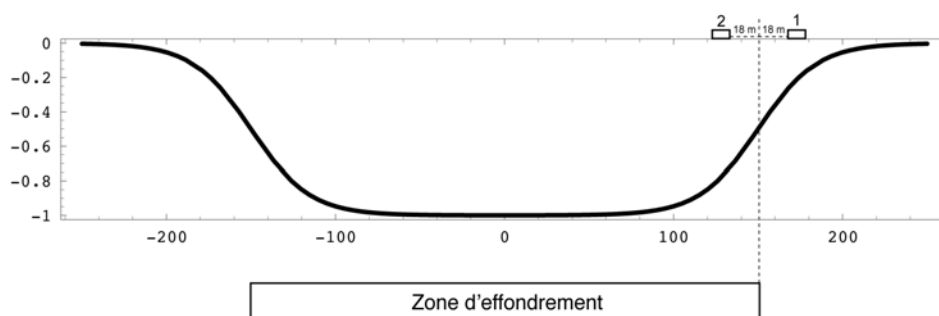


Figure 40. Cuvette utilisée dans nos calculs et localisation des deux situations étudiées (1 et 2)

Lors de la formation de la cuvette d'affaissement, le mur exposé à cet affaissement subi donc un déplacement vertical non uniforme dont la valeur dépend de sa position sur la cuvette.

S'il se situe à droite du point d'inflexion (position n°1 sur la Figure 40), il sera soumis, à la zone convexe, à un effort de traction horizontale à sa base compte tenu de la forme du déplacement vertical imposé. De même, s'il se trouve à gauche du point d'inflexion (position n°2 sur la Figure 40), il sera soumis, à la zone concave, à un effort de compression horizontal à sa base. Ces deux situations ont donc a priori des impacts sensiblement différents sur la structure c'est pourquoi nous avons choisi de les distinguer.

La Figure 41 montre la sollicitation imposée à la base pour chacune de ces positions. Nous avons en particulier choisi les deux positions qui maximisent l'écart entre le déplacement imposé à chacune des extrémités du mur.

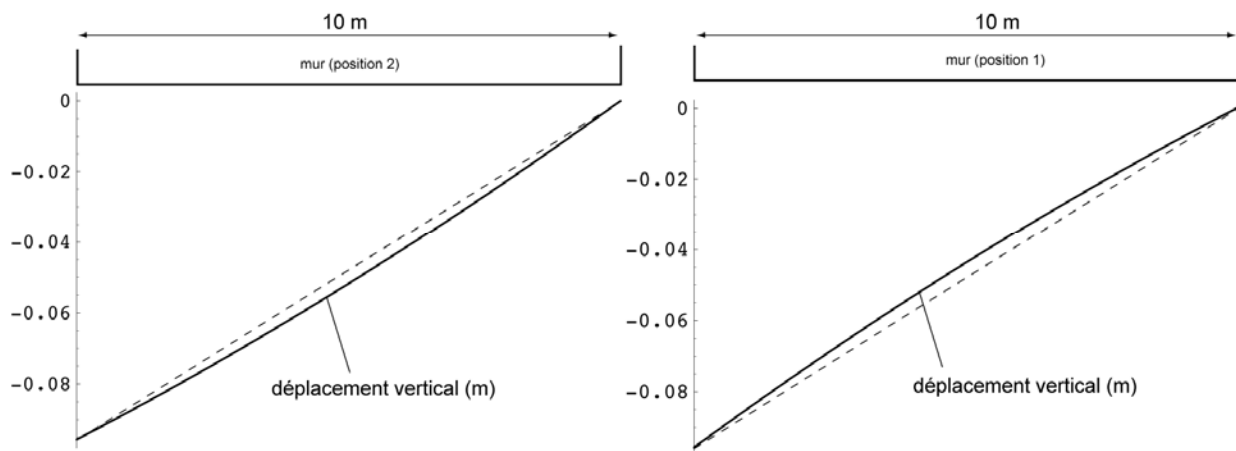


Figure 41. Déplacement vertical imposé à la base du mur pour chacune des deux positions étudiées

1.5. La méthodologie des plans d'expérience

Les plans d'expérience (on parle aussi d'expérimentation statistique) ont vocation à déterminer l'influence respective de plusieurs paramètres (de contrôle) ainsi que leur éventuelle interaction, sur un processus jugé trop complexe pour être appréhendé par des lois mathématiques. Cette méthodologie repose sur la réalisation d'un ensemble d'expériences dans lesquelles les paramètres de contrôles prennent des valeurs différentes de manière à étudier leurs influences respectives ou conjointes sur une variable d'état du système ou du phénomène étudié. Dans certains domaines ou dans le cas de certains phénomènes, il est difficile d'envisager (c'est même parfois impossible) la réalisation de nombreuses expériences physiques permettant la mise en oeuvre de tels plans. C'est pourquoi, de plus en plus souvent, nous avons recours à la modélisation numérique pour réaliser ce qu'on peut appeler des expériences numériques.

Le processus que nous avons étudié est celui par lequel la sollicitation imposée à la base du mur modélisé déforme le mur. Pour cela, il nous faut choisir une variable d'état caractéristique de la réponse globale du mur à la sollicitation. Nous avons choisi de caractériser la réponse du système par la longueur cumulée des joints ouverts (ou longueur cumulée des fissures). Cette grandeur fournit une évaluation globale de l'état de la structure après sollicitation et donc de sa vulnérabilité à la formation d'une cuvette d'affaissement.

Dans un premier temps que nous aborderons dans ce chapitre, les variables de contrôle dont nous avons étudié l'influence furent la résistance à la traction des joints de la maçonnerie (j_{tens}) et leur cohésion (j_{coh}).

La réalisation d'un plan d'expériences conduit classiquement à des résultats présentés dans un tableau comme dans le Tableau 9 pour deux variables de contrôle étudiées. Dans ce cas, au croisement de chaque modalité de chacune des variables de contrôles, un ou plusieurs expériences peuvent être conduites (on parle de répétitions). Dans le cas du Tableau 9, nous avons quatre modalités pour la variable j_{tens} , quatre modalités pour la variable j_{coh} et trois répétitions pour chaque couple de modalités des variables de contrôle.

Mais, pour tirer des conclusions d'un tel plan d'expérience, il faut observer une variation significative de la variable d'état (la réponse) quand les variables de contrôle étudiées (J_{tens} et J_{coh}) varient. Il faut placer nos expériences (ici nos modèles numériques) dans des conditions favorables. En effet, si les valeurs choisies pour les deux variables sont trop fortes, notre modèle sera trop rigide (ou restera élastique) et nous n'enregistrerons aucune apparition de fissures. La réponse sera donc uniformément nulle. C'est pourquoi, nous avons tout d'abord réalisé une étude de sensibilité destinée à identifier les valeurs de j_{tens} et j_{coh} maximales en deçà desquels des fissures apparaissent. Dès lors, il nous reste à choisir une gamme de variation sous cette valeur maximale pour chacune des variables étudiées.

Le Tableau 9 indique donc le plan d'expérience utilisé pour les deux positions étudiées (zone convexe et zone concave). Dans chaque case du tableau, 3 calculs sont réalisés pour 3 valeurs de la résistance à la traction, situées dans l'intervalle indiqué. Pour chacun des calculs, on note la valeur de la longueur cumulée des fissures.

Tableau 9. Tableau montrant le plan d'expérience utilisé

		JTENS (MPa)			
		0.1-0.15	0.07-0.09	0.04-0.06	0.01-0.03
JCOH (MPa)	1	---	---	---	---
	0.6	---	---	---	---
	0.2	---	---	---	---
	0.07	---	---	---	---

Quand ce tableau est complété, il est possible de conclure concernant l'influence respective des variables de contrôle sur la variable d'état ainsi que sur l'interaction éventuelle entre les variables de contrôle. C'est la méthode de l'analyse de variance qui permet de le faire indépendamment de tout modèle préalablement choisi pour relier les variables de contrôles à la variable d'état (ou de réponse). Mais c'est par l'étude de la surface de réponse (la surface des valeurs de variable de réponse en fonction des variables de contrôle) que nous pouvons aller plus loin et proposer un modèle reliant ces variables entre elles.

2. Méthodes

On appelle « Méthodes » l'ensemble des procédés raisonnés ou démarches organisées rationnellement pour aboutir à un résultat. Il en va ainsi du processus de production des connaissances scientifiques, que ce soit à partir d'observations (par exemple l'ensemble de nos données observées sur le terrain), ou à partir de résultats d'expériences numériques.

Nous allons présenter ici les différentes méthodes que nous avons utilisées pour produire différents résultats durant ce travail de recherche. Il s'agit en particulier de la méthode d'analyse de la variance à deux variables avec répétition, de la régression linéaire multiple, de l'analyse en composantes principales (ACP), de la méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH) et de la méthode de régression sur les composantes principales (ou orthogonales).

Nous utiliserons le cas du mur simple présenté précédemment pour illustrer la plupart de ces méthodes que nous mettrons ensuite en application, en plusieurs étapes successives, sur l'ensemble des données de la ville de Joeuf.

2.1. Analyse de la variance

Quand le Tableau 9 vu précédemment est rempli, il est possible de procéder à l'analyse de la variance dont le principe consiste à décomposer la variance totale de la réponse étudiée (longueur cumulée des fissures) en un terme expliqué par la variance de *Jtens*, un terme expliqué par la variance de *Jcoh*, un terme d'interaction et une variance résiduelle.

Cette décomposition s'écrit généralement de la manière suivante, avec la somme des carrés plutôt qu'avec les variances :

$$SCT = SC(JTENS) + SC(JCOH) + SC(JTENS, JCOH) + SCR$$

où SCT désigne la somme des carrés totale, SCR désigne la somme des carrés résiduelle et les autres termes désignent respectivement la somme des carrés expliquée par *Jtens*, par *Jcoh* et par l'interaction de *Jtens* et *Jcoh*.

Reste ensuite à réaliser les tests statistiques permettant de tester la significativité de chacun des termes dans l'explication de la somme des carrés totale. Ces tests de Snedecor sont reportés dans le Tableau 10. Pour plus d'informations sur le principe de l'analyse de la variance, on pourra se reporter à différents ouvrages ou supports de cours comme celui de Verdel (2006), disponible sur internet.

Tableau 10. Tableau d'analyse de la variance

Somme des carrés	Degrés de liberté	Valeur à comparer à une loi de Snedecor
SC(JTENS)	$p-1 = 3$	$f = \frac{SC(JTENS)/(p-1)}{SCR/pq(r-1)}$
SC(JCOH)	$q-1 = 3$	$f = \frac{SC(JCOH)/(q-1)}{SCR/pq(r-1)}$
SC (JTENS, JCOH)	$(p-1)(q-1) = 9$	$f = \frac{SC(JTENS, JCOH)/(p-1)(q-1)}{SCR/pq(r-1)}$
SCR	$pq(r-1) = 32$	Où p est le nombre de modalités de la variable JTENS, q le nombre de modalités de la variable JCOH et r le nombre de répétitions dans chaque case du plan d'expérience
SCT	$pqr-1 = 47$	

2.1.1. Résultat de l'analyse pour un mur en position 1 (Zone convexe)

Après 48 calculs réalisés avec le logiciel Udec pour les différentes valeurs de la cohésion et de la résistance à la traction des joints envisagées et pour la position 1, nous avons obtenu les résultats reportés dans le Tableau 11. Pour chacune des 4 modalités de la variable Jtens, nous avons choisi 3 valeurs numériques différentes situées dans l'intervalle indiqué dans ce même tableau.

Tableau 11. Valeurs de la longueur cumulée des joints ouverts (en m) obtenues dans chacun des calculs réalisés pour un mur en position 1 (zone convexe).

Plan d'expérience		JTENS (MPa)			
		0.15-0.12-0.1	0.09-0.08-0.07	0.06-0.05-0.04	0.03-0.02-0.01
JCOH (MPa)	1	3.8	24.5	46.4	82.5
		10.2	30.9	50.5	104
		20.9	38.9	60.7	110.5
	0.6	4.8	25.5	49.1	84
		10	26.1	54	123
		19.8	42.4	63.9	126.3
	0.2	4	24	49.8	101
		10	29.6	57	124.5
		20.2	39.3	63.9	130.3
	0.07	8.6	40.3	64.5	107.8
		21.2	48.8	75.8	126.9
		25.7	60.7	93.5	132.4

Avant de commenter ces résultats, analyser la surface de réponse obtenue et procéder à l'analyse de la variance, voyons tout d'abord quelques résultats de modélisation.

La Figure 42 montre par exemple le champ de contrainte et la répartition des fissures dans l'un des modèles de cette série. On observe ainsi, en comparant les deux images, que les fissures apparaissent principalement dans la zone principale de traction située au milieu et en haut de la structure. Sur le plan mécanique, on comprend ainsi que l'ouvrage semble se

courber vers le bas en « s'enroulant » autour d'un noyau central qui concentre les fortes compressions (au milieu en bas). Ces résultats traduisent donc globalement l'effet de courbure vers le bas (centre de courbure vers le bas) qui tend à éventrer l'ouvrage dans son milieu, à partir du haut. Cet effet était attendu compte tenu de la forme de la sollicitation (courbure tournée vers le bas) telle qu'illustrée sur l'image de droite de la Figure 41.

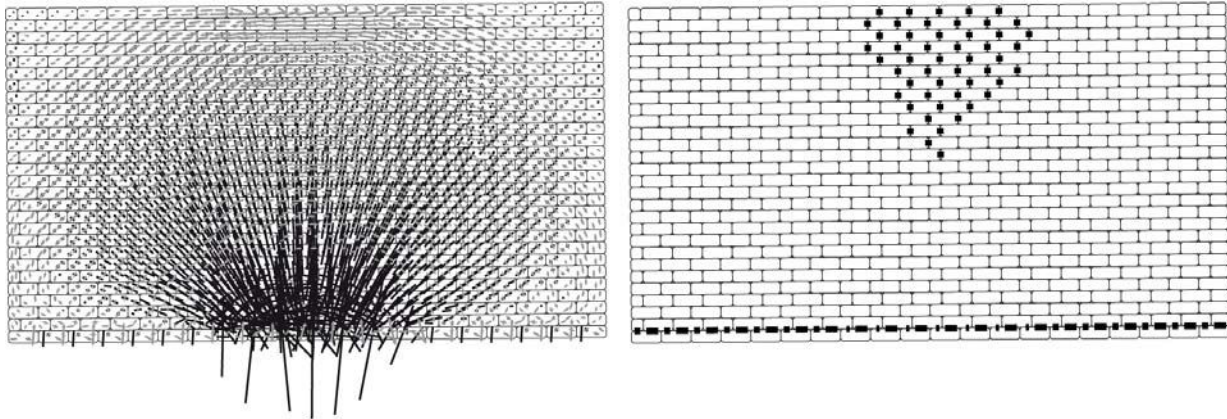


Figure 42. Répartition des contraintes principales (à gauche : traction en gris et compression en noir) et indication des joints ouverts (à droite) dans le modèle pour lequel j_{tens} est égal à 0,12 MPa et j_{coh} à 0,2 MPa (mur en position 1, zone convexe).

On trouvera en annexe 1 d'autres illustrations pour d'autres valeurs des paramètres étudiés dans lesquels on pourra remarquer que l'effet de courbure vers le bas est d'autant plus marqué que la cohésion et la résistance à la traction de joints sont plus élevées.

Voyons maintenant la surface de réponse obtenue pour ce plan d'expérience. Elle est donnée sur la Figure 43. Il apparaît graphiquement que la résistance à la traction influence la réponse, que la cohésion l'influence assez peu et que l'interaction entre ces deux paramètres semble peu significative, sinon inexistante.

Plus la résistance à la traction augmente, moins il y a des fissures dans la structure, ce qui est conforme au bon sens. De même, la longueur cumulée des fissures diminue très légèrement quand la cohésion augmente. La surface montre également, selon toute vraisemblance, que lorsque la résistance à la traction dépasse 0.15 MPa, la longueur cumulée tend vers zéro. On pourrait en conclure qu'il s'agit du seuil d'apparition des fissures, valeur que nous avons déterminé dans l'étude de sensibilité initiale.

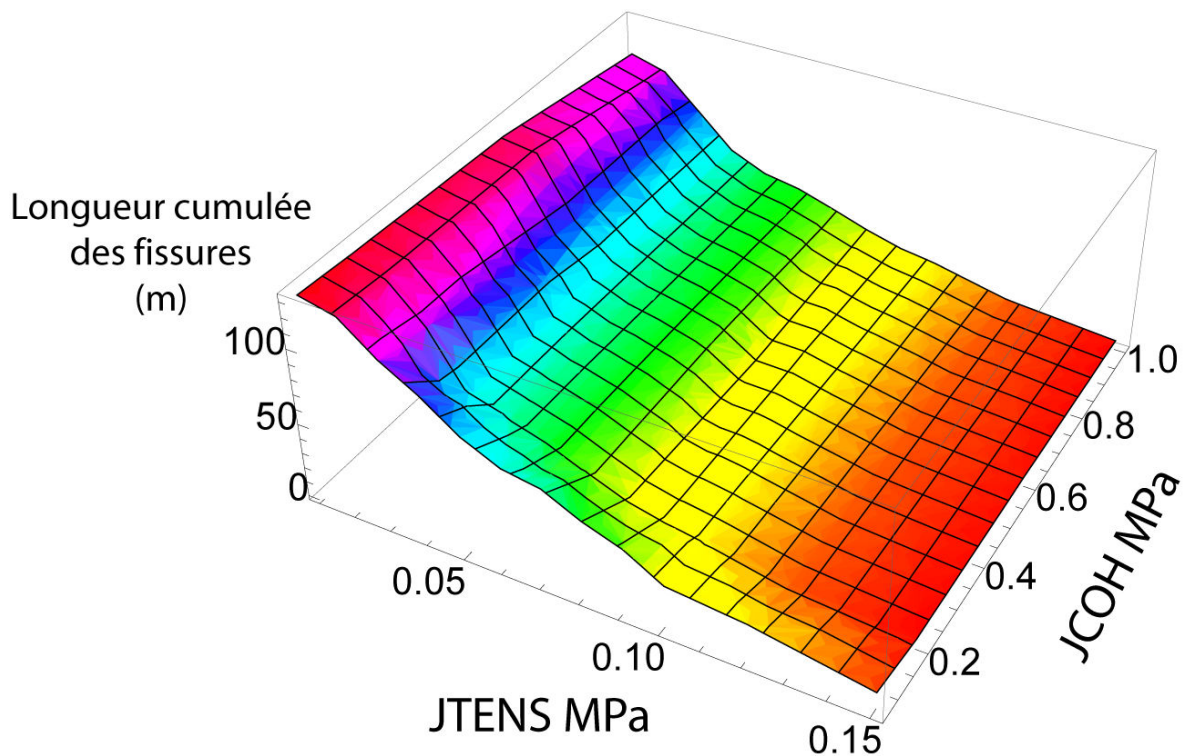


Figure 43. Surface de réponse obtenue pour le mur en position 1 (axe vertical : longueur cumulée des fissures ; premier axe horizontal : Jtens ; deuxième axe horizontal : Jcoh)

Faisons maintenant l'analyse de la variance pour vérifier ces remarques. Des valeurs du Tableau 11, on peut construire le Tableau 12, dit d'analyse de la variance.

Tableau 12. Tableau d'analyse de la variance pour l'expérimentation sur le mur placé en position 1 (zone convexe)

Paramètre	Degrés de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	f de Snedecor	Probabilité à droite correspondante
JTENS	3	65690	21897	164	0.
JCOH	3	2327	776	5.8	0.00277
JTENS-JCOH	9	735	82	0.6	0.78735
Erreur	32	4275	134		
Total	47	73026	1554		

On peut en conclure que la variation de la résistance à la traction des joints explique en grande partie la variation obtenue pour la longueur cumulée des fissures. On peut dire qu'elle a un pouvoir explicatif fort ou qu'elle est hautement significative compte tenu de la valeur du f de Snedecor obtenue. De même, la cohésion des joints est significative mais nettement moins que la résistance à la traction. Enfin, on peut conclure à l'absence d'interaction entre ces deux paramètres dans la contribution la variance totale (celle de la longueur cumulée des fissures).

2.1.2. Résultat de l'analyse pour un mur en position 2 (zone concave)

De même que précédemment, la longueur cumulée des joints ouverts (ou fissures) obtenue pour chacun des 48 calculs réalisés sur le mur en position 2 (zone concave) sont reportés dans le Tableau 13.

Tableau 13. Valeurs de la longueur cumulée des joints ouverts (en m) obtenues dans chacun des calculs réalisés pour un mur en position 2 (zone concave).

		JTENS (MPa)			
		0.15-0.12-0.1	0.09-0.08-0.07	0.06-0.05-0.04	0.03-0.02-0.01
JCOH (MPa)	1	19	47.3	69.8	95.9
		29.9	47.8	70.5	96.5
		36	53.9	77	117.1
	0.6	28.3	47.7	69.7	97.7
		35.5	58	71	98.4
		47.3	62.4	80.6	98.9
	0.2	38.1	55.8	72.6	96.3
		43.7	57.1	81	97.5
		50.9	59.2	81.5	98.2
	0.07	28.6	62.6	78.9	100.7
		37.6	70.3	82.6	108.2
		54.6	72.1	88.9	110.2

Sur le plan mécanique, on constate, sur l'exemple donné sur la Figure 44 une différence nette de comportement par rapport à la situation précédente. La structure semble prendre appui sur ces deux extrémités en se courbant vers le haut faisant naître une fissuration diagonale typique.

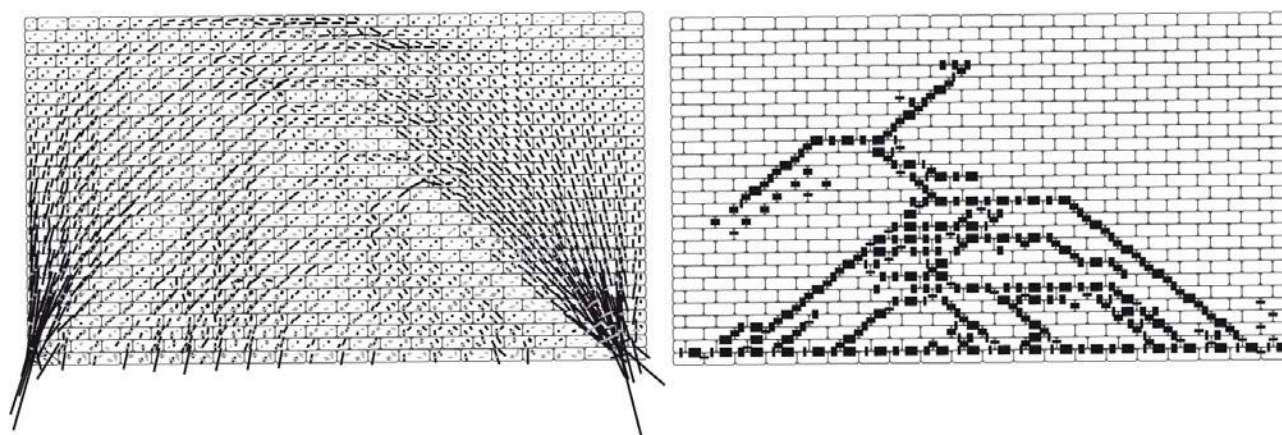


Figure 44. Répartition des contraintes principales (à gauche : traction en gris et compression en noir) et indication des joints ouverts (à droite) dans le modèle pour lequel jtens est égal à 0,12 MPa et jcoh à 0,2 MPa (mur en position 2, zone concave)

On trouvera en annexe 2 d'autres illustrations pour d'autres valeurs des paramètres étudiés dans lesquels on pourra remarquer que l'effet de courbure vers le haut est d'autant plus marqué que la cohésion et la résistance à la traction de joints sont plus élevées).

La Figure 45 montre quant à elle la surface de réponse obtenue. On y retrouve à peu près les mêmes caractéristiques que dans la situation précédente qui confirment l'influence prépondérante de la résistance à la traction des joints dans l'explication de la longueur cumulée des joints ouverts. La cohésion a peu d'influence et il semble y avoir l'absence d'interaction entre ces deux paramètres.

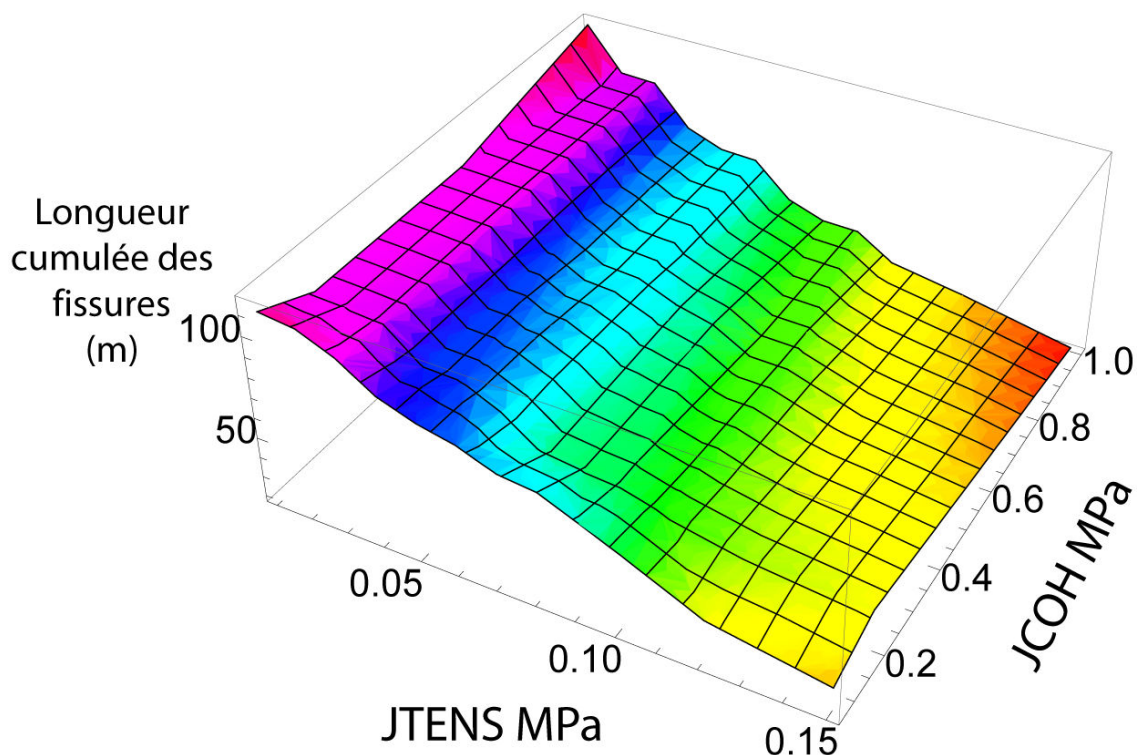


Figure 45. Surface de réponse obtenue pour le mur en position 2 (axe vertical : longueur cumulée des fissures ; premier axe horizontal : jtens ; deuxième axe horizontal : jcoh)

Ces résultats graphiques sont confirmés par le tableau d'analyse de la variance (Tableau 14).

Tableau 14. Tableau d'analyse de la variance pour l'expérimentation sur le mur placé en position 2 (zone concave)

Paramètre	Degrés de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	f de Snedecor	Probabilité à droite correspondante
JTENS	3	26834	8945	194	0.
JCOH	3	807	269	5.8	0.00277
JTENS-JCOH	9	542	60	1.3	0.27532
Erreur	32	1482	46		
Total	47	29666	631		

On peut donc conclure, comme précédemment, que la résistance à la traction est la variable dont la variation explique le plus la variation de la longueur cumulée des joints ouverts. La

cohésion est aussi significative mais nettement moins influente tandis qu'il n'y a pas d'interaction entre ces deux paramètres.

2.2. Régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple est l'une des méthodes statistiques les plus largement utilisées. Elle vise à ajuster un modèle mathématiques de forme données sur un ensemble de données fournies. Dans le cas du mur présenté précédemment, il s'agit de modéliser la surface de réponse, c'est à dire de trouver une relation liant la réponse (la longueur cumulée des fissures dans chaque modèle, dénommée variable expliquée) aux variables, aussi nommées régresseurs ou variables explicatives, que sont ici : la résistance à la traction (J_{tens}), la cohésion (J_{coh}) et leur éventuelle interaction. Un tel modèle permet de quantifier l'influence respective d'une des variables sur la réponse. Elle permet également d'envisager des prédiction de la réponse à partir de nouvelles valeurs des variables explicatives. D'après Akossou et al (2005), on peut dans notre cas, envisager le modèle théorique suivant :

$$Lc = \beta_0 + \beta_1 J_{tens} + \beta_2 J_{coh} + \beta_{12} (J_{tens} \times J_{coh})$$

où β_0 , β_1 , β_2 , β_{12} sont des coefficients de régression à partir desquels l'influence des paramètres étudiés pourra être quantifiée et Lc désigne la longueur cumulée des joints ouverts (ou fissures)

Pour permettre la comparaison des coefficients de régression, les données doivent être normalisées (J_{tens} et J_{coh} variant entre -1 (correspondant à la vraie valeur minimale) et 1 (correspondant à la vraie valeur maximale)). Ainsi les coefficients de régression sont insensibles à l'étendue réelle de la variation des paramètres de contrôle correspondant, permettant leur interprétation directe en terme de « poids » relatif des paramètres (Borcard, 2007).

Les variables de contrôle sont donc normalisées entre [-1, +1] par le changement de variable suivant :

$$F_n = 2 \times \left[\frac{F - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \right] - 1$$

où F_n désigne la valeur normalisée de la variable considérée (J_{tens} ou J_{coh} ou ($J_{tens} \times J_{coh}$)) et F , $F_{\min}$ et $F_{\max}$ désignent respectivement la valeur initiale, la vraie valeur minimale et la vraie valeur maximale de la variable.

2.2.1. Résultat de l'analyse pour un mur en position 1 (zone convexe)

Reprenant les résultats du Tableau 11 (réponse du mur à la sollicitation en zone convexe) ; il s'agit d'obtenir une équation (normalisée) décrivant la surface de la Figure 43 de la forme indiquée précédemment.

La Figure 46 illustre le résultat obtenu qui prend la forme mathématique suivante :

$$Lc = 44.3 - 61.7 J_{tens} - 6.4 J_{coh} + 5.8 J_{tens} J_{coh}$$

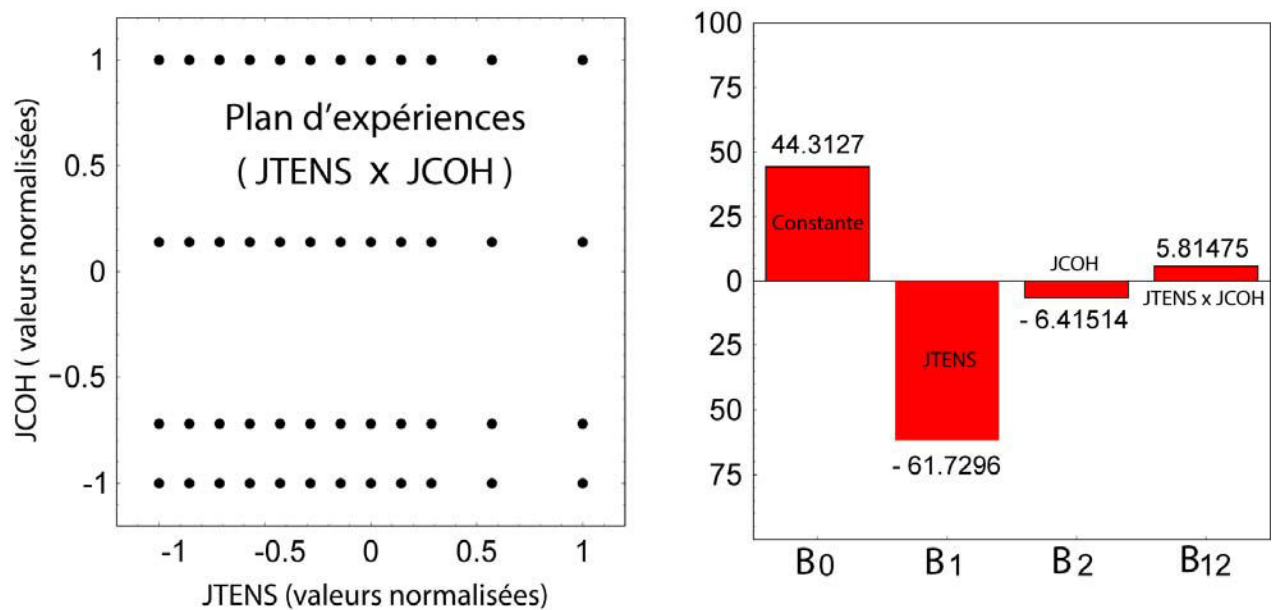


Figure 46. Plan d'expérience à gauche (les axes représentent les valeurs de jcoh et jtens normalisées et les points indiquent les valeurs utilisées dans la régression) et les différents coefficients de régression obtenus, à droite, pour l'analyse de la position 1

Pour aller plus loin et tester la robustesse des coefficients ainsi obtenus, il est possible de calculer les coefficients de régression non pas pour tous les couples (jtens, jcoh) du plan d'expérience, mais pour un sous-ensemble d'entre eux, tiré aléatoirement. En répétant cette opération un très grand nombre de fois (méthode de Monte Carlo), on obtient autant de coefficients de régression dont on peut dessiner l'histogramme comme sur la Figure 47, et sur lesquels on peut conduire un test de significativité de Student.

Cette figure confirme globalement l'influence prépondérante de la résistance à la traction (Jtens) puisque le coefficient β_1 (histogramme de gauche) prend toujours de grandes valeurs, nettement différentes de 0 tandis que les coefficients β_2 (histogramme du milieu) et β_{12} (histogramme de droite) montrent qu'ils peuvent prendre des valeurs nulles. Un test statistique de nullité de ces coefficients (test de Student) confirme que ces coefficients peuvent être considérés comme nuls. Par conséquent le paramètre Jcoh et le paramètre d'interaction entre Jcoh et Jtens ne sont pas statistiquement significatifs.

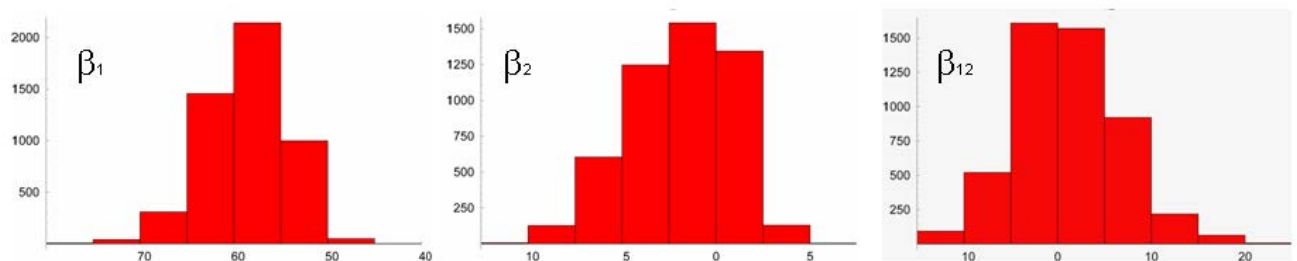


Figure 47. Histogrammes des coefficients de régression multiple (Jtens : β_1 , Jcoh : β_2 , (Jtens Jcoh) : β_{12}) obtenus par méthode de Monte Carlo.

Revenant au modèle général obtenu, on peut conclure que le paramètre (Jtens), à travers son coefficient β_1 (de 61,7 en valeur absolue), a un impact très fort sur la réponse, qui explique la variation globale de la longueur cumulée de fissures. Par contre, la cohésion (Jcoh) à travers

son faible coefficient ($\beta_2 = -6,41$) ainsi que l'interaction entre ces deux paramètres ($\beta_{12} = 5,81$) ont peu d'importance, ces deux coefficients pouvant statistiquement être considérés comme nuls.

2.2.2. Résultat de l'analyse pour un mur en position 2 (zone concave)

De même que précédemment, pour un mur en position 2, on obtient le modèle suivant illustré sur la Figure 48 :

$$L_c = 60.6 - 41.9 J_{tens} - 5.6 J_{coh} - 3.9 J_{tens} J_{coh}$$

De ces résultats ainsi que de la figure des histogrammes obtenus par méthode de Monte Carlo et présentés en Figure 49, on peut en conclure que le paramètre prépondérant est la résistance à la traction (J_{tens} , coefficient β_1), tandis que la cohésion (J_{coh} , coefficient β_2) et l'interaction (coefficient β_{12}), tout en étant significatives (coefficients statistiquement non nuls) sont peu influentes.

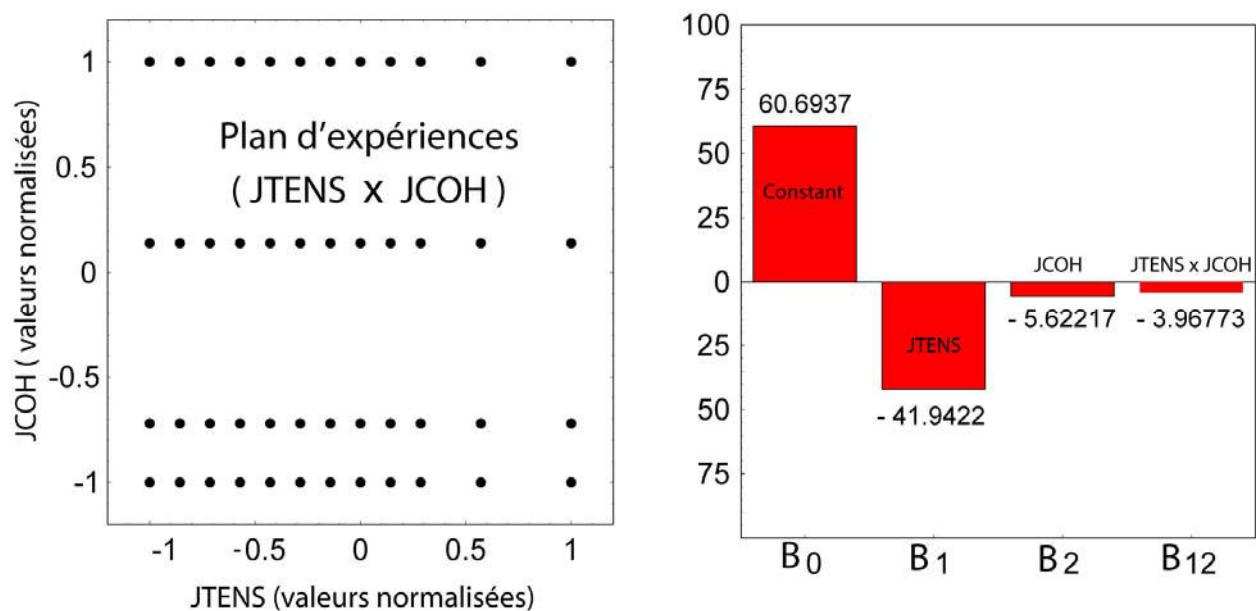


Figure 48. Plan d'expérience à gauche (les axes représentent les valeurs de j_{coh} et j_{tens} normalisées et les points indiquent les valeurs utilisées dans la régression) et les différents coefficients de régression obtenus, à droite, pour l'analyse de la position 2

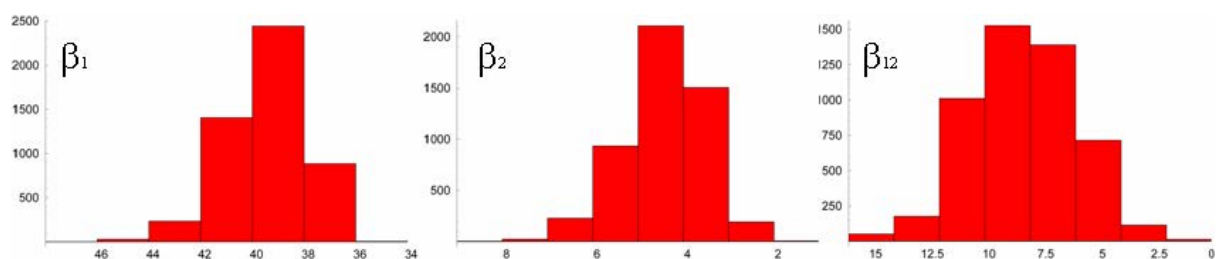


Figure 49. Histogrammes des coefficients de régression multiple (J_{tens} : β_1 , J_{coh} : β_2 , ($J_{tens} J_{coh}$) : β_{12})

2.3. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales est une méthode d'analyse pour l'étude exploratoire ou la compression d'un grand tableau de données comprenant un nombre n d'individus (dans notre cas, les habitations de Joeuf) décrits par un nombre p de variables numériques. Dans l'espace de p variables, ces individus forment un nuage de n points. n et p peuvent être très grand.

L'objectif de la méthode est de projeter le nuage de n points dans un espace de dimension réduite en déformant le nuage initial le moins possible. En d'autres termes, il s'agit d'obtenir le résumé le plus pertinent possible des données principales (Bouroche et al., 1980).

Concernant la base de données de la ville de Joeuf, nous avons $n=705$ individus (habitations en maçonnerie) et $p=8$ variables retenus pour l'analyse (Long, Haut, NOD, Niv, St, Sv, Sv/St, H/L) car l'ACP n'est pas adapté à la prise en compte des variables qualitatives.

L'ACP est une donc méthode factorielle qui consiste à remplacer la famille des p variables initiales par une série de nouvelles variables dites « synthétiques » de variance (*inertie*) maximale, non corrélées deux à deux et qui sont des combinaisons linéaires des variables initiales. Ces nouvelles variables synthétiques, appelées *composantes principales*, déterminent des plans factoriels de base à une représentation graphique plane des variables initiales. L'interprétation des résultats se limite généralement aux deux premiers plans factoriels, sous réserve qu'ils expliquent la majeure partie de l'*inertie* du nuage des variables initiales.

Vue l'hétérogénéité des données choisies pour l'analyse, nous avons normalisé le Tableau 2 (centrage sur la moyenne et réduction par l'écart-type). En ACP normée, les variables projetées sur chaque plan factoriel se trouvent à l'intérieur du cercle de rayon unité. Plus une variable est projetée près du bord du cercle, mieux elle est représentée dans le plan factoriel. Si ce n'est pas le cas, on est contraint d'explorer le plan de projection (1-3) ou le plan (2-3) jusqu'à trouver la meilleure représentation possible de toutes les variables (variance (*inertie*) optimale). Par ailleurs, deux variables bien représentées et proches l'une de l'autre sont corrélées (forte liaison) positivement, par contre, deux variables bien représentées et diamétralement opposées sont corrélées négativement. Une orthogonalité entre deux variables traduit l'absence de corrélation linéaire.

L'ACP ne mesure que des liens linéaires entre les variables. Avant de conclure sur l'existence ou l'absence de relations entre variables, il est recommandé de vérifier graphiquement la projection des variables de même que la projection des individus sur les plans factoriels (voir chapitre 3).

2.4. Classification ascendante hiérarchique

Partant d'un ensemble de 705 maisons, il nous a paru nécessaire d'y extraire des sous-ensembles homogènes (types) présentant des caractéristiques communes afin de réaliser une analyse de vulnérabilité sur chacun des types. Pour cela, nous avons eu recours à la méthode de classification hiérarchique ascendante.

Cette méthode nécessite la définition d'une mesure de similarité ou de distance entre les maisons à regrouper grâce à laquelle on agrège les maisons en un nombre fini de groupes. La

méthode produit une suite de partitions emboîtées de l'ensemble des maisons à regrouper en groupes homogènes. Cette méthode classique dans son utilisation est donc proche des méthodes d'analyse factorielle.

Au départ de la procédure chaque maison constitue un groupe (partition la plus fine), puis on agrège, itérativement, pas à pas, les deux maisons les plus proches au sens de la similarité. Quand un groupe est formé, la mesure de similarité se fait avec le centre de gravité du groupe. Les regroupements continuent progressivement jusqu'au regroupement de tous les individus dans une seule classe.

Les partitions peuvent être représentées dans un arbre de classification qu'on appelle un « dendrogramme » (voir chapitre 3). Le nombre de groupes finalement retenu dépend du niveau de coupe choisi dans l'arbre. Il existe des « indices de niveau » pour estimer la qualité d'une partition et le gain ou la perte de similitude au niveau de chaque nœud.

La mesure de distance adoptée, dans notre cas, est la distance euclidienne puisqu'on fait une classification après à une ACP qui adopte ce processus. La distance euclidienne entre deux individus i et j s'écrit donc :

$$d^2(x_i, x_j) = \sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2$$

où p est le nombre de variables.

Cette même distance peut être obtenue à partir du coefficient de corrélation de Pearson :

$$d(x_i, x_k) = 1 - r_{(x_i, x_k)}$$

Une bonne partition est celle pour laquelle la variance inter-groupe est forte et la variance intra-groupe faible. Cette information est accessible sur le dendrogramme par l'intermédiaire de l'indice de Ward. Il convient généralement de couper l'arbre au nœud précédent le premier saut jugé significatif (Bouroche 1980) comme nous le verrons au chapitre 3.

2.5. Régression sur les composantes principales (ou orthogonale)

A proprement dit, les modèles traditionnels de régression linéaire multiple sont mis en défaut par les éventuelles colinéarités entre les variables. Pour s'affranchir de la colinéarité possible entre les variables, on utilise les composantes principales (variables synthétiques) obtenues à l'issue d'une analyse en composante principale sur les variables. Ces composantes principales qui correspondent aux axes factoriels ont l'avantage d'être indépendantes par construction.

Pour éviter ce type de problème, il est donc recommandé de s'engager dans une méthode plus pertinente comme la régression linéaire sur les composantes principales (facteurs indépendants par défaut) encore appelée régression orthogonale.

Le modèle linéaire que nous recherchons est alors décrit par l'expression suivante (Foucart 2006) :

$$Domage = F' \rho + \varepsilon$$

où F^t est le vecteur des composantes principales $(f_c^1, f_c^2, f_c^3, \dots, f_c^n)^t$ et ρ^t le vecteur des coefficients de régression théoriques $(\rho^1, \rho^2, \rho^3, \dots, \rho)^t$ entre la variable de sortie (dommage égal ici à la longueur cumulée des fissures tel qu'obtenus par modélisation numérique avec Udec) et les composantes principales F^t issues des variables (de contrôle).

On peut donc écrire l'expression sous la forme suivante :

$$\hat{Dommage} = \rho^1 f_c^1 + \rho^2 f_c^2 + \rho^3 f_c^3 + \dots + \rho^p f_c^p$$

Pour récupérer les coefficients de la liaison linéaire entre les variables (de contrôle) et les axes factoriels, il faut reprendre le résultat de l'analyse en composante principale qui donne les coordonnées des composantes principales dans le système des variables initiales :

$$f_c^1 = \beta_{1i} Long + \beta_{1i} Haut + \beta_{1i} NOD + \beta_{1i} Niv + \beta_{1i} St + \beta_{1i} Sv + \beta_{1i} Sv / St + \beta_{1i} (H / L)$$

$$f_c^2 = \beta_{2i} Long + \beta_{2i} Haut + \beta_{2i} NOD + \beta_{2i} Niv + \beta_{2i} St + \beta_{2i} Sv + \beta_{2i} Sv / St + \beta_{2i} (H / L)$$

$$f_c^3 = \beta_{3i} Long + \beta_{3i} Haut + \beta_{3i} NOD + \beta_{3i} Niv + \beta_{3i} St + \beta_{3i} Sv + \beta_{3i} Sv / St + \beta_{3i} (H / L)$$

.

.

$$f_c^p = \beta_{pi} Long + \beta_{pi} Haut + \beta_{pi} NOD + \beta_{pi} Niv + \beta_{pi} St + \beta_{pi} Sv + \beta_{pi} Sv / St + \beta_{pi} (H / L)$$

Ensuite, on remplace ces composantes dans le modèle de régression pour exprimer le modèle obtenu en fonction des variables initiales. Si on appelle (b_i) les estimations des coefficients du modèle dans le système des variables initiales, la variance de ces coefficients (b_i) peut être calculée à partir de l'expression suivante (Tomassone, 1983) :

$$\text{var } b_i = \frac{\sigma^2}{n-1} \left(\frac{\beta_{1i}^2}{l1} + \frac{\beta_{2i}^2}{l2} + \frac{\beta_{3i}^2}{l3} + \dots + \frac{\beta_{pi}^2}{lp} \right)$$

avec (σ^2) : variance résiduelle, (n) : le nombre d'individus, (β_{1i}) : les coefficients de la liaison linéaire entre les variables (de contrôle) et les axes factoriels et (l_p) : la part d'inertie de chaque axe factoriel (ou valeur propre).

Pour chacun des groupes obtenus après la classification hiérarchique, nous établirons ainsi un modèle de vulnérabilité obtenu par régression orthogonale sur les axes principaux d'un nuage de points décrivant, pour chaque individu (maison), la longueur cumulée des joints ouverts obtenue par modélisation numérique avec Udec. Les résultats seront produits pour les maisons placées virtuellement en zone convexe (position 1) ou en zone concave (position 2) et sollicitées de la même manière que le mur simple présenté plus haut.

2.6. Conclusions

Nous avons présenté une base de données des habitations en maçonnerie de la ville de Joeuf. Cette base de données va nous permettre de constituer une typologie de ces habitations comme nous le verrons au chapitre suivant grâce aux méthodes statistiques d'analyse en composante principale et de classification hiérarchique.

Nous avons également montré les résultats d'une investigation sur l'influence respective et conjointe de deux paramètres sur le comportement mécanique d'un mur en maçonnerie sous l'effet de la sollicitation par un affaissement vertical de terrain : la cohésion et la résistance à la traction des joints. Le comportement du mur a été caractérisé globalement par la longueur cumulée des joints ouverts (ou fissures) dans la maçonnerie après application de la sollicitation. Deux positions du mur ont été étudiées, l'une correspondant à la zone où l'affaissement entraîne une déformation du terrain en traction horizontale (position 1 (zone convexe)) et l'autre où l'affaissement entraîne une déformation du terrain en compression horizontale (zone concave). L'interaction sol-structure n'a pas été prise en compte. Par contre, le simple fait de solliciter la structure étudiée verticalement, a permis, dans les deux situations de retrouver ces deux caractéristiques principales liées à la position du mur par rapport à la cuvette d'affaissement.

Pour faire ces analyses, nous avons mis en œuvre deux plans d'expériences (plan factoriel simple) à 3 répétitions. Dans les deux situations étudiées, les conclusions ont été les mêmes : influence prépondérante de la résistance à la traction des joints, influence significative mais moindre de la cohésion des joints et absence d'interaction entre ces deux paramètres.

Ces résultats sont importants pour le mécanicien des structures ainsi que pour l'analyse de risques. Ils permettent d'envisager la détermination de grandeurs simples pour caractériser la vulnérabilité des structures à un affaissement minier. Néanmoins, la détermination de la cohésion et de la résistance à la traction des joints n'est pas chose aisée sans dispositif expérimental. Par ailleurs la gamme de variation de ces paramètres qui a été utilisée correspond à des valeurs faibles rarement observées en pratique, sauf peut-être dans des ouvrages déjà bien dégradés.

On retiendra donc principalement à ce stade l'intérêt de la démarche mise en œuvre : celles des plans d'expérience et des surfaces de réponses que nous allons développer dans la suite.

Il apparaît ainsi raisonnable d'envisager de poursuivre ce type d'investigation pour d'autres paramètres (variables) susceptibles d'influencer le comportement d'une structure en maçonnerie lors d'un affaissement minier.

Aussi pour donner suite à cette première analyse, on allons donc étudier l'influence respective d'autres variables, éléments géométriques des maisons en maçonnerie du site de Joeuf. Il s'agira en particulier de la longueur (Long), la hauteur (Haut), le nombre d'ouvertures (NOD), le nombre d'étages (Niv), la surface totale (St), la surface d'ouvertures (Sv), le rapport de la surface d'ouvertures par la surface totale (Sv/St) et élancement (H/L) des maisons de maçonnerie de Joeuf.

Au préalable, nous allons présenter une analyse multi-variée de l'ensemble de ces variables, avec la méthode ACP qui permettra de nous faire une idée des caractéristiques générales des habitations en maçonnerie de la ville de Joeuf et mettre en évidence des corrélations entre les variables étudiées.

Ensuite, nous présenterons une typologie des maisons de Joeuf, réalisée par classification hiérarchique.

Pour chaque type ou groupe homogène d'habitations ainsi défini, nous présenterons alors une série d'expériences numériques destinés à caractériser l'endommagement de ce type de maison à une sollicitation résultat d'un affaissement minier. Nous nous intéresserons en

particulier à la longueur cumulée des joints ouverts comme dans l'exemple du mur déjà présenté et nous étudierons les deux positions virtuelles déjà définies où les déplacements verticaux différentiels sont maximaux, tant en zone de traction (zone convexe) qu'en zone de compression (zone concave). Ces expériences numériques ont été réalisées avec la méthode des éléments distincts (code de calcul Udec) dont nous avons expliqué les principes. Le type de sollicitation a également été exposé. Il reprend un modèle classique d'affaissement paramétré pour le site de Joeuf.

L'analyse statistique des résultats ainsi obtenus nous permettra, grâce à la méthode de régression multiple sur les composantes principales, de proposer des modèles pour estimer la vulnérabilité des maisons de chacun des groupes identifiés dans la typologie.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Résultats et Discussions

Les résultats exposés dans ce chapitre concernent tout d'abord une analyse en composantes principales sur l'ensemble des variables choisies quantitatives (exemples : Longueur (Long), Hauteur (Haut), nombre d'ouvertures (NOD), nombre d'étages (Niv), surface totale (St), surface d'ouvertures (Sv), rapport de surface d'ouvertures par la surface totale (Sv/St), élancement (H/L)), soit 8 variables quantitatives.

A la suite de cette analyse, nous présenterons une typologie sur l'ensemble des habitations de Joeuf réalisée par classification ascendante hiérarchique et qui a pour principe de regrouper les maisons de Joeuf en groupes distincts et homogènes.

Nous présenterons ensuite l'analyse, sur chaque groupe, du comportement des maisons en maçonnerie de cette ville, sous l'effet d'une sollicitation induite par la formation d'une cuvette d'affaissement en supposant que les ouvrages considérés sont placés dans les pires conditions, c'est-à-dire au point de courbure maximale, convexe ou concave (chapitre 2, section 1.4). Il en est en effet impossible à ce jour de prévoir exactement où pourrait se situer une telle cuvette d'affaissement.

Dans chacun des groupes et pour chaque sollicitation (convexe ou concave), nous avons réalisé des expériences numériques par modélisation numérique avec la méthode des éléments distincts (code de calcul Udec) sur un échantillon représentatif des façades de chaque groupe. La variable d'état (*ou de sortie*) représentant l'endommagement de la façade est la longueur cumulée des joints ouverts, obtenue après l'application de la sollicitation. Les variables de contrôle (ou paramètres) prises en compte sont celles du Tableau 15 ci-après. Après la réalisation des expériences pour les groupes distincts, nous avons procédé à une régression multiple sur l'ensemble des variables de contrôle pour permettre d'exprimer le dommage en fonction des variables significatives. Mais, cette approche pose problème du fait des colinéarités entre les variables de contrôle. Pour s'affranchir de ce problème, nous avons alors utilisé la méthode de régression sur les composantes principales (*ou régression orthogonale*) qui ont l'avantage d'être indépendantes par construction. Cette méthode va nous permettre d'exprimer plus justement le dommage en fonction des variables significatives.

A la fin, nous serons alors en mesure d'élaborer ainsi une fonction de dommage, pour chaque groupe et pour chaque type de sollicitation (convexe et concave), soit 8 fonctions.

1.1. Analyse statistique préliminaire et typologie des habitations de la ville de Joeuf

Le Tableau 15 présente les statistiques descriptives de l'ensemble des variables, toutes géométriques, répertoriées sur les habitations en maçonnerie de Joeuf, après avoir récolté ces informations sur le terrain et le plan cadastral. Pour chaque maison, nous avons considéré la façade visible depuis la rue, seul élément accessible de l'enquête de terrain.

Tableau 15. Statistiques élémentaires des 705 maisons répertoriées de la ville de Joeuf

	Identificateur (unité)	Moyenne	Ecart- type	Minimum	Maximum
Longueur	Long (m)	13.419	5.157	3	37
Hauteur	Haut (m)	7.518	1.622	2.5	13.5
Nombre des ouvertures (portes et fenêtres)	NOD	8.739	3.224	2	21
Nombre d'étages	Niv	2.973	0.680	1	4.5
Surface totale	St (m2)	99.897	40.667	16.5	304
Surface totale d'ouvertures	Sv (m2)	15.301	6.311	3.3	44.3
Ratio Sv/St	Sv/St	0.162	0.058	0.074	0.505
Ratio Hauteur/ Longueur	H/L	0.642	0.288	0.115	2.25

L'analyse en composantes principales (ACP) que nous avons tout d'abord réalisée, vise à trouver des corrélations entre les variables et à extraire un nouvel ensemble de variables synthétiques et indépendantes (ou orthogonales) caractéristiques des données de base qui concernent 705 maisons de maçonnerie.

À l'aide des valeurs propres calculées par la méthode, on peut déterminer le nombre d'axes factoriels à retenir dans l'analyse. Les valeurs propres correspondent par définition à l'inertie du nuage de maisons capturée par chaque axe factoriel. Le nombre de valeurs propres obtenues est égal au nombre de variables actives retenues pour l'analyse.

Avec 8 variables retenues, l'inertie moyenne de chaque axe est a priori de $100/8 = 12.5\%$.

À la lumière du résultat statistique obtenu, on constate que les trois premiers axes factoriels représentent une part d'inertie d'un peu plus de 92 % (Figure 50). On peut donc se limiter à l'analyse sur ces 3 composantes principales. Comme le montre cette figure, la première composante principale est dominante avec 46 % de l'inertie totale.

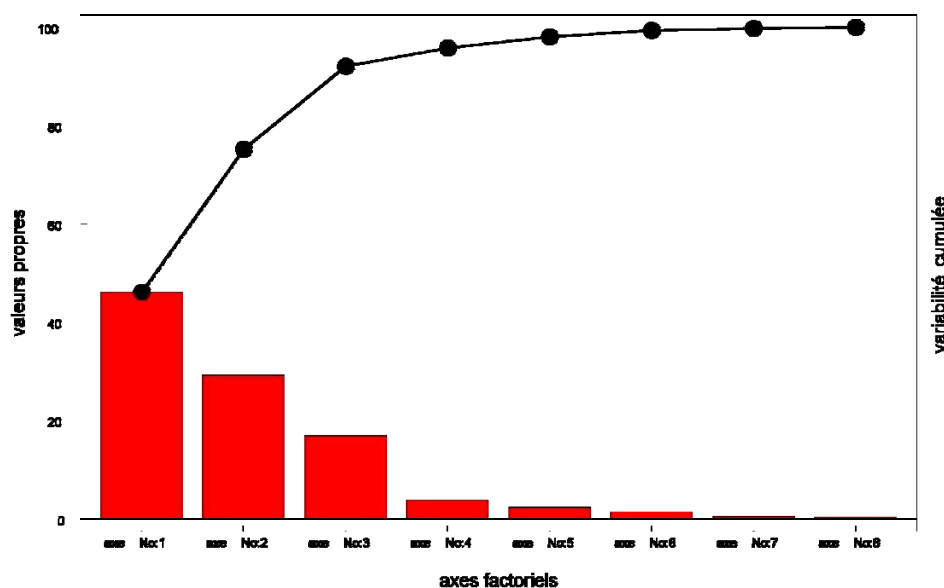


Figure 50. Illustration graphique des inerties de chaque axe factoriel telles que calculées par l'analyse en composante principale (en valeurs simples et en valeurs cumulées)

L'analyse des cercles de corrélation obtenus à l'issue de l'analyse en composantes principales, qui présentent les projections des variables sur les trois premiers axes factoriels (ACP normée) met en évidence différentes corrélations (Figure 51).

Ainsi, le premier cercle de corrélation (composantes F1 et F2) donne les corrélations suivantes :

- La hauteur (Haut) est naturellement corrélée avec le nombre d'étages (Niv) ;
- Le nombre d'ouvertures (NOD), la surface totale d'ouvertures (Sv) et la surface totale (St) sont naturellement corrélées ;
- La longueur (Long) est positivement corrélée avec le nombre d'ouverture (NOD), la surface d'ouvertures (Sv) et la surface totale (St). Elle est négativement corrélée avec l'élancement (H/L) ;

Le deuxième cercle de corrélation (composantes F1 et F3), confirme :

- La corrélation entre la longueur (Long), la surface totale (St) et nombre d'ouvertures (NOD)

Le troisième cercle de corrélation (composantes F2 et F3) n'apporte aucune corrélation supplémentaire.

On retrouve ces corrélations dans la matrice des corrélations données dans le Tableau 16.

Ces cercles de corrélation indiquent également que l'axe factoriel 1 est associé aux variables Long, St, Sv et NOD (fortes valeurs à gauche, faibles valeurs à droite), l'axe factoriel 2 est plutôt porté par la hauteur (Haut et Niv) tandis que l'axe factoriel 3 est relativement bien représenté par la variable Sv/St et traduit le taux d'ouvertures percées dans la façade. Ces indications permettent d'éclairer la classification obtenue ci-après (Figure 54).

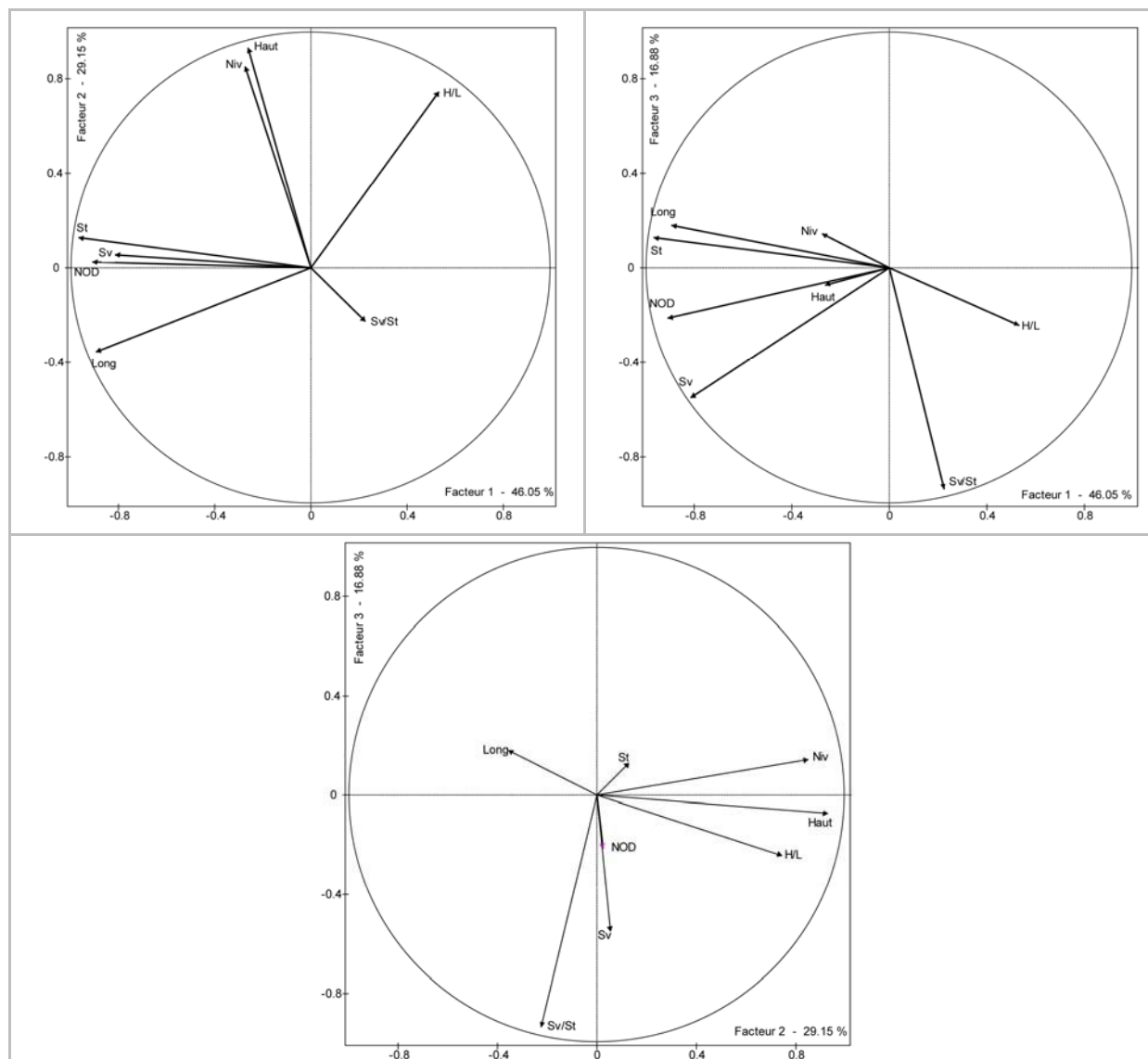


Figure 51. Cercles de corrélation correspondent à la projection des variables dans le plan factoriel (F1 et F2) qui intercepte environ 75.2% d'inertie totale ; dans le plan factoriel (F1 et F3) qui intercepte environ 62.93% de l'inertie totale et dans le plan (F2,F3)

Tableau 16. Tableau des corrélations (valeurs de R). Les valeurs supérieures à 0.7 sont mise en valeur.

	Long	Haut	NOD	Niv	St	Sv	Sv/St	H/L
Long	1,00							
Haut	-0,12	1,00						
NOD	0,74	0,25	1,00					
Niv	-0,04	0,77	0,23	1,00				
St	0,85	0,38	0,81	0,34	1,00			
Sv	0,61	0,32	0,81	0,18	0,73	1,00		
Sv/St	-0,28	-0,22	-0,03	-0,33	-0,36	0,31	1,00	
H/L	-0,74	0,57	-0,39	0,36	-0,43	-0,27	0,15	1,00

A la suite de cette analyse en composantes principales, nous avons réalisé une classification ascendante hiérarchique (CAH) qui permet de construire un espace euclidien nécessaire au calcul de la distance entre les individus (maisons). La Figure 52 illustre le principe de la méthode dans laquelle on agrège itérativement les maisons en commençant par les bas (selon le principe d'une distance intragroupe minimale et d'une distance intergroupe maximale). Se dessine alors progressivement un arbre (ou dendrogramme) représentant différents niveaux successifs de regroupements que l'on choisit de couper en optimisant le rapport des variances intergroupe sur intragroupe. On obtient ainsi 4 groupes bien distincts à l'intérieur desquels les individus (maisons) ont des caractéristiques voisines. Les groupes comportent respectivement 350, 53, 116 et 186.

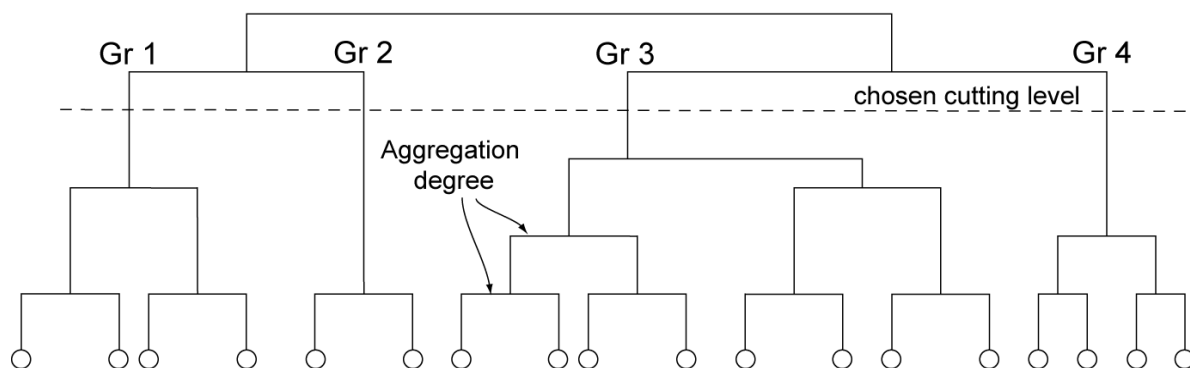


Figure 52. Principe de classification par l'agrégation successive des maisons de Joeuf dans un arbre (basé sur la méthode CAH)

La Figure 53 qui représente le graphique de Ward correspondant à cette analyse nous aide à déterminer le nombre de groupes optimal. Il indique la décroissance d'inertie que l'on obtient à chaque regroupement. Lu de droite à gauche, on constate en effet que c'est pour 4 groupes que la baisse d'inertie cesse de décroître rapidement.

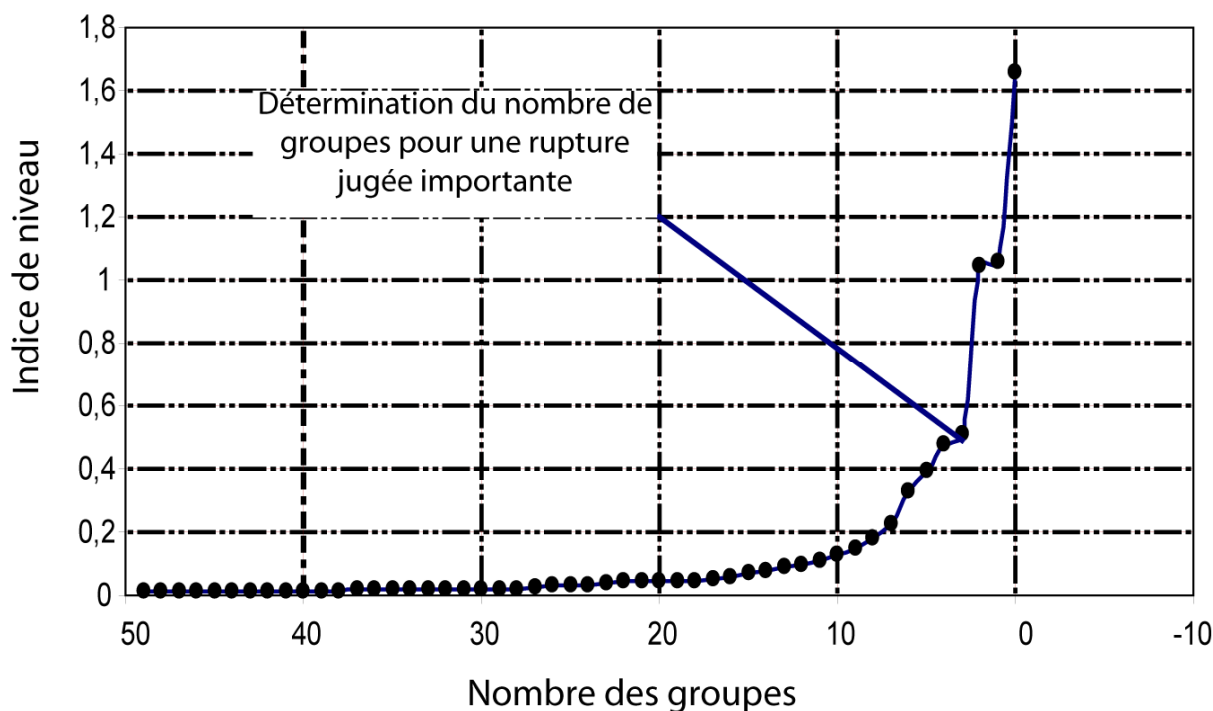


Figure 53. Indicateur de perte d'inertie intergroupe (indice de Ward)

Si l'on projette maintenant les maisons des 4 groupes sur le premier plan factoriel (75.2% d'inertie) comme indiqué sur la Figure 54, on constate que les groupes sont assez bien constitués puisqu'ils se différencient clairement sur ce plan en occupant des régions différentes de l'espace des composantes principales.

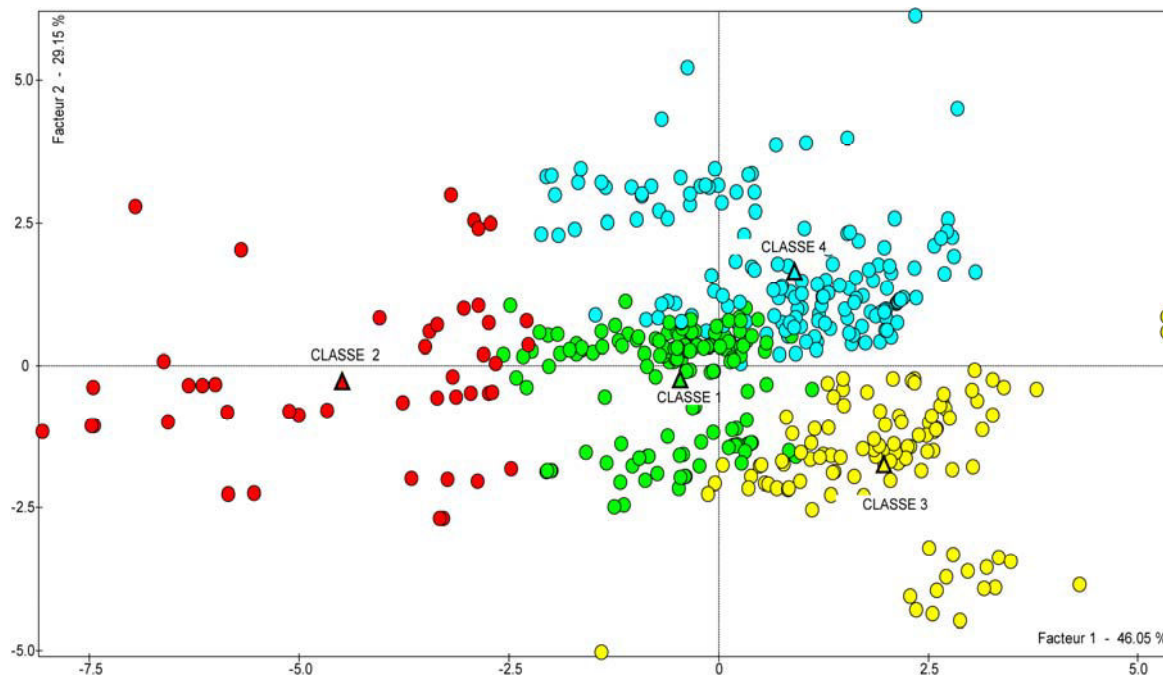


Figure 54. Projection des quatre groupes de maisons de la ville de Joeuf sur le premier plan factoriel (75.2% d'inertie)

Ainsi, après la description des variables données plus haut, on peut globalement dire que le groupe 2 est le groupe des longues maisons, présentant une grande surface et de nombreuses ouvertures car on peut le rapprocher de l'axe 1, côté gauche. De même, le groupe 3 comprend des maisons moins longues (axe 1, côté droit) et pas très hautes (axe 2, vers le bas). Le groupe le groupe 4 peut être rattaché à l'axe 2, vers le haut, ce qui correspond à des maisons plutôt haute sans être particulièrement ni longue ni courte. Enfin le groupe 1, situé au centre du graphique mais plutôt côté gauche comprend des maisons légèrement plus longues que la moyenne et moyennement hautes.

Après avoir réalisé une classification hiérarchique et identifié 4 groupes homogènes, il est possible de déterminer les variables représentatives de ces groupes au moyen d'un indicateur appelé « valeur-test ».

La « valeur-test » mesure, pour chaque variable, l'écart entre la moyenne dans le groupe et la moyenne générale exprimée en nombre d'écarts types :

$$v - test = \frac{\bar{x}_k - \bar{x}}{S_k(x)}, \text{ avec : } S_k^2(X) = \frac{n - n_k}{n - 1} \cdot \frac{s^2(X)}{n_k}$$

Ainsi, une variable présentant une v-test supérieure à deux en valeur absolue (correspondant à un test de Student avec un risque de 5%), peut être considérée comme caractéristique du groupe. En effet, cela signifie que les valeurs prises par cette variable au sein du groupe sont

significativement différentes (en moyenne) des valeurs de cette variable pour l'ensemble des individus.

Nous reviendrons sur les variables caractéristiques des groupes (et les valeurs test) dans les sous-chapitres suivants.

1.2. Présentation et analyse du groupe 1

Le Tableau 17 montre les statistiques descriptives de l'ensemble de groupe 1. Pour l'analyse de ce groupe, nous en avons extrait un échantillon aléatoire de 68 maisons et les avons modélisées avec la méthode des éléments distincts, pour chacune de deux positions étudiées (zone convexe et zone concave). A l'issue de ces modélisations, nous avons déterminé la longueur cumulée des joints ouverts comme dans l'exemple du mur présenté au chapitre 2 et rapporté cette longueur à la longueur totale des joints de la maçonnerie. Nous avons ainsi constitué les deux dernières lignes du Tableau 18 dans lequel nous avons également fait figurer les statistiques élémentaires concernant les autres variables.

Tableau 17. Statistiques élémentaires de 350 maisons distinctes du groupe 1

Paramètre	Identificateur (unité)	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Longueur	Long (m)	15.106	2.725	11	24
Hauteur	Haut (m)	7.334	0.865	5	9
Nombre d'ouvertures	NOD	8.949	1.746	5	15
Nombre d'étages	Niv	3.026	0.538	2	4.5
Surface totale	St (m2)	109.974	18.932	72	160
Surface totale d'ouvertures	Sv (m2)	14.804	3.499	8.32	27.7
Ratio Sv/St	Sv/St	0.135	0.026	0.074	0.222
Elancement	H/L	0.502	0.106	0.25	0.75

Tableau 18. Statistiques élémentaires des 68 maisons choisies représentatives du groupe 1

Paramètre	Identificateur (unité)	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Longueur	Long (m)	15.44	2.94	12	24
Hauteur	Haut (m)	7.44	0.95	6	8.5
Nombre d'ouvertures	NOD	9.04	2.09	5	12
Nombre d'étages	Niv	2.91	0.54	2	3.5
Surface totale	St (m2)	114.29	22.5	72	160
Surface totale d'ouvertures	Sv (m2)	15.41	3.78	8.54	23.46
Ratio Sv/St	Sv/St	0.136	0.02	0.085	0.195
Elancement	H/L	0.49	0.1	0.25	0.667
Domage (zone convexe)	D1	0.029	0.021	0.002	0.077
Domage (zone concave)	D2	0.05	0.012	0.023	0.072

La Figure 55 montre l'un des modèles mis en œuvre. Il comprend 10 ouvertures (portes et fenêtres) réparties le long de la façade modélisée qui fait 18 m de longueur et 6 m de hauteur (un RDC + 1 étage). L'appareillage est constitué de blocs en calcaire mesurant 20 cm par 50 cm.

Par ailleurs, une charge Q est appliquée à la limite supérieure du modèle pour représenter la charge d'un toit. La valeur retenue ($Q=6221$ Pa) correspond à la charge totale estimée d'un toit de tuiles avec sa charpente. Elle s'applique en tout point du haut du mur dont le poids propre est également pris en compte. Comme dans le cas du mur, le calcul est mené en contraintes planes.

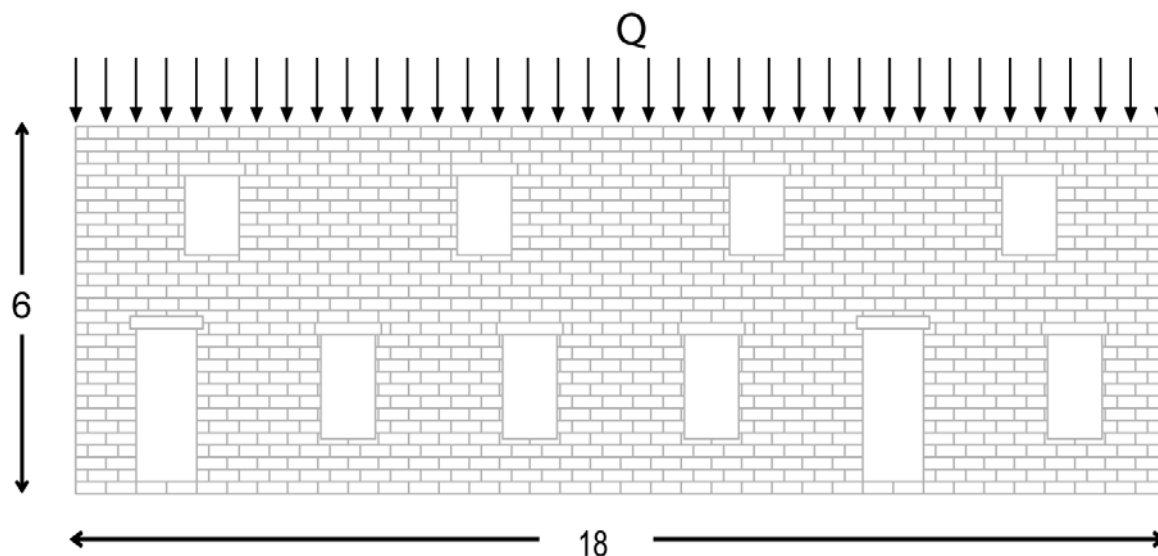


Figure 55. Exemple d'un modèle employé dans le groupe 1

Les calculs sont conduits avec les propriétés du Tableau 19 qui reprennent les valeurs utilisées pour le mur présenté au chapitre 2 (Tableau 8) avec une cohésion des joints de 0,5 MPa, une résistance à la traction des joints de 0,3 MPa et un angle de frottement des joints de 30°C. Ces propriétés correspondent à des valeurs typiques telles que données par Janssen 1997.

Tableau 19. Paramètres de la maçonnerie employés dans les calculs

Masse volumique	2000 kg/m ³	Rigidité de cisaillement des joints	6,4 GPa/m
Module d'Young de blocs	16 GPa	Angle de frottement des joints	30°
Coefficient de poisson	0,2	Cohésion des joints	0,5 MPa
Rigidité normale des joints	16 GPa/m	Résistance à la traction des joints	0,3 MPa

Le Tableau 20 ci-après qui concerne la population toute entière des 350 maisons du groupe 1, indique les valeurs test des variables représentatives (présentant une valeur test supérieure à 2 en valeur absolue) ainsi que les statistiques élémentaires du groupe et celles de l'ensemble des 705 maisons étudiées pour ces mêmes variables. Il apparaît en particulier que le groupe 1 est davantage marqué par 4 variables (Long, St, Sv/St, H/L) et moins marqué par la variable (Haut). On peut ainsi décrire l'identité du groupe 1 qui correspond principalement à des

maisons assez longues, pas hautes et donc peu élancées, présentant une surface totale plus grande et un ratio Sv/St plus petit.

Tableau 20. Présentation des variables caractéristiques de groupe 1

Variables caractéristiques	Moyenne dans le groupe	Moyenne générale	Ecart-type dans le groupe	Ecart-type général	v-test	Probabilité
Long	15.106	13.419	2.725	5.157	8.62	0.000
St	109.974	99.897	18.932	40.667	6.53	0.000
Haut	7.334	7.518	0.865	1.622	-2.98	0.001
Sv/St	0.135	0.162	0.026	0.058	-11.99	0.000
H/L	0.502	0.642	0.106	0.288	-12.84	0.000

1.2.1. Comportement mécanique des maisons du groupe 1 en zone convexe

La Figure 56 montre la distribution des contraintes principales (image du haut), obtenue après le calcul sur l'un des individus (maison) du groupe 1 placé en position convexe (voir Figure 41). Ce champ de contraintes produit des ouvertures de joints (image du bas) en plusieurs endroits de la façade et en particulier des « fissures » verticales de traction dans la partie supérieure et des « fissures » de cisaillement dans la partie intermédiaire, entre les ouvertures, comme cela peut souvent être observé en réalité. Les ouvertures représentent donc des points de faiblesse dans la structure (Cox et al, 1980). Dans la partie inférieure et au centre de la structure, on observe par ailleurs des efforts de compression quasi verticaux, induits par la courbure du terrain vers le bas.

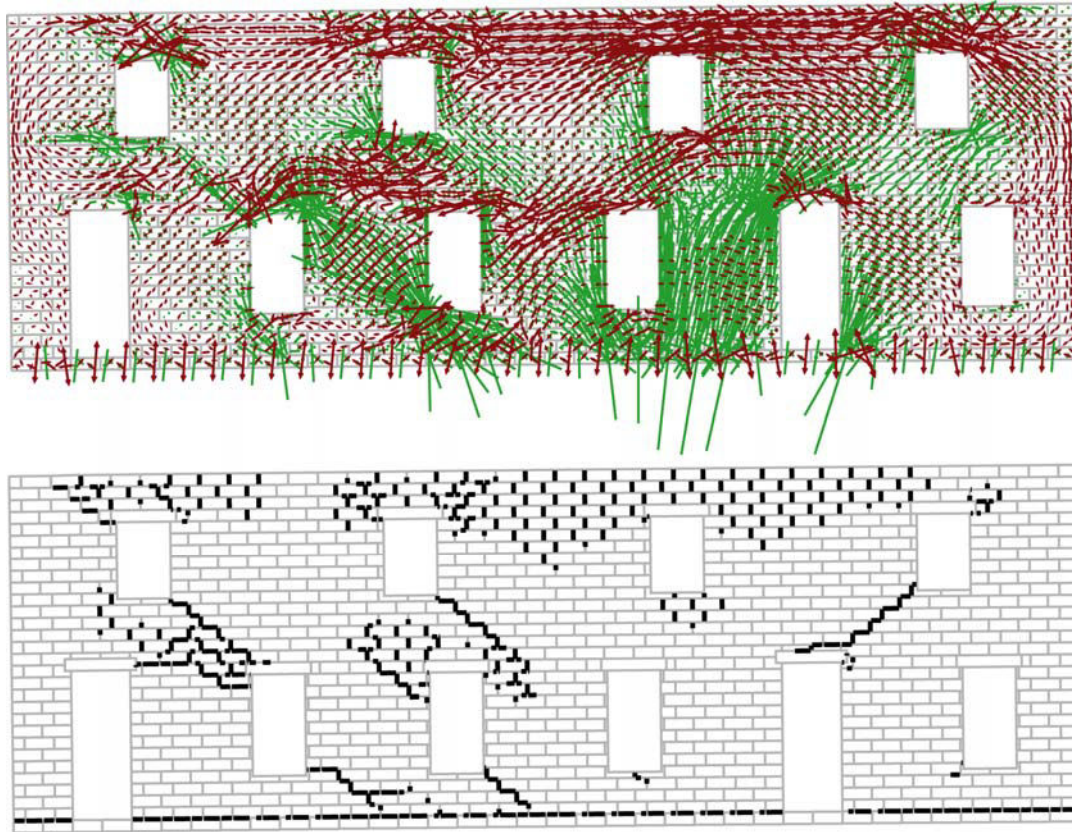


Figure 56. En haut, distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en clair). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison du groupe 1 placée en zone convexe

1.2.2. Régression multiple et colinéarité (ouvrages en zone convexe)

On s'intéresse maintenant à l'ensemble des résultats obtenus par modélisation pour l'échantillon de 68 maisons issues du groupe 1 et sollicitées par l'effet d'un affaissement en zone convexe.

Comme déjà mentionné, à la fin de chaque calcul, on caractérise l'endommagement par la proportion des joints ouverts. Plus exactement, on retient l'expression suivante pour le calcul de l'endommagement :

$$\text{Dommage} = \frac{\text{Longueur cumulée des joints ouverts}}{(\text{Surface totale} - \text{Surface d'ouvertures}) \times 7}$$

Le facteur 7 correspond à la longueur cumulée de joints en m par unité de surface (m²) de maçonnerie pleine. La variable « Dommage » représente donc approximativement la proportion des joints de la façade qui sont ouverts (proportion en longueur cumulée).

Disposant d'autant de mesures de dommage qu'il y a d'individus dans le groupe testé, il est possible d'envisager une régression linéaire multiple liant ce dommage aux variables descriptives des individus.

Le Tableau 21 montre le résultat de cette régression pour laquelle on obtient un coefficient de détermination global R^2 égal à 0.68. Cette valeur correspond à la part de la variabilité de la réponse expliquée par la variabilité des variables explicatives.

Tableau 21. Estimation des coefficients de la régression linéaire multiple sur les variables de contrôle (68 calculs, $R^2 = 0.68$, zone convexe). *j est l'estimation du coefficient de régression, S_j , l'écart-type de cette estimation, t_j la valeur de Student correspondante et Pro sa probabilité symétrique correspondante (à l'extérieur de l'intervalle $[-t_j, t_j]$). VIF est le coefficient d'inflation de variance (voir explication dans le texte)

Symbole	Long	Haut	NOD	Niv	St	Sv	(Sv/St)	H/L
*j	-0.67	0.47	-0.20	0.25	-1.13	1.65	-1.31	-1.76
S_j	0.61	0.85	0.13	0.09	0.98	0.65	0.53	0.55
t_j	-1.09	0.55	-1.47	2.84	-1.16	2.53	-2.45	-3.19
Pro%	0.27	0.58	0.14	0.006	0.25	0.014	0.017	0.002
VIF	71.39	136.35	3.62	1.52	179.62	79.72	53.34	57.25

Le coefficient VIF (Variance Inflation Factor), proposé par Hoerl et Kennard (1970) permet de mesurer l'intensité de la multi-colinéarité entre chaque variable et les autres. Plus concrètement les VIF sont les termes diagonaux de la matrice R^{-1} (R étant la matrice de corrélation) :

$$VIF(\beta_i) = \frac{1}{1 - R_i^2}$$

Ils traduisent combien la variance d'un coefficient est augmenté du fait de la colinéarité entre les variables (d'où le terme d'inflation de variance). Quand les variables explicatives (les régresseurs) sont indépendantes, ces termes sont tous égaux à 1. On estime qu'une valeur de VIF supérieure à 10 témoigne d'une colinéarité forte entre la variable considérée et les autres.

La moyenne des VIF de toutes les variables donne une indication globale de la colinéarité entre ces variables et constitue l'indice de multicollinéarité tel que désigné par Tamassone et al (1992) qui peut également s'exprimer comme la moyenne des inverses des valeurs propres de la matrice de corrélation R (telle que fournie par l'analyse en composantes principales) :

$$I = \frac{1}{P} * \sum_{i=1}^P \frac{1}{1 - R_i^2} = \frac{1}{P} * \sum_{i=1}^P \frac{1}{\lambda_i}$$

Revenant aux résultats donnés dans le Tableau 21, on constate donc que les coefficients de régression β_5 et β_2 sont particulièrement affectés par la colinéarité. Ils présentent un coefficient de corrélation $r_{2,5}$ égal à 0.49 et leurs facteurs d'inflation (VIF) sont très élevés. Les autres facteurs d'inflation également élevés concernent, dans l'ordre décroissant, les coefficients 6, 1, 8 et 7.

On retrouve ces colinéarités, même sur un modèle de régression multiple dans lequel seules les variables significatives présentant une valeur-test supérieure à 2 ont été retenues (valeur-test ici déterminée sur l'échantillon de 65 maisons et non plus sur le groupe tout entier tel que présentée dans le Tableau 20). Le Tableau 22 montre le résultat ainsi obtenu dans lequel on constate que les VIF sont toujours trop élevés quoique plus faibles que précédemment.

Tableau 22. Estimation des coefficients de régression à partir des seules variables significatives présentant une valeur test supérieure à 2 en valeur absolue (68 calculs, $R^2 = 0.65$, zone convexe)

Symbole	Long	Niv	Sv	(Sv/St)	H/L
*j	-0.77	0.21	0.7	-0.6	-1.27
Sj	0.38	0.085	0.26	0.23	0.29
tj	-2.01	2.47	2.69	-2.5	-4.32
Proba %	0.048	0.015	0.009	0.014	5.7 10-05
VIF	27.05	1.33	12.3	10.45	15.71

Que l'on retienne un modèle complet ou un modèle « réduit », les colinéarités restent donc un problème à résoudre et empêchent l'exploitation des modèles obtenus par régression multiple pour discuter de l'influence relative des différentes variables ou facteurs dans l'explication des valeurs de dommage.

Heureusement, il existe des solutions pour s'abstraire du problème de multi-colinéarité telles que (Confais J. et al 2006) :

- Retirer certaines variables (régresseurs), principaux « responsables » de la colinéarité ;
- Augmenter la taille de l'échantillon prélevé avec le recueil d'autres observations ;
- Faire une Ridge-Regression (transformer $(X'X)$ en $(X'X + KI)$) (Hoerl et Kennard 1970) ;
- Faire une régression orthogonale (ou travailler sur les composantes principales orthogonales par construction) ;
- Faire une régression PLS (Partial Least Square) (Tenenhaus 1998) ;
- Utiliser les méthodes de type « LASSO » de (Tibshirani 1996) ;

Compte tenu de nos diverses analyses en composantes principales, nous avons choisi d'utiliser la méthode de régression sur les composantes principales.

1.2.3. Régression sur les composantes principales du groupe 1 (ouvrages en zone convexe)

L'objectif est de proposer un modèle expliquant avec robustesse les valeurs de la variable de sortie qu'on appelle ici « dommage », en fonction des variables descriptives des maisons.

Après avoir réalisé un modèle traditionnel de régression linéaire multiple ou choisi un modèle sur une de l'ensemble des variables explicatives, nous avons trouvé que les modèles obtenus étaient mis en défaut par les colinéarités entre les variables explicatives. Pour s'affranchir du problème de colinéarité, il est possible de réaliser une régression sur les composantes principales qui ont l'avantage d'être indépendantes (orthogonales) par construction.

L'analyse en composante principale vise en effet à identifier les corrélations entre les variables initiales et à construire un nouvel ensemble de variables synthétiques et indépendantes (orthogonales) dans lesquelles les données peuvent être également décrites. Il est alors possible d'effectuer une analyse de régression multiple sur ces nouvelles variables,

qui ne montrent aucune colinéarité, afin de trouver un modèle conceptuel permettant d'expliquer la réponse observée.

Le groupe 1 est représenté par un échantillon aléatoire de 68 maisons qui ont été modélisées. Les résultats de corrélation donnés par l'analyse en composantes principales sur cet ensemble de 68 individus, sont illustrés sur la Figure 57 par les cercles de corrélation. Ces derniers présentent la projection des variables sur les trois premiers axes factoriels et indiquent la corrélation de chaque variable avec ces axes principaux. La proximité des variables témoigne d'une corrélation entre elles. On retrouve dès lors des corrélations prévisibles :

- La longueur (long) est corrélée positivement avec la surface totale (St), le nombre d'ouvertures (NOD) et la surface d'ouverture (Sv). Elle est négativement corrélée avec le ratio (H/L) ;
- La hauteur (Haut) est corrélée positivement avec le nombre d'étages (Niv) et également corrélée avec l'élancement (H/L) ;
- Les variables (Long, NOD, St et Sv) sont positivement corrélées avec l'axe factoriel 1 et seule la variable (H/L) est corrélée négativement avec cet axe. Les variables (Haut, Niv et H/L) sont corrélées (positivement) avec l'axe factoriel 2. Seule la variable (Sv/St) est corrélée (négativement) avec l'axe factoriel 3 ;

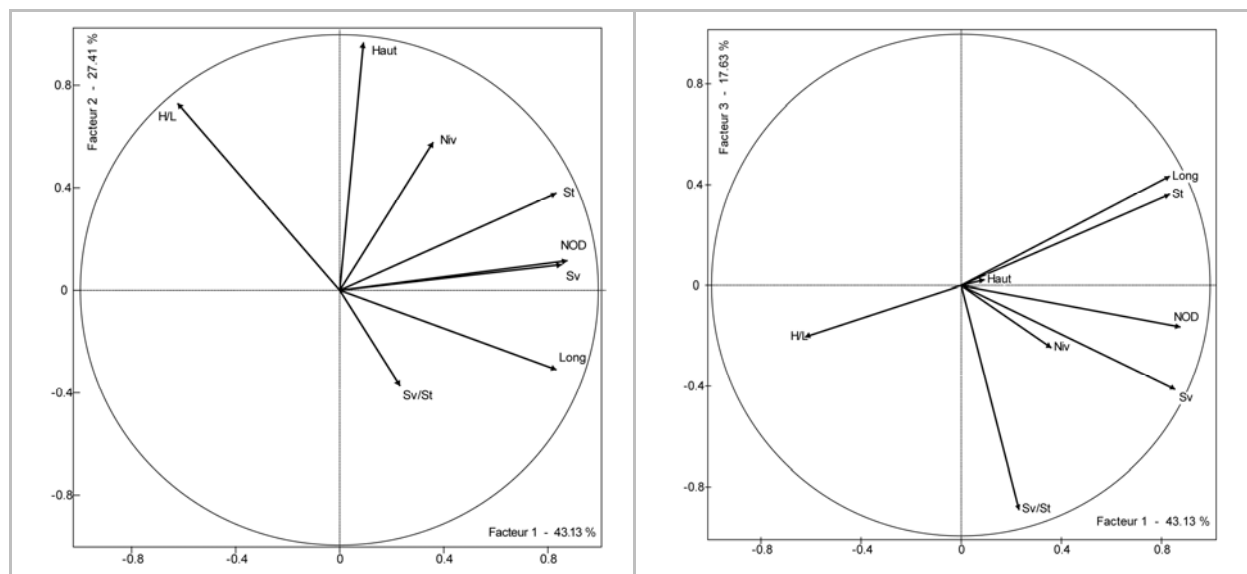


Figure 57. Cercles de corrélation correspondent à la projection des variables de contrôle dans le plan factoriel (F1 et F2), qui interceptent environ 70.54% d'inertie totale et dans le plan factoriel (F1 et F3) qui interceptent environ 60.76% d'inertie totale

Si on limite ensuite la régression orthogonale aux 3 premières composantes principales qui représentent à elles deux 88,2% de l'inertie totale des données, on obtient les coefficients de régression indiqués dans le Tableau 23.

Tableau 23. Coefficients estimés de la régression orthogonale pour le groupe 1, à partir de l'échantillon de n=68 maisons modélisées (zone convexe)

Coefficient	Composantes principales retenues		
	F1	F2	F3
j	0.355	-0.189	-0.097

Chaque composante principale étant une combinaison linéaire des paramètres de contrôle (Tableau 24), on peut exprimer la régression obtenue en fonction de ces paramètres (Tomassone et al, 1983). On obtient le résultat donné dans le Tableau 25 où les b_i sont les estimations des coefficients de la régression linéaire, les s_i sont les écarts types de ces estimations et les t_i les rapports b_i/s_i répondant à une loi de Student. Seuls les paramètres ayant une valeur de t_i supérieure à 2 peuvent être considérés comme significatifs au seuil critique de 5% et donc retenus dans le modèle utilisé pour la prévision du dommage.

Tableau 24. Coefficients de la liaison linéaire entre les variables et les composantes principales (groupe 1, échantillon des 68 maisons)

Variables de contrôle	F1	F2	F3
Long	0.44691806	-0.2090835	-0.3663614
Haut	0.04902082	0.65163655	-0.0169038
NOD	0.47060373	0.07728445	0.13887238
NIVEAU	0.1924572	0.38931417	0.2081291
St	0.44746619	0.25685256	-0.3045247
Sv	0.459623	0.06741342	0.34817479
(Sv/St)	0.1239957	-0.2494782	0.74810979
H/L	-0.3354092	0.49128233	0.17105864

Tableau 25. Estimation des coefficients de la régression sur les variables initiales obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (zone convexe, groupe 1)

F1, F2, F3	Long	Haut	NOD	Niv	St	Sv	(Sv/St)	H/L
b_i	0.234	-0.104	0.139	-0.025	0.14	0.116	0.018	-0.228
s_i	0.0357	0.0378	0.0243	0.0285	0.0336	0.0331	0.0562	0.0347
t_i	6.557	-2.749	5.713	-0.890	4.164	3.522	0.327	-6.593

On constate ainsi que les deux variables (Niv et Sv/St) ne sont pas significatives (au seuil de 5%). La réponse (le dommage) peut donc être décrite par le modèle approché de l'équation [Eq 1] où les variables (réponse et variables explicatives) sont normalisées (centrées et réduites (notées *), donc de moyenne égale à 0 et d'écart-type égal à 1 :

$$\begin{aligned} \text{Dommage}^* \approx & 0.234 \text{ Long}^* - 0.104 \text{ Haut}^* + 0.139 \text{ NOD}^* + 0.14 \text{ St}^* \\ & + 0.116 \text{ Sv}^* - 0.228 (\text{H} / \text{L})^* \end{aligned} \quad [\text{Eq 1}]$$

On peut ensuite revenir aux paramètres initiaux par un changement de variable (en « redressant » les variables) qui consiste à multiplier chaque variable par son écart-type et lui ajouter sa moyenne (y compris pour la variable dommage). On obtient alors l'équation [Eq 2] qui comporte alors un terme constant.

$$\begin{aligned} \text{Dommage} = & 2.7 \cdot 10^{-2} + 1.7 \cdot 10^{-3} \text{Long} - 2.33 \cdot 10^{-3} \text{Haut} + 1.41 \cdot 10^{-3} \text{NOD} \\ & + 1.33 \cdot 10^{-4} St + 6.57 \cdot 10^{-4} Sv - 4.6 \cdot 10^{-2} H / L \end{aligned} \quad [\text{Eq 2}]$$

Cette dernière équation [Eq. 2] peut donc être employée comme modèle de vulnérabilité pour prévoir les dommages en fonction des variables explicatives utilisées. Mais c'est surtout l'équation [Eq. 1] qui est utile pour noter l'influence relative de chaque paramètre car on peut y comparer directement les coefficients dont la valeur « mesure » le poids de la variable correspondante. On note ainsi l'influence prépondérante de la variable « Long » (longueur de l'ouvrage) dans l'explication du dommage.

On peut contrôler la cohérence du modèle en vérifiant si les signes des coefficients sont en conformité avec l'influence des paramètres. Ainsi, on constate qu'une plus grande longueur contribue à augmenter le dommage (signe +) tandis qu'une plus grande hauteur aura tendance à le diminuer (signe -). Bien entendu, cette interprétation n'est valable que dans la gamme de variation des paramètres ayant servi à constituer ces modèles c'est-à-dire celle des variables du premier groupe (solicitation de courbure en zone convexe).

1.2.4. Comportement mécanique des maisons du groupe 1 en zone concave

La Figure 58 montre la distribution des contraintes principales, obtenue dans la structure après la sollicitation imposée en zone concave (voir Figure 41). On remarque d'abord une différence nette de comportement par rapport à la situation où la même maison était sollicitée en zone convexe (Figure 56). De même, on observe que des fissures diagonales se sont développées principalement à mi-hauteur de la structure mais dans une direction inverse comparée au cas de la sollicitation en zone convexe.

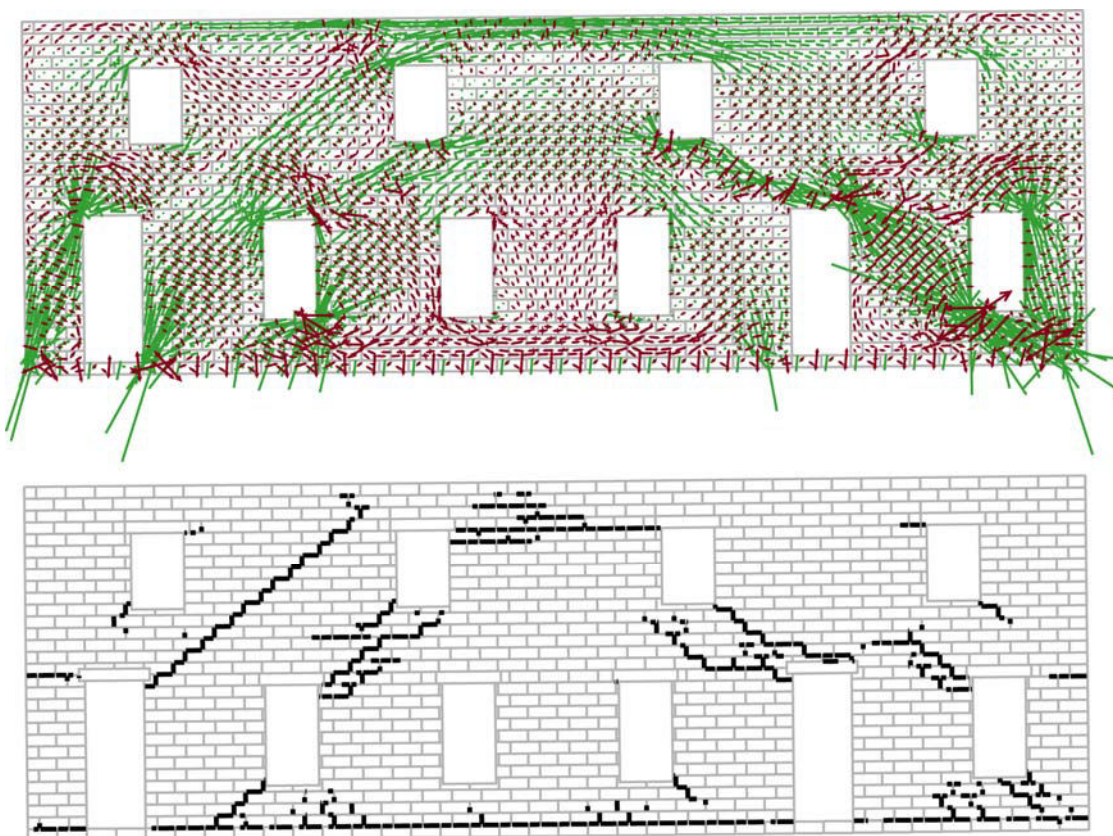


Figure 58. En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en clair). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison du groupe 1 placée en zone concave

1.2.5. Régression sur les composantes principales de groupe 1 (ouvrages zone concave)

Selon le principe exposé précédemment, mais pour l'échantillon d'individus du groupe 1, placés cette fois-ci en zone concave, on obtient les coefficients des trois premières composantes principales, indiqués dans le Tableau 26.

Tableau 26. Coefficients estimés de régression orthogonale avec n=68 individus (zone concave, groupe 1)

Coefficient	Composantes principales retenues		
	F1	F2	F3
j	0.385	0.0138	0.2019

De même qu'à la section 1.2.3 du présent chapitre, le retour aux variables initiales nous donnent les coefficients indiqués dans le Tableau 27 qui montre que seule la variable « Haut » n'est pas significative au seuil de 5%, son t_i étant inférieur à 2 en valeur absolue.

Tableau 27. Estimation des coefficients de la régression sur les variables initiales obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (zone concave, groupe 1)

F1, F2, F3	Long	Haut	NOD	Niv	St	Sv	(Sv/St)	H/L
bi	0.095	0.024	0.210	0.121	0.114	0.248	0.195	-0.087
Si	0.0340	0.0361	0.0232	0.0272	0.0321	0.0316	0.0536	0.0330
ti	2.803	0.679	9.062	4.470	3.569	7.858	3.642	-2.658

La réponse (dommage) peut alors être caractérisée par le modèle approché de l'équation [Eq 3] où les variables sont normalisées (centrées et réduites (notées*)). Dans cette équation, la comparaison des coefficients permet une comparaison de l'influence respective des variables dans l'explication du dommage. On constate par exemple que Sv est la variable prépondérante.

$$\text{Dommage}^* \approx 0.095 \text{ Long}^* + 0.21 \text{ NOD}^* + 0.121 \text{ Niv}^* + 0.114 \text{ St}^* + 0.248 \text{ Sv}^* + 0.195 (\text{Sv} / \text{St})^* - 0.087 (\text{H} / \text{L})^* \quad \text{Eq [3]}$$

Le redressement des variables centrées réduites nous amène ensuite à l'équation [Eq 4] qui permet d'exprimer le résultat en fonction des valeurs brutes des variables.

$$\text{Dommage} = -0.01045 + 3.9 \cdot 10^{-4} \text{ Long} + 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ NOD} + 2.7 \cdot 10^{-3} \text{ Niv} + 6.08 \cdot 10^{-5} \text{ St} + 7.84 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} + 8.94 \cdot 10^{-2} (\text{Sv} / \text{St}) - 9.9 \cdot 10^{-3} (\text{H} / \text{L}) \quad \text{Eq [4]}$$

L'équation finale [Eq 4] peut donc être employée comme modèle de vulnérabilité pour prévoir les dommages en fonction des paramètres de contrôle utilisés (zone concave, groupe 1).

Enfin l'analyse des signes permet de vérifier la cohérence du modèle obtenu. On constate ainsi qu'une plus grande surface des vides contribue à augmenter le dommage (signe +) tandis qu'un plus grand élanement (H/L) tend à le diminuer.

1.3. Présentation et analyse du groupe 2

Le groupe 2 comprend 53 individus (maisons). Le Tableau 28 montre les statistiques descriptives de l'ensemble de ce groupe. Pour l'analyse de ce groupe par modélisation numérique, nous avons travaillé sur un échantillon aléatoire de 11 maisons issues de ce groupe. Le Tableau 29 indique les résultats obtenus en termes de dommage pour chacune des positions (D1 et D2). Dans les modèles, les conditions aux limites (convexe ou concave) sont les mêmes que pour les modèles du groupe 1.

Tableau 28. Statistiques élémentaires de 53 maisons distinctes du groupe 2

Paramètre	Identificateur (unité)	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Longueur	Long (m)	24.132	6.582	14	37
Hauteur	Haut (m)	8.179	1.587	5.5	12.5
Nombre d'ouvertures (portes et fenêtres)	NOD	16.491	2.589	12	21
Nombre d'étages	Niv	3.066	0.505	2	4
Surface totale	St (m2)	191.962	47.729	119	304
Surface totale d'ouvertures	Sv (m2)	28.819	6.857	17.17	44.3
Ratio Sv/St	Sv/St	0.155	0.042	0.084	0.289
Ratio Hauteur/ Longueur	H/L	0.379	0.170	0.176	0.8

Tableau 29. Statistiques élémentaires de 11 maisons choisies représentatives du groupe 2

Paramètre	Identificateur (unité)	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Longueur	Long (m)	20.091	5.160	14	28
Hauteur	Haut (m)	8.627	2.015	6	11.2
Nombre d'ouvertures (portes et fenêtres)	NOD	13.818	2.208	11	18
Nombre d'étages	Niv	3.045	0.656	2.5	4.5
Surface totale	St (m2)	163.6	10.714	150	180
Surface totale d'ouvertures	Sv (m2)	24.408	6.889	17.17	34.73
Ratio Sv/St	Sv/St	0.150	0.045	0.102	0.232
Ratio Hauteur/ Longueur	H/L	0.479	0.205	0.214	0.8
Domage (zone convexe)	D1	0.05	0.02	0.01	0.08
Domage (zone concave)	D2	0.06	0.01	0.05	0.09

La Figure 59 montre l'un des modèles mis en œuvre. Il comporte 18 ouvertures (portes et fenêtres), sa longueur est 28 m et sa hauteur de 8.4 m. Il s'agit d'une maison à 3 niveaux (RDC inclus). La maçonnerie a les mêmes caractéristiques que dans les modèles du groupe 1 (Tableau 19) ainsi que la sollicitation appliquée à la limite supérieure du modèle.

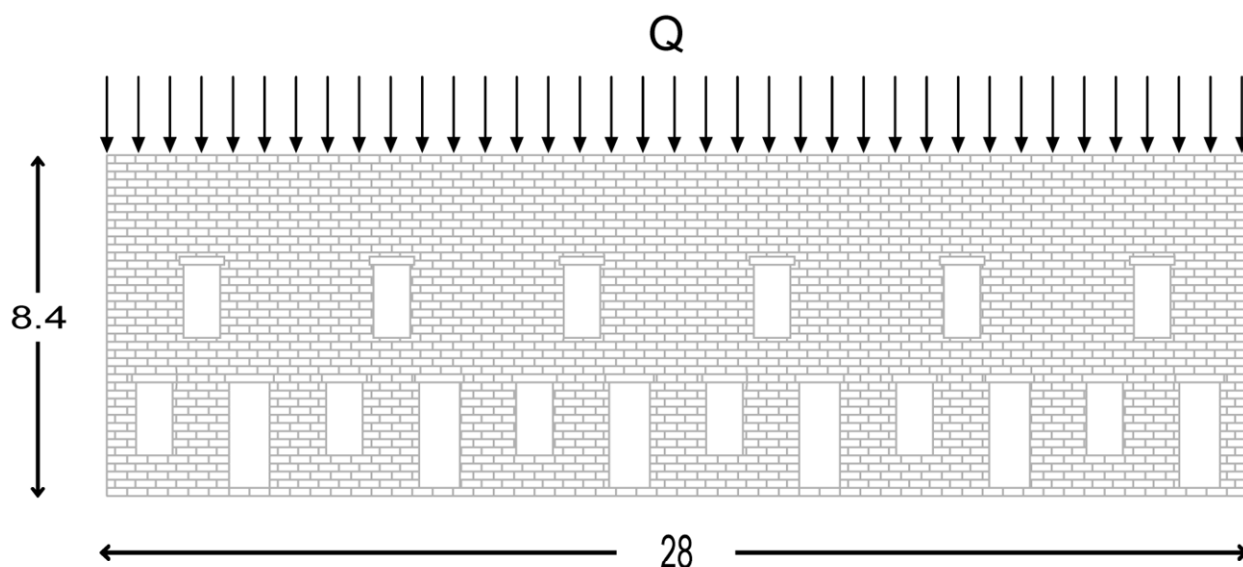


Figure 59. Exemple d'un modèle employé dans le groupe 2

De même que précédemment, la « valeur-test » des variables pour ce groupe permet d'identifier lesquelles représentent le mieux l'ensemble du groupe. Le Tableau 30 présente ainsi celles dont la valeur test dépasse 2 en valeur absolue. On constate ainsi que les variables les plus significatives pour ce groupe sont NOD, St, Sv et Long, tandis que Haut et H/L le sont nettement moins. Par contre les variables Niv et Sv/St ne sont pas représentatives. Comme nous l'avons vu dans la classification initiale, on retrouve dans ce groupe les maisons longues voire très longues (en moyenne deux fois plus longues que les autres, souvent des maisons accolées ou jumelées comme c'est le cas du modèle présenté en Figure 59), à peine plus hautes que les autres, mais par contre beaucoup moins élancées (en raison de la plus grande longueur). Ces maisons présentent logiquement une grande surface totale (et en corollaire une grande surface de vides).

Tableau 30. Présentation des variables caractéristiques de groupe 2

Variables caractéristiques	Moyenne dans le groupe	Moyenne générale	Ecart-type dans le groupe	Ecart-type général	v-test	Probabilité
NOD	16.491	8.739	2.589	3.226	18.18	0.000
St	191.962	99.897	47.729	40.667	17.13	0.000
Sv	28.819	15.301	6.857	6.311	16.20	0.000
Long	24.132	13.419	6.582	5.157	15.71	0.000
Haut	8.179	7.518	1.587	1.622	3.08	0.001
H/L	0.379	0.642	0.170	0.288	-6.90	0.000

1.3.1. Comportement mécanique des maisons du groupe 2 en zone convexe

La Figure 60 montre le champ de la distribution des contraintes principales (image du haut) provoquées après avoir sollicité l'un des individus du groupe 2 placée en position convexe. On constate un endommagement de la structure (image du bas) en divers endroits sous forme de fissures verticales de traction dans la partie supérieure du milieu vers la droite et des

« fissures » de cisaillement, en haut à gauche, entre les deux premiers niveaux. Les fissures de cisaillement sont majoritairement orientées vers la gauche (en partant du bas), ce qui est caractéristique de la sollicitation en zone convexe (voir exemple du groupe 1, Figure 56). Comme noté précédemment. La présence des ouvertures a évidemment un impact remarquable sur la densité de fissures et leur localisation.

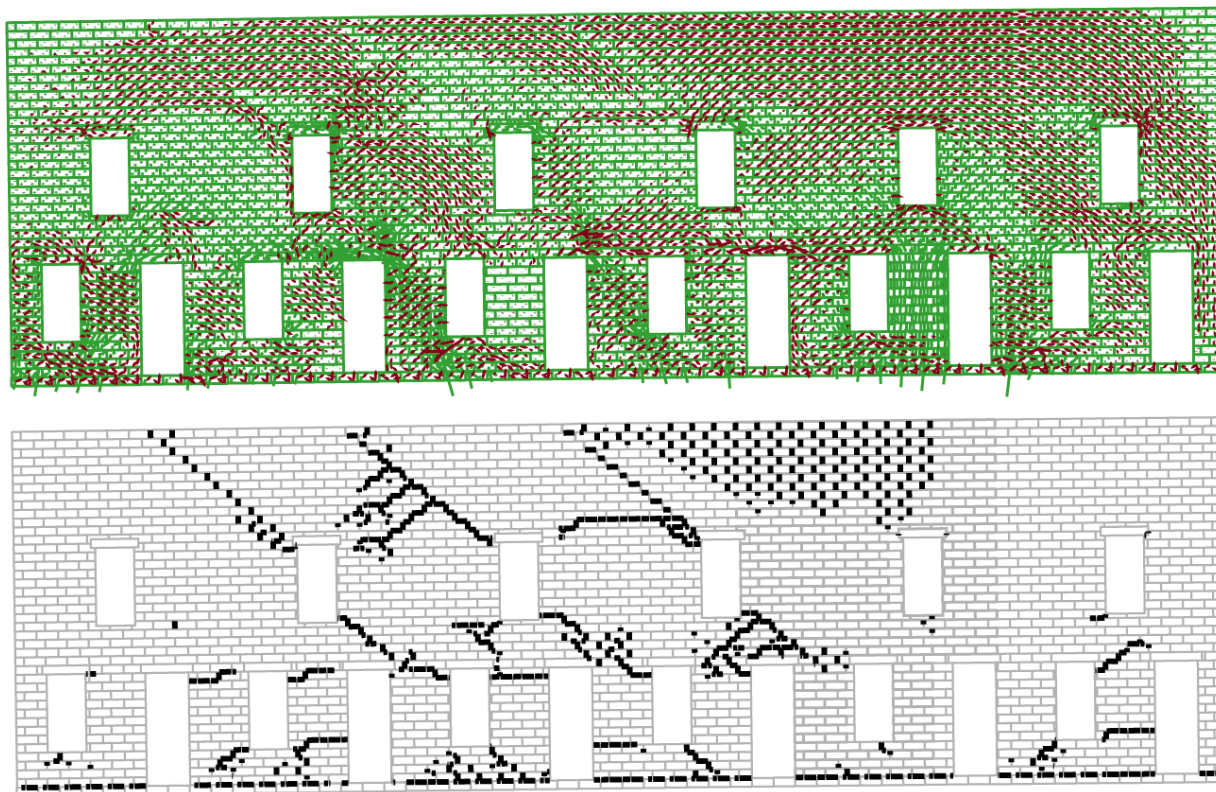


Figure 60. En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en claire). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison du groupe 2 placée en zone convexe

1.3.2. Régression multiple et colinéarité (ouvrage en zone convexe)

Le Tableau 31 donne le résultat d'analyse de régression linéaire multiple effectuée sur l'échantillon de 11 modèles issus des 53 individus du groupe 2. Les valeurs de VIF extrêmement élevées traduisent une très forte colinéarité de ces variables pour ce groupe.

Tableau 31. Estimation des coefficients de la régression linéaire multiple sur les variables de contrôle (11 calculs, $R^2 = 0.99$, zone convexe)

Symbole	Long	Haut	NOD	Niv	St	Sv	(Sv/St)	H/L
j	1326.15	4012.4	30.54	189.89	-627.16	-622.18	661.61	-2863.05
Sj	98.87	297.14	2.10	13.53	47.19	43.73	46.59	210.8
tj	13.4	13.50	14.48	14.02	-13.28	-14.22	14.19	-13.57
Pro%	0.0055	0.0054	0.0047	0.005	0.005	0.0049	0.0049	0.005
VIF	47331800.3	427493030	21542.1084	887224.87	10783737.9	9261660.29	10514103.2	215271867

Avec 19 individus (8 individus ajoutés à la liste des 11 précédents), on obtient les résultats du Tableau 32 dans lequel la colinéarité reste forte malgré la baisse importante des valeurs du VIF. Cela impose donc, comme pour le groupe 1, un passage par les composantes principales.

Tableau 32. Estimation de nouveaux coefficients de la régression linéaire multiple sur les variables de contrôle (19 individus, $R^2= 0.93$, zone convexe)

Symbole	Long	Haut	NOD	Niv	St	Sv	(Sv/St)	H/L
j	0.9	-0.81	0.62	0.88	-0.81	1.36	-1.44	0.098
Sj	1.503	3.16	0.18	0.24	1.38	1.149	1.184	2.224
tj	0.598	-0.256	3.463	3.678	-0.589	1.188	-1.216	0.044
Pro%	0.562	0.802	0.006	0.0042	0.568	0.262	0.2517	0.9655
VIF	356.78	1583.04	5.1659	9.234	303.962	208.719	221.41	781.35

Pour cet ensemble de 19 individus, nous avons les statistiques élémentaires du Tableau 33.

Tableau 33. Statistiques élémentaires de 19 maisons choisies représentatives du groupe 2

Paramètre	Identificateur (unité)	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Longueur	Long (m)	20.158	5.224	14	28
Hauteur	Haut (m)	8.737	1.905	6	12
Nombre d'ouvertures (portes et fenêtres)	NOD	14.368	2.538	11	19
Nombre d'étages	Niv	2.947	0.583	2.5	4.5
Surface totale	St (m ²)	168.305	26.715	128	238
Surface totale d'ouvertures	Sv (m ²)	26.675	7.392	17.17	39.16
Ratio Sv/St	Sv/St	0.161	0.049	0.102	0.265
Ratio Hauteur/ Longueur	H/L	0.481	0.2	0.214	0.8
Dommage-(Zone convexe)	D1	0.049	0.023	0.01	0.078
Dommage-(Zone concave)	D2	0.061	0.012	0.035	0.086

1.3.3. Régression sur les composantes principales du groupe 2 (ouvrages en zone convexe)

L'analyse effectuée en composantes principales donne, sur l'échantillon redressé de 19 modèles, les résultats de corrélation illustrés sur la Figure 61. On peut constater les points suivants :

- La variable Long est corrélée négativement avec l'ensemble des variables Haut, Niv, Sv/St et H/L et est corrélée positivement avec la seule variable surface totale (St) ;
- La variable Haut est naturellement corrélée positivement avec la variable Niv et également corrélée avec la variable élancement (H/L) ;
- La surface d'ouvertures (Sv) est corrélée positivement avec la variable Sv/St ;

- Les variables Long Haut, Niv, Sv/St et ratio H/L sont corrélées positivement avec l'axe factoriel 1 et seule la variable Long est corrélée négativement avec cet axe factoriel. Par contre, les variables NOD, Sv et Sv/St sont corrélées positivement avec l'axe factoriel 2. La variable St est quant à elle corrélée positivement avec l'axe factoriel 3 (non représenté) ;

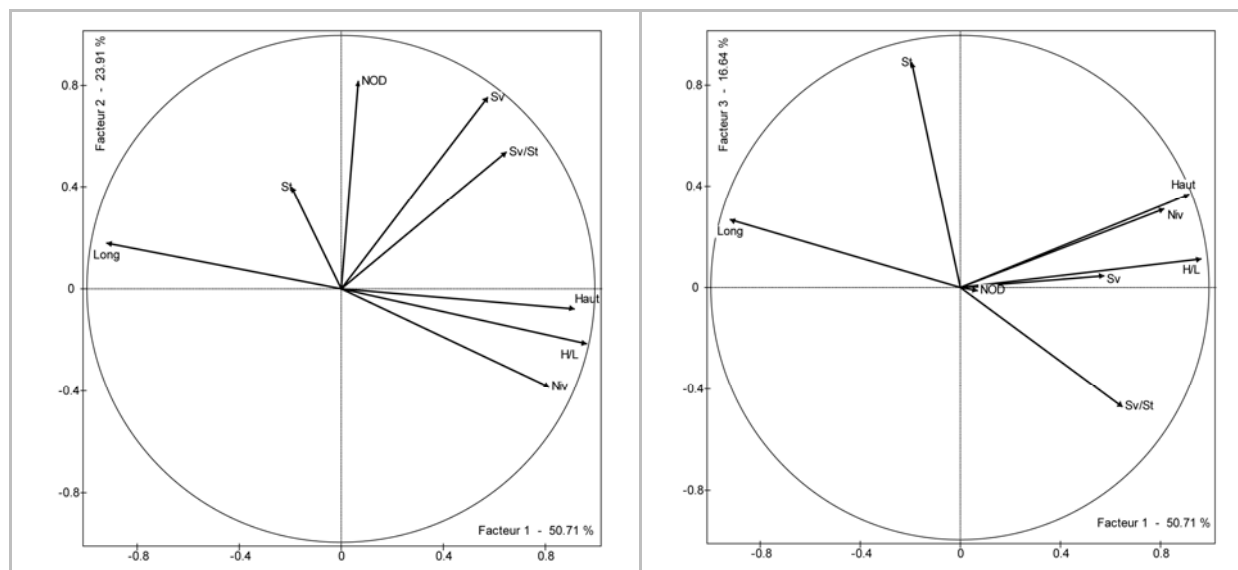


Figure 61. Cercles de corrélation correspondent à la projection des variables de contrôle dans le plan factoriel (F1 et F2), qui intercepte environ 74.62% d'inertie totale et dans le plan factoriel (F1 et F3) qui intercepte environ 67.35% d'inertie totale

La mise en œuvre de la méthode de régression orthogonale exposée précédemment, pour l'échantillon des 19 modèles du groupe 2, placés en zone convexe, donne les coefficients des trois premières composantes principales indiqués dans le Tableau 34.

Tableau 34. Coefficients estimés de régression orthogonale avec n=19 individus (zone convexe, groupe 2)

Coefficient	Composantes principales retenues		
	F1	F2	F3
j	-0.321	0.144	-0.091

La variables initiales se projettent par ailleurs sur ces composantes avec les coefficients donnés dans le Tableau 35.

Tableau 35. Coefficients de la liaison linéaire entre les variables de contrôle utilisées et les composantes principales (groupe 2, zone convexe)

Variables de contrôle	F1	F2	F3	F4	F5
Long	-0.4566875	0.12939028	0.23023823	0.25407178	0.28815642
Haut	0.4536746	-0.0562177	0.31935682	-0.1042841	-0.3517877
NOD	0.03353939	0.59020959	-0.0117996	-0.7652252	0.23838948
NIVEAU	0.40380913	-0.2792018	0.26921426	0.03847525	0.81654186
St	-0.0970994	0.2870807	0.77152613	0.12238275	-0.1497629
Sv	0.28405607	0.54511644	0.04003161	0.42803247	0.01399415
(Sv/St)	0.32116794	0.38765566	-0.4075551	0.35762286	0.09051882
Elance	0.47766536	-0.1547661	0.09710687	-0.1069534	-0.1970347

Remplaçant les trois premières composantes principales de la régression orthogonale par la combinaison des variables initiales, on détermine les coefficients de régression du Tableau 36. Ce dernier montre que certaines variables (NOD, St, Sv et Sv/St) ne sont pas significatives au seuil de 5%, leur t_i étant inférieur à 2 en valeur absolue.

Tableau 36. Estimation des coefficients de la régression sur les variables de contrôle obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (groupe 2, zone convexe)

F1, F2, F3	Long	Haut	NOD	Niv	St	Sv	(Sv/St)	H/L
b_i	0.144	-0.183	0.075	-0.194	0.0017	-0.016	-0.0099	-0.184
S_i	0.0594	0.0674	0.0802	0.0691	0.1318	0.0789	0.0898	0.0517
t_i	2.4291	-2.716	0.939	-2.817	0.0129	-0.208	-0.1104	-3.571

La réponse (dommage) peut alors être exprimé par le modèle approché de l'équation [Eq.5] où la variables sont normalisées (centrées et réduites (notées*)). Dans cette équation, la comparaison des coefficients permet une comparaison de l'influence respective des variables dans l'explication du dommage. On constate par exemple que seule la longueur (Long) est la variable prépondérante.

$$\text{Dommage}^* \approx 0.144 \text{ Long}^* - 0.183 \text{ Haut}^* - 0.194 \text{ Niv}^* - 0.184 (H/L)^* \quad \text{Eq [5]}$$

Le redressement des variables centrées réduites nous amène ensuite à l'équation [Eq. 6] qui permet d'exprimer le résultat en fonction des valeurs brutes des variables.

$$\begin{aligned} \text{Dommage} = & 8.8514 \cdot 10^{-2} + 6.431 \cdot 10^{-4} \text{ Long} - 2.239 \cdot 10^{-3} \text{ Haut} \\ & - 7.785 \cdot 10^{-3} \text{ Niv} - 2.149 \cdot 10^{-2} (H/L) \end{aligned} \quad \text{Eq [6]}$$

L'équation finale [Eq. 6] peut donc être employée comme modèle de vulnérabilité pour prévoir les dommages en fonction des paramètres de contrôle utilisés (zone convexe).

Enfin l'analyse des signes permet de vérifier la cohérence du modèle obtenu. On constate ainsi qu'une plus grande longueur contribue à augmenter le dommage (signe +) tandis qu'un plus grand élancement (H/L) tend à le diminuer.

1.3.4. Comportement mécanique des maisons du groupe 2 en zone concave

En zone concave, l'état de contraintes obtenu dans la structure (Figure 62) est clairement différent de ce qu'on a obtenu en zone convexe (Figure 60). Il est évident que la sollicitation en zone concave (courbure vers le haut) suscite, dans la partie supérieure et au milieu de la structure, un champ de contraintes en compression (image de haut, couleur claire) qui conduit en effet à l'ouverture des joints longitudinaux (fissures de compression : image de bas) et à des fissures diagonales liées au cisaillement qui prennent la forme globale d'un « parasol ».

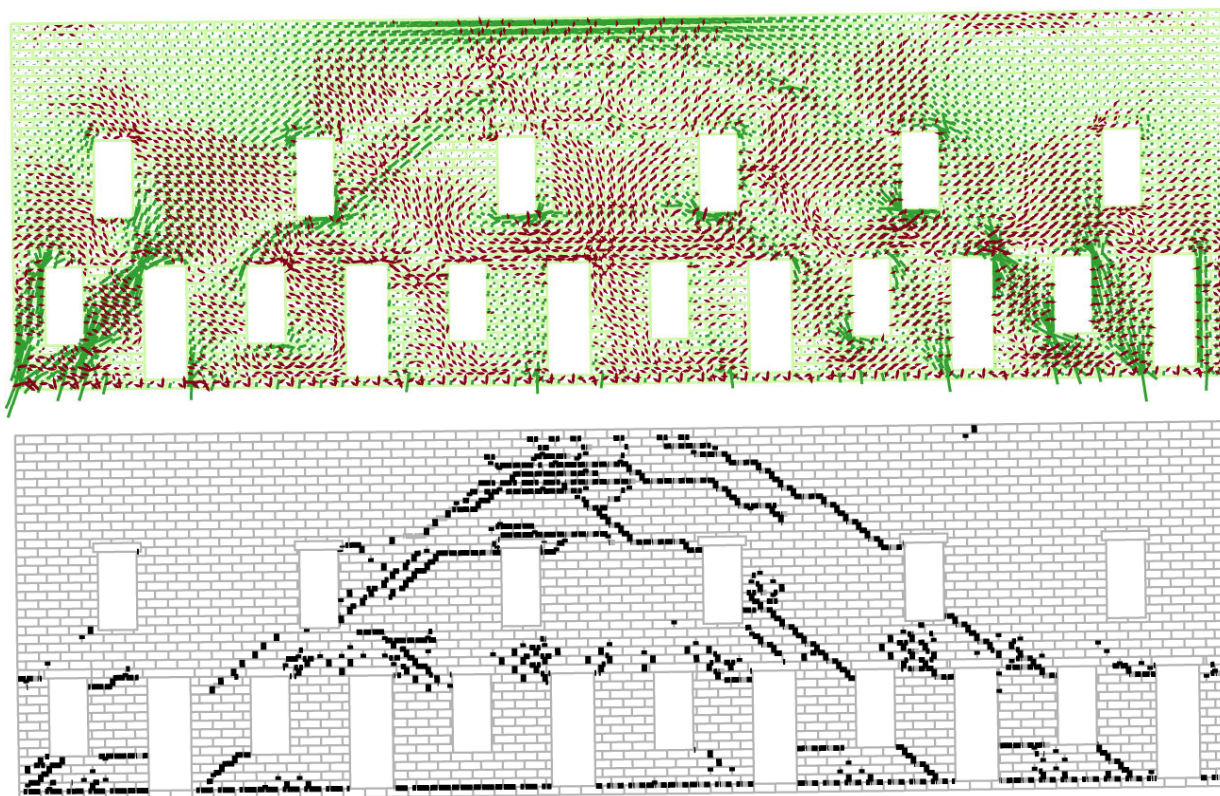


Figure 62. En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en clair). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison du groupe 2 placée en zone concave

1.3.5. Régression sur les composantes principales du groupe 2 (ouvrages en zone concave)

On est maintenant convaincu du fait que la méthode de régression linéaire multiple sur les variables de départ ne fonctionne pas pour l'interprétation de leur influence en raison des colinéarités relevées par le facteur d'inflation (VIF) de chaque variable, d'où la nécessité d'avoir recours à la régression sur les composantes principales, orthogonales par construction. Cette dernière s'avère pertinente pour la construction d'un modèle de vulnérabilité, deuxième dimension du risque naturel. Aussi, le Tableau 37 ci-après donne directement les coefficients de la régression orthogonale menée à partir des 19 individus du groupe 2 placés en zone concave.

Tableau 37. Coefficients estimés de régression orthogonale avec n=19 individus (zone concave, groupe 2)

Coefficient	Composantes principales retenues				
	F1	F2	F3	F4	F5
j	-0.0654	0.1505	-0.1828	-0.1823	1.60605

Le tableau montre l'analyse pour les 5 premières composantes, car l'analyse sur les trois premières n'a donné aucune variables significatives. Par contre, avec 2 composantes supplémentaires (ce qui porte à 99,83% l'inertie ainsi prise en compte), et revenant aux variables initiales, on arrive alors à la combinaison linéaire donnée dans le Tableau 38. Ce dernier indique que les variables Sv et Sv/St ne sont pas significatives au seuil de 5%, leur *ti* étant inférieur à 2 en valeur absolue.

Tableau 38. Estimation des coefficients de la régression sur les variables de contrôle obtenues à partir de la régression sur les 5 premières composantes principales (groupe 2, zone concave)

F1 à F5	Long	Haut	NOD	Niv	St	Sv	(Sv/St)	H/L
bi	0.4237	-0.6425	0.6112	1.1867	-0.3543	0.00055	0.1920	-0.3692
Si	0.1812	0.2047	0.258	0.4463	0.1653	0.1432	0.1445	0.123
ti	2.33	-3.13	2.36	2.65	-2.14	0.003	1.32	-2.99

Il en résulte que la réponse (dommage) peut être exprimé par le modèle approché de l'équation [Eq.7] où les variables sont normalisées (centrées et réduites (notées*)) et qui permet la comparaison de l'influence respective des variables.

$$\text{Domage}^* \approx 0.4237 \text{ Long}^* - 0.6425 \text{ Haut}^* + 0.6112 \text{ NOD}^* + 1.1867 \text{ Niv}^* - 0.3543 \text{ St}^* - 0.3692 (H / L)^* \quad [\text{Eq 7}]$$

Après redressement des variables, on obtient l'équation [Eq.8] qu'on peut utiliser avec les valeurs brutes des différentes variables et qui peut servir de modèle de vulnérabilité pour les maisons du groupe 2 quand ils sont placés en zone concave et à sollicitation maximale.

$$\text{Domage} = 2.214 \cdot 10^{-3} + 9.457 \cdot 10^{-4} \text{ Long} - 3.931 \cdot 10^{-3} \text{ Haut} + 2.807 \cdot 10^{-3} \text{ NOD} + 2.37 \cdot 10^{-2} \text{ Niv} - 1.5465 \text{ St} - 2.15 \cdot 10^{-2} (H / L) \quad [\text{Eq 8}]$$

L'interprétation des signes indique que les variables Long et NOD contribuent à augmenter la valeur de dommage (signe +) tandis qu'une plus grande valeur des variables H/L, St, Haut tend à le réduire.

1.4. Présentation et analyse du groupe 3

Le groupe 3 comprend quant à lui 116 maisons. Le Tableau 39 exhibe les statistiques descriptives de l'ensemble de ce groupe. Un échantillon aléatoire de 25 individus a fait l'objet de calculs avec la méthode des éléments distincts dans lesquels ont été appliquée une sollicitation correspondant à un placement en zone convexe puis en zone concave. Le Tableau

40 donne la valeur moyenne et l'écart-type des réponses (D1 et D2) obtenues à l'issue de ces calculs.

Tableau 39. Statistiques élémentaires de 116 maisons distinctes du groupe 3

Paramètre	Identificateur (unité)	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Longueur	Long (m)	10.103	3.947	3.000	26
Hauteur	Haut (m)	5.428	1.145	2.500	8
Nombre d'ouvertures (portes et fenêtres)	NOD	6.103	2.405	2.000	13
Nombre d'étages	Niv	2.009	0.491	1.000	3
Surface totale	St (m ²)	53.240	17.210	16.500	96
Surface totale d'ouvertures	Sv (m ²)	11.977	5.432	3.300	30.31
Ratio Sv/St	Sv/St	0.227	0.076	0.074	0.505
Ratio Hauteur/ Longueur	H/L	0.620	0.298	0.115	2

Tableau 40. Statistiques élémentaires de 25 maisons choisies aléatoirement dans le groupe 3 et résultats des simulations en terme de longueur cumulée des joints ouverts en zones convexe et concave.

Paramètre	Identificateur (unité)	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Longueur	Long (m)	10.400	3.816	6.000	26.000
Hauteur	Haut (m)	5.708	1.256	3.000	8.000
Nombre d'ouvertures (portes et fenêtres)	NOD	5.920	1.831	3.000	12.000
Nombre d'étages	Niv	1.960	0.488	1.000	2.500
Surface totale	St (m ²)	56.940	15.737	28.000	88.000
Surface totale d'ouvertures	Sv (m ²)	13.498	6.292	4.650	28.660
Ratio Sv/St	Sv/St	0.234	0.078	0.129	0.378
Ratio Hauteur/ Longueur	H/L	0.605	0.213	0.115	1.167
Domage (zone convexe)	D1	0.018	0.022	0.000	0.090
Domage (zone concave)	D2	0.026	0.026	0.001	0.082

La Figure 63 présente l'un des modèles mis en œuvre. Il comporte 7 ouvertures (portes et fenêtres), fait 12 m de longueur et 6 m de hauteur. Cette maison comprend deux niveaux.

Propriétés physiques et mécaniques ainsi que sollicitation du toit sont les mêmes que dans les calculs menés sur les autres groupes.

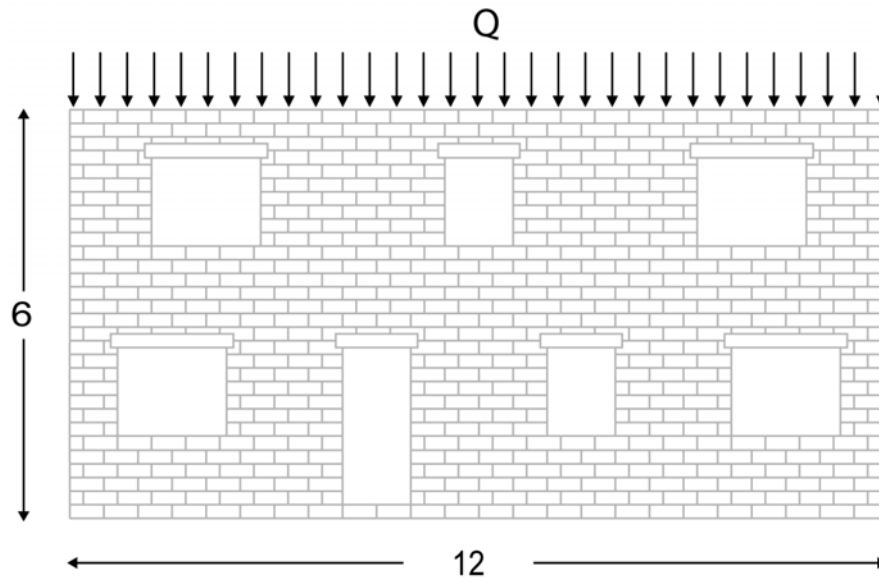


Figure 63. Exemple d'un modèle employé dans le groupe 3

Seule la variable surface totale (St) est absente du Tableau 42 car sa valeur test ne dépasse pas 2 en valeur absolue. Elle n'est donc pas représentative de ce groupe. Ce groupe comprend en effet des maisons plutôt petites, tant en longueur qu'en hauteur comme le montre la comparaison entre les valeurs moyennes dans le groupe et les valeurs moyennes de l'ensemble de la population. Corrélativement, ces maisons ont une surface de vide, un nombre de niveaux, un nombre d'ouvertures et une surface totale plus faibles en moyenne que l'ensemble des maisons de Joeuf.

Tableau 41. Présentation des variables caractéristiques de groupe 3

Variables caractéristiques	Moyenne dans le groupe	Moyenne générale	Ecart-type dans le groupe	Ecart-type général	v-test	Probabilité
Sv/St	0.227	0.162	0.076	0.058	13.27	0.000
Sv	11.977	15.301	5.432	6.311	-6.20	0.000
Long	10.103	13.419	3.947	5.157	-7.57	0.000
NOD	6.103	8.739	2.405	3.226	-9.62	0.000
St	53.240	99.897	17.210	40.667	-13.51	0.000
Haut	5.428	7.518	1.145	1.622	-15.17	0.000
Niv	2.009	2.973	0.491	0.680	-16.70	0.000

1.4.1. Comportement mécanique des maisons du groupe 3 en zone convexe

La Figure 64 montre la distribution des contraintes principales (image du haut) après avoir sollicité l'une des structures du groupe 3 par un déplacement vertical imposé prenant la forme d'une courbure vers le bas (zone convexe). Les efforts de traction engendrés dans la partie supérieure de la structure entraînent une ouverture verticale des joints (image du bas). De même, les contraintes de cisaillement provoquent la création de quelques fissures diagonales particulier entre les ouvertures.

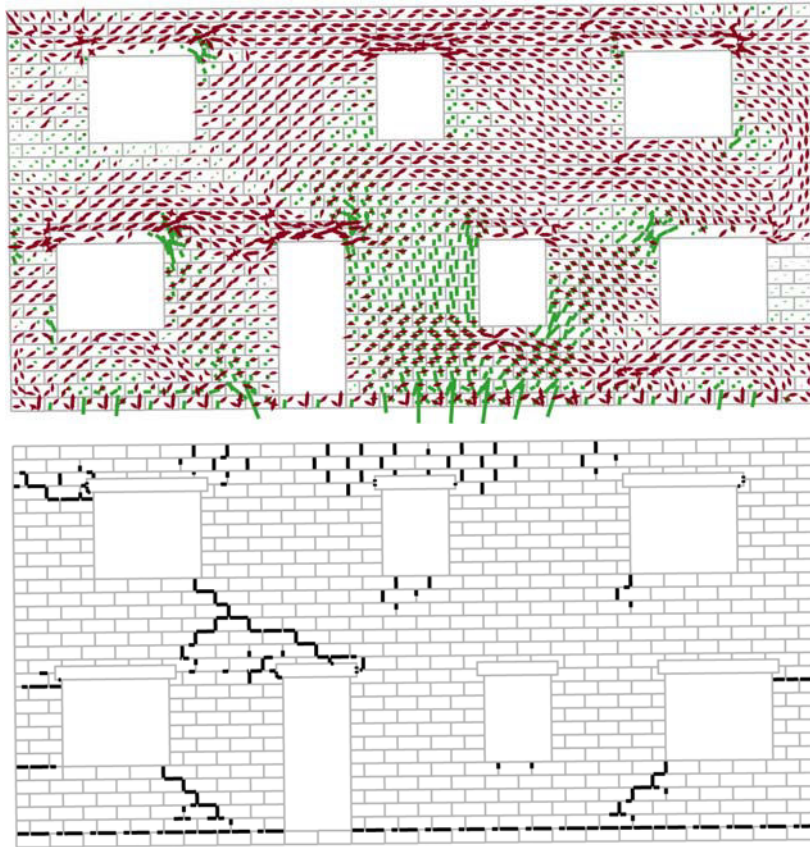


Figure 64. En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en clair). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison du groupe 3 placée en zone convexe

1.4.2. Régression sur les composantes principales du groupe 3 (ouvrages en zone convexe)

On a montré précédemment que l'analyse effectuée en régression multiple sur les variables de contrôle ne peut pas être validée en raison des colinéarités entre variables. Aussi, nous ne présentons ci-dessous que les résultats de la régression sur les trois premières composantes principales qui interceptent une grande partie de la variance totale (inertie) et qui donnent une meilleure interprétation des variables de contrôle influençant la réponse étudiée (dommage).

L'analyse en composantes principales sur l'échantillon aléatoire de 25 maisons du groupe 3 donne les corrélations indiquées sur la Figure 65 pour les deux premiers plans factoriels. Cette figure témoigne des corrélations suivantes :

- La variable Long est corrélée positivement avec l'ensemble des variables NOD, St, Sv et Sv/St. Elle est également corrélée négativement avec la seule variable H/L ;
- La variable Haut est naturellement corrélée positivement avec la variable Niv. Elle est également corrélée avec la variable H/L ;
- Les variables Long, NOD, St, Sv sont corrélées positivement avec l'axe factoriel 1 et seule la variable H/L est corrélée négativement avec cet axe. De même les variables Haut et Niv sont plus corrélées avec l'axe factoriel 2.
- Enfin la variable Sv/St est corrélée négativement avec l'axe factoriel 3 (non représenté) ;

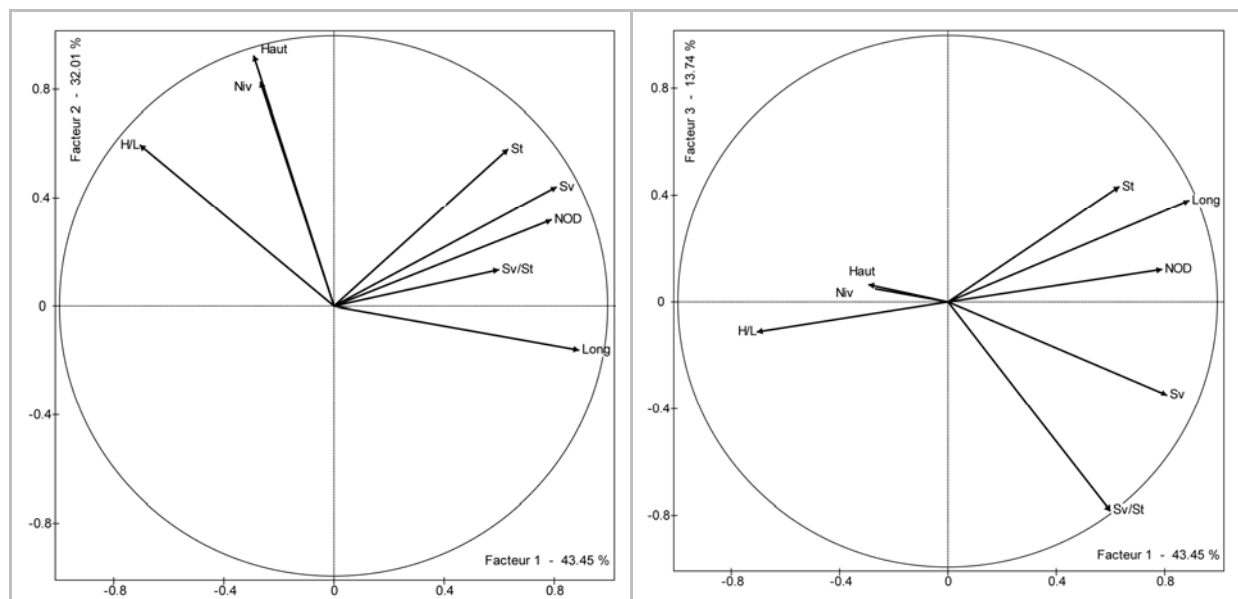


Figure 65. Cercles de corrélation correspondent à la projection des variables de contrôle dans le plan factoriel (F1 et F2), qui intercepte environ 75.46% de l'inertie totale et dans le plan factoriel (F1 et F3) qui intercepte environ 57.19% de l'inertie totale

Ensuite, la régression orthogonale sur l'échantillon des 25 maisons du groupe 3 placées en zone convexe nous a permis d'obtenir les coefficients des trois premières composantes principales (Tableau 42).

Tableau 42. Coefficients estimés de la régression orthogonale avec n=25 individus (zone convexe, groupe 3)

Coefficient	Composantes principales retenues		
	F1	F2	F3
j	0.208	0.065	0.381

On peut ensuite revenir à une expression dépendant des variables initiales à partir des liaisons linéaires entre les variables initiales et les axes principaux données dans le Tableau 43.

Tableau 43. Coefficients de la liaison linéaire entre les variables de contrôle utilisées et les trois composantes principales

Variables de contrôle	F1	F2	F3
Long	0.47752449	-0.0999553	-0.3629645
Haut	-0.1562506	0.57581892	-0.0616889
NOD	0.42346813	0.19875559	-0.1144415
NIVEAU	-0.1437673	0.51647602	-0.0452867
St	0.33784442	0.36207267	-0.4102353
Sv	0.43261788	0.27536996	0.33332763
(Sv/St)	0.32123878	0.08392451	0.74744598
Elance	-0.3782465	0.37178178	0.10596097

Puis nous pouvons étudier le caractère significatif ou non de ces variables au moyen des données du Tableau 44.

Tableau 44. Estimation des coefficients de la régression sur les variables de contrôle obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (groupe 3, zone convexe)

F1. F2. F3	Long	Haut	NOD	Niv	St	Sv	(Sv/St)	H/L
bi	-0.045	-0.018	0.057	-0.013	-0.062	0.235	0.357	-0.014
Si	0.0781	0.0672	0.0504	0.0601	0.0875	0.0771	0.1321	0.0583
ti	-0.579	-0.273	1.142	-0.222	-0.71	3.047	2.704	-0.242

Notre modèle de vulnérabilité (dommage) peut alors s'exprimer par l'équation [Eq 9] dans lesquelles les variables non significatives (ti inférieur à 2 en valeur absolue) ont été retirées. On constate en particulier que la variable (Sv/St) est la variable la plus influente.

$$\text{Domage}^* \approx 0.235 Sv^* + 0.357 (Sv/St)^* \quad [\text{Eq 9}]$$

En redressant les variables centrées réduites, on obtient l'équation [Eq 10] qui permet d'exprimer le résultat en fonction des valeurs brutes des variables.

$$\text{Domage} = -0.015 + 8.123 \cdot 10^{-4} Sv + 0.0993 Sv/St \quad [\text{Eq 10}]$$

L'équation [Eq 10] peut donc être employée comme modèle de vulnérabilité pour prévoir les dommages en fonction des paramètres de contrôle utilisés pour le groupe 3 et en zone convexe.

Enfin l'analyse des signes permet de vérifier la cohérence du modèle obtenu. On constate ainsi qu'une plus grande Sv ou Sv/St contribue à augmenter le dommage (signe +).

1.4.3. Comportement mécanique des maisons du groupe 3 en zone concave

La Figure 66 montre le champ des contraintes principales (image de haut) engendrées l'un des modèles du groupe 3 après sollicitation en zone concave. La différence est assez nette avec le cas en zone convexe. Comme dans les groupes précédents, les fissures diagonales qui caractérisent principalement ce type de sollicitation sont orientées à 90° de celles qu'on trouvait en zone convexe. On retrouve également des contraintes de compression horizontale en haut et au milieu de la structure qui correspondent bien au « resserrement » de la structure due à la courbure vers le haut, imposée à l'ouvrage et qui, contrairement au modèle en zone convexe, a tendance à refermer les joints verticaux dans cette partie de la structure.

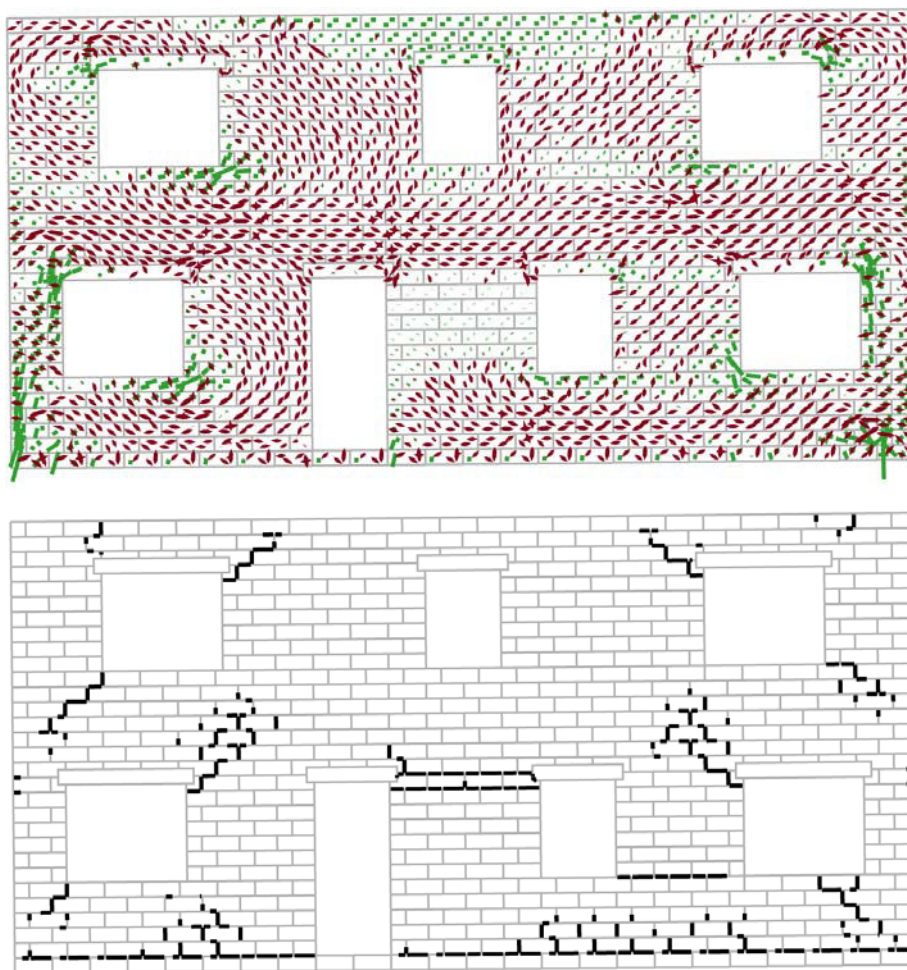


Figure 66. En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en claire). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison placée en zone convexe

1.4.4. Régression sur les composantes principales du groupe 3 (ouvrages en zone concave)

Sur le principe mis en œuvre dans les groupes 1 et 2, la régression sur les trois premières composantes principales obtenues à partir de l'analyse des résultats sur l'échantillon des 25 individus du groupe 3 placés en zone concave, donne les coefficients du Tableau 45.

Tableau 45. Coefficients estimés de régression orthogonale avec n=25 individus (zone concave, groupe 3)

Coefficient	Composantes principales retenues		
	F1	F2	F3
j	0.187	0.227	0.312

Après changement de variable et retour aux variables initiales centrées et réduites, on obtient les coefficients de régression du Tableau 46 qui montre que les variables Long, Haut, NOD,

Niv, St et H/L ne sont pas significatives au seuil de 5%, les valeurs de ti étant moindres inférieures à 2 en valeur absolue.

Tableau 46. Estimation des coefficients de la régression sur les variables de contrôle obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (zone concave, groupe 3)

F1, F2, F3	Long	Haut	NOD	Niv	St	Sv	(Sv/St)	H/L
bi	-0.046	0.082	0.088	0.076	0.017	0.248	0.313	0.046
Si	0.0758	0.0651	0.0489	0.0583	0.0848	0.0748	0.1281	0.0565
ti	-0.616	1.262	1.813	1.308	0.203	3.313	2.444	0.826

La réponse (dommage) est alors être exprimée par le modèle approché de l'équation [Eq 11] où les variables sont normalisées (notées*). Ce modèle prend la forme de l'équation [Eq 12] avec les variables initiales brutes. Dans les deux cas, c'est la surface des vides qui est prépondérante.

$$\text{Domage}^* \approx 0.248 Sv^* + 0.313 (Sv / St)^* \quad [\text{Eq 11}]$$

Pour revenir aux valeurs brutes des variables, on a redressé ces variables normalisées (centrées-réduites) d'où l'équation [Eq. 12] comporte un terme constant.

$$\text{Domage} = -0.012 + 1.02410^{-3} Sv + 0.104110^{-2} (Sv / St) \quad [\text{Eq 12}]$$

L'équation [Eq 11] montre que le rapport Sv/St a une influence plus grande sur le dommage que la variable Sv seule, traduisant de ce fait l'influence également importante de la variable St. Les signes montrent qu'un accroissement des surfaces de vides augmentent le dommage tandis qu'à Sv constant, un accroissement de la surface totale tend à le diminuer.

1.5. Présentation et analyse du groupe 4

La classification ascendante hiérarchique nous a donné un groupe 4 pourvu de 186 maisons dont le Tableau 47 donne les grandes caractéristiques statistiques. Pour ce groupe, l'analyse du dommage a porté sur un échantillon aléatoire de 36 individus, modélisés avec le logiciel Udec. Les résultats obtenus en terme de dommage ainsi que les caractéristiques statistiques de cet échantillon sont donnés dans le Tableau 48.

Tableau 47. Statistiques élémentaires de 186 maisons distinctes du groupe 4

Paramètre	Identificateur (unité)	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Longueur	Long (m)	9.261	1.604	6	14
Hauteur	Haut (m)	8.978	1.408	6.5	13.5
Nombre d'ouvertures (portes et fenêtres)	NOD	7.780	2.383	4	15
Nombre d'étages	Niv	3.449	0.413	2.5	4.5
Surface totale	St (m2)	83.798	23.174	45	168
Surface totale d'ouvertures	Sv (m2)	14.458	5.999	5.76	30.5
Ratio Sv/St	Sv/St	0.172	0.056	0.093	0.367
Ratio Hauteur/ Longueur	H/L	0.994	0.219	0.7	2.250

Tableau 48. Statistiques élémentaires des 36 maisons choisies représentatives du groupe 4

Paramètre	Identificateur (unité)	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Longueur	Long (m)	10.528	1.993	8	14
Hauteur	Haut (m)	9.236	1.294	6.5	11.5
Nombre d'ouvertures (portes et fenêtres)	NOD	8.861	2.428	5	13
Nombre d'étages	Niv	3.389	0.458	2.5	4.5
Surface totale	St (m2)	96.889	24.121	52	147
Surface totale d'ouvertures	Sv (m2)	16.550	5.443	7.68	30.5
Ratio Sv/St	Sv/St	0.171	0.040	0.128	0.308
Ratio Hauteur/ Longueur	H/L	0.908	0.214	0.583	1.438
Domage (zone convexe)	D1	0.007	0.009	0.001	0.036
Domage (zone concave)	D2	0.017	0.013	0.001	0.056

Le modèle montré sur la Figure 67 est l'un des modèles mis en œuvre pour ce groupe. Il comprend 10 ouvertures sur une façade qui fait 14 m de longueur et 9 m de hauteur. C'est une maison composée de 3 niveaux. Propriétés physiques et sollicitations sont les mêmes que dans les analyses sur les groupes 1 à 3.

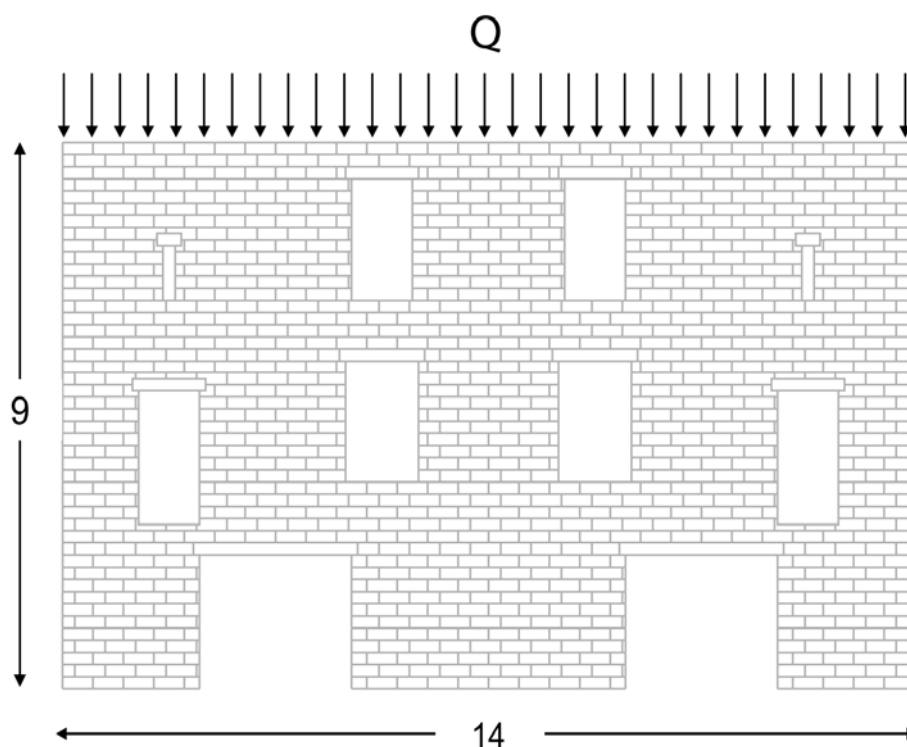


Figure 67. Exemple d'un modèle employé dans le groupe 4

On remarque, dans le Tableau 49, que le groupe 4 est plus particulièrement marqué par 5 variables (v-test supérieur à 2 en valeur absolue) sur les 8 variables utilisées pour l'analyse. La comparaison des moyennes du groupe comparées aux moyennes générales montre en particulier que le groupe 4 comprend des maisons plus hautes, plus élancées, avec plus de niveaux mais moins d'ouvertures qu'en général dans tous les groupes. C'est une description qu'on pouvait déjà exprimer quand nous avons présenté la typologie des habitations de la ville de Joeuf après leur classification hiérarchique.

Tableau 49. Présentation des variables caractéristiques du groupe 4

Variables caractéristiques	Moyenne dans le groupe	Moyenne générale	Ecart-type dans le groupe	Ecart-type général	v-test	Probabilité
H/L	0.994	0.642	0.219	0.288	19.43	0.000
Haut	8.978	7.518	1.408	1.622	14.30	0.000
Niv	3.449	2.973	0.413	0.680	11.12	0.000
Sv/St	0.172	0.162	0.056	0.058	2.95	0.002
NOD	7.780	8.739	2.383	3.226	-4.72	0.000
St	83.798	99.897	23.174	40.667	-6.29	0.000

1.5.1. Comportement mécanique des maisons du groupe 4 en zone convexe

La Figure 68 montre un exemple de résultat obtenu pour l'une des maisons du groupe 4 placé en zone convexe. Le champ de contrainte obtenu (image du haut) se traduit par une ouverture

de joints illustrée sur l'image du bas. Dans ce modèle, peu de joints sont ouverts et on peut dire que la maison est faiblement endommagée. Néanmoins, on note quelques fissures de traction verticales prévisibles dans la partie supérieure.

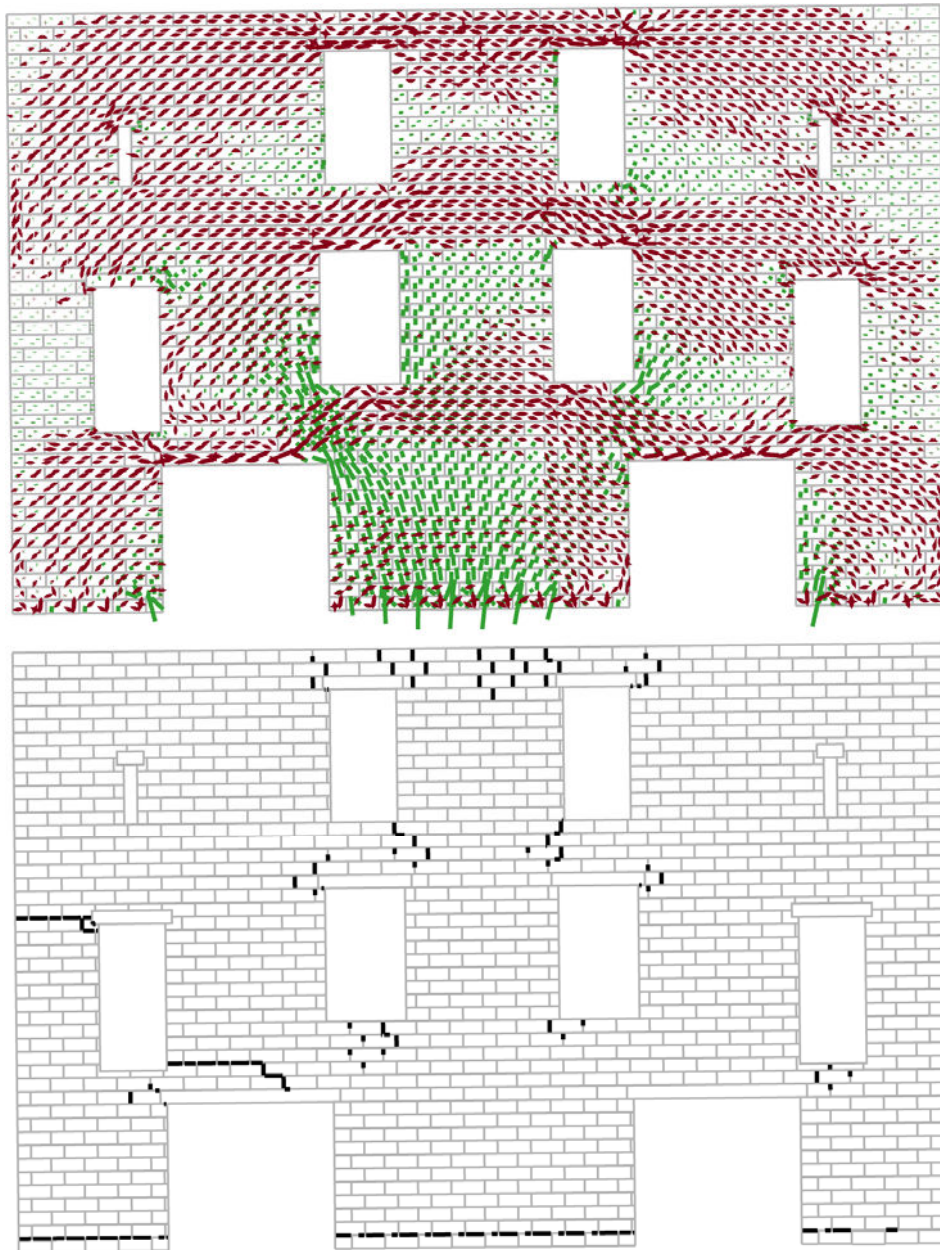


Figure 68. En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en claire). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison placée en zone convexe

1.5.2. Régression sur les composantes principales du groupe 4 (ouvrages en zone convexe)

L'analyse en composantes principales des données et résultats de modélisation de l'échantillon de 36 maisons du groupe 4 donne les corrélations illustrées sur la Figure 69. On peut y relever les points suivants :

- La variable Long est corrélée positivement avec les variables St, Sv et NOD et négativement avec la seule variable H/L ;

- La variable Haut est naturellement corrélée positivement avec les variables Niv et H/L ;

- Les variables Long, NOD, St, Sv sont corrélées positivement avec l'axe factoriel 1. Tandis que les variables Haut, Niv et H/L sont corrélées avec l'axe factoriel 2.

- Seule la variable Sv/St est corrélée négativement avec l'axe factoriel 3 (non représenté) ;

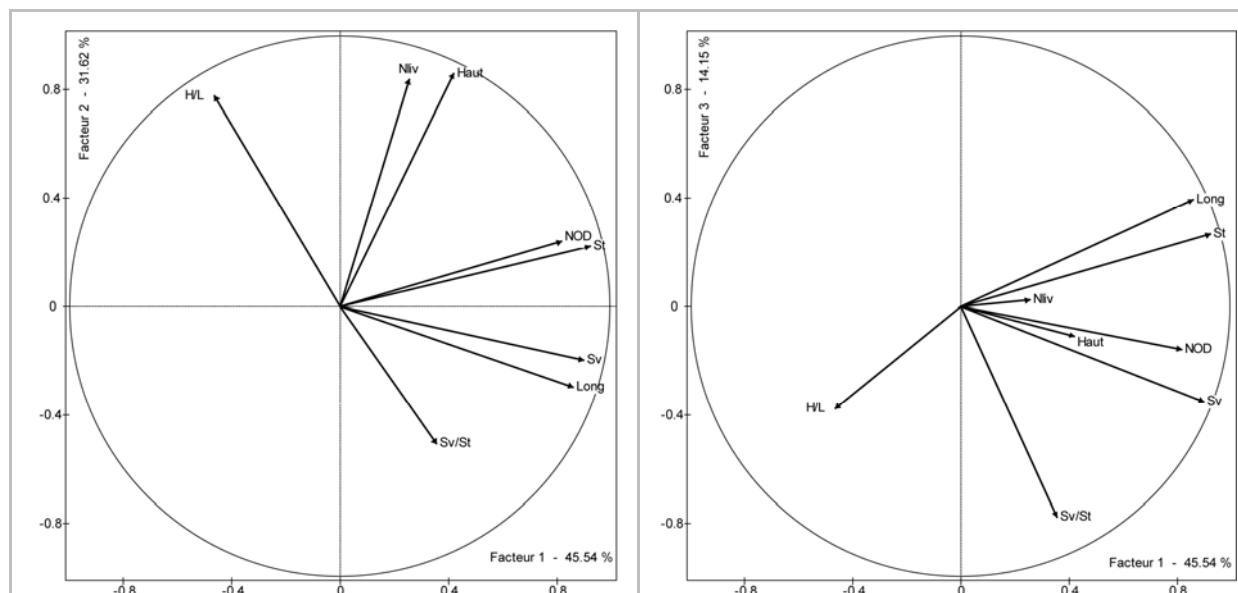


Figure 69. Cercles de corrélation correspondent à la projection des variables de contrôle dans le plan factoriel (F1 et F2), qui interceptent environ 77.16% d'inertie totale et dans le plan factoriel (F1 et F3) qui interceptent environ 59.69% d'inertie totale

La régression orthogonale ensuite mise en œuvre donne les résultats du Tableau 50.

Tableau 50. Coefficients estimés de régression orthogonale avec n=36 individus (zone convexe, groupe 4)

Coefficient	Composantes principales retenues		
	F1	F2	F3
j	0.292	-0.241	0.024

Le changement de variable qui permet de revenir aux variables initiales s'appuie sur les coefficients du Tableau 51 et conduit aux résultats de régression sur les variables initiales du Tableau 52.

Tableau 51. Coefficients de la liaison linéaire entre les variables de contrôle utilisées et les trois composantes principales (groupe 4, zone convexe)

Variables de contrôle	F1	F2	F3
Long	0.44984925	-0.1870736	-0.3706384
Haut	0.21988961	0.53916804	0.10279043
NOD	0.42768518	0.15114573	0.14954155
NIVEAU	0.13371356	0.52656626	-0.0235193
St	0.48313693	0.13835407	-0.2512516
Sv	0.47001854	-0.123234	0.32960246
(Sv/St)	0.18649068	-0.3186027	0.72944596
(H/L)	-0.2436653	0.48820901	0.35396174

Tableau 52. Estimation des coefficients de la régression sur les variables de contrôle obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (groupe 4, zone convexe)

F1. F2. F3	Long	Haut	NOD	Niv	St	Sv	(Sv/St)	H/L
bi	0.1106	-0.113	0.033	-0.129	0.028	0.126	0.154	-0.163
Si	0.0642	0.0545	0.0413	0.0499	0.0525	0.0593	0.1061	0.0692
ti	1.721	-2.083	0.807	-2.601	0.539	2.137	1.4528	-2.366

Compte tenu du caractère significatif ou non des variables considérées, on peut donc retenir le modèle [Eq 13] qui traduit une influence prépondérante du rapport H/L, suivie de l'influence du nombre de niveaux (Niv), de la surface des vides (Sv) puis de la hauteur (Haut).

$$\text{Dommage}^* \approx -0.113 \text{ Haut} * -0.129 \text{ Niv} * +0.126 \text{ Sv} * -0.163(H/L)^* \quad [\text{Eq 13}]$$

Un redressement des variables permettant d'utiliser les valeurs brutes donne alors l'équation [Eq 14].

$$\text{Dommage} = 0.02604 - 8.03510^{-3} \text{ Haut} - 2.5910^{-3} \text{ Niv} + 2.121 \text{ Sv} - 6.987(H/L) \quad [\text{Eq 14}]$$

Les signes montrent qu'une augmentation de hauteur (et de même du nombre de niveaux) entraîne une diminution du dommage. Par contre une augmentation de la surface de vide contribue à l'augmenter.

1.5.3. Comportement mécanique des maisons du groupe 4 en zone concave

De même que précédemment, quand l'ouvrage est placé en zone concave, les résultats diffèrent, notamment en ce qui concerne la distribution des contraintes et l'ouverture de joints. On peut l'observer ici encore sur l'exemple de la maison du groupe 4 donné sur la Figure 70. Les fissures diagonales apparaissant en milieu de structure et entre les ouvertures du rez de chaussée et du premier niveau sont orientées diagonalement du centre vers les bords inférieurs de la structure et la structure est exposée à des compressions dans la partie supérieure sous l'effet d'une courbure du sol vers le haut.

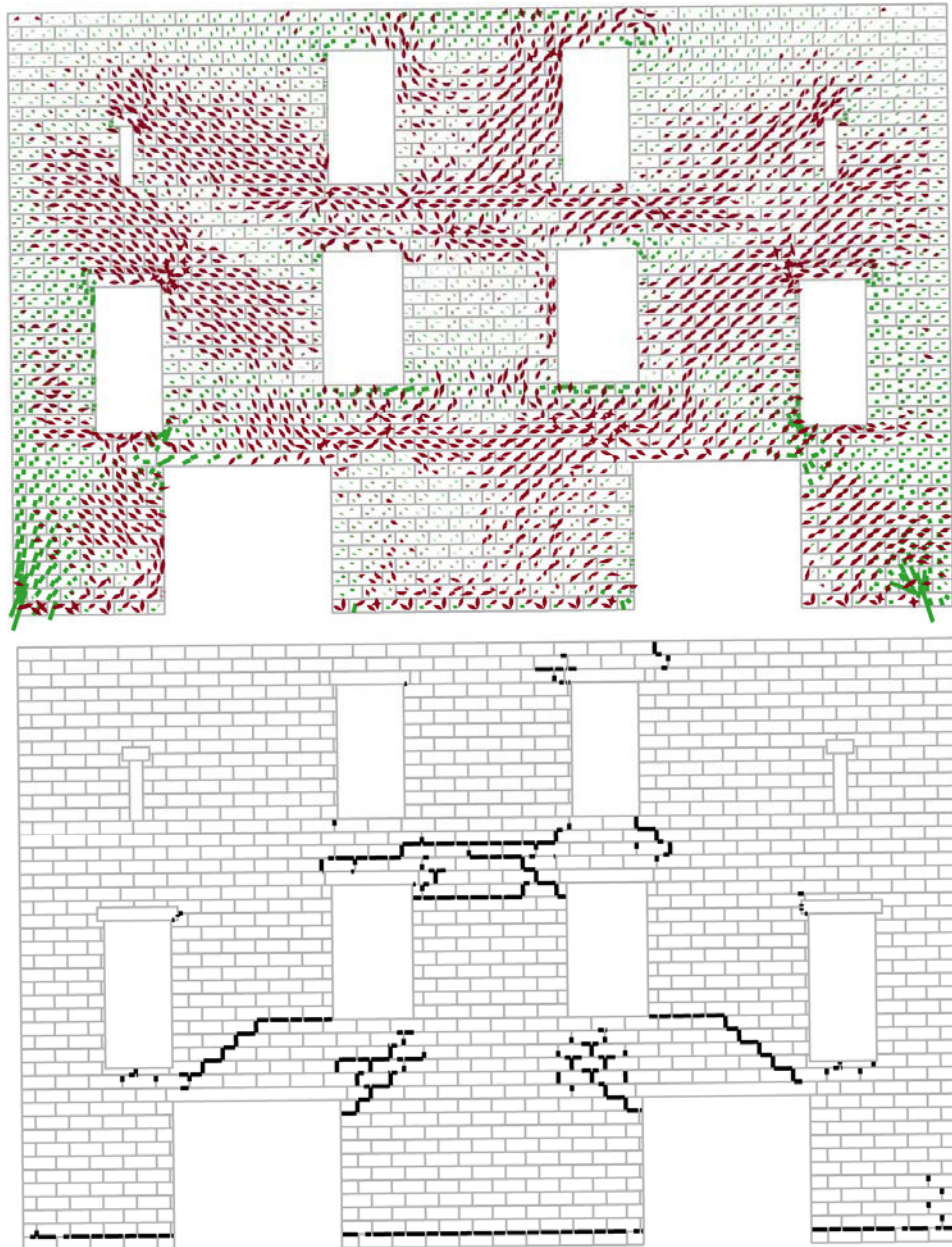


Figure 70. En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en claire). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison placée en zone convexe

1.5.4. Régression sur les composantes principales du groupe 4 (ouvrages en zone concave)

Comme précédemment, on conduit une analyse en composantes principales puis une régression linéaire sur ces composantes qui conduisent aux coefficients de régression du Tableau 53.

Tableau 53. Coefficients estimés de régression orthogonale avec n=36 individus (zone concave, groupe 4)

Coefficient	Composantes principales retenues		
	F1	F2	F3
j	0.292	-0.241	0.024

Un changement de variable permet de revenir aux variables initiales et donne la régression indiquée dans le Tableau 54. On observe ainsi que les variables Haut et Sv/St ne sont pas significatives.

Tableau 54. Estimation des coefficients de la régression sur les variables de contrôle obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (groupe 4, zone concave)

F1. F2. F3	Long	Haut	NOD	Niv	St	Sv	(Sv/St)	H/L
bi	0.167	-0.063	0.092	-0.088	0.101	0.175	0.149	-0.180
Si	0.0567	0.0481	0.0365	0.0440	0.0463	0.0523	0.0936	0.0565
ti	2.955	-1.310	2.53	-2.007	2.197	3.347	1.5944	-2.951

Le retrait des variables non significatives conduit au modèle de l'équation [Eq 15] qui porte sur des variables centrées et réduites. Cette expression permet de conclure à une influence prépondérante de la variable H/L, suivie de la variable Sv, puis Long.

$$\begin{aligned} \text{Domage}^* \approx & 0.167 \text{ Long}^* + 0.092 \text{ NOD}^* - 0.088 \text{ Niv}^* + 0.101 \text{ St}^* \\ & + 0.175 \text{ Sv}^* - 0.18 (\text{H} / \text{L})^* \end{aligned} \quad [\text{Eq 15}]$$

Le redressement vers les variables initiales brutes donne, de même que précédemment, le modèle de l'équation [Eq 16].

$$\begin{aligned} \text{Domage} = & 0.00657 + 1.053 \cdot 10^{-3} \text{ Long} + 4.763 \cdot 10^{-4} \text{ NOD} - 2.41 \text{ Niv} \\ & + 5.287 \text{ St} + 4.034 \text{ Sv} - 1.053 \text{ H} / \text{L} \end{aligned} \quad [\text{Eq 16}]$$

Il en résulte par l'analyse des signes qu'une augmentation de longueur (Long) de surface totale (St) du nombre d'ouvertures (NOD) et de la surface totale de ces ouvertures (Sv) entraîne une augmentation du dommage tandis qu'une augmentation du nombre de niveaux ou de la hauteur entraîne une réduction du dommage des maisons du groupe 4 quand elles sont placées en zone concave.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

A travers l'exemple simple d'un mur en maçonnerie soumis à la sollicitation imposée par un affaissement minier, nous avons élaboré tout d'abord une méthodologie d'analyse permettant la caractérisation de l'influence de certains paramètres mécaniques (résistance à la traction et cohésion des joints en particulier) sur l'endommagement de ce type de structure. Pour cela, nous avons exploité la technique des plans d'expérience mise en œuvre sur des expériences numériques (modèles) réalisées avec la méthode des éléments distincts. Ces modèles nous ont permis, pour différents jeux de valeurs des paramètres étudiés, de calculer la longueur cumulée des joints ouverts, variable globale choisie pour caractériser l'endommagement. L'analyse de la variance des résultats ainsi obtenus nous a permis d'identifier, parmi les deux paramètres retenus, l'influence prépondérante, sur l'endommagement, de la résistance à la traction des joints. De même, nous avons testé la robustesse des résultats en déterminant des modèles de régression par simulation de Monte Carlo. Cette méthodologie d'analyse a été mise en œuvre sur un modèle d'affaissement classique paramétré avec les données du site de Joeuf. Deux positions particulières dans ce modèle ont fait l'objet de nos calculs. Il s'agit des positions, en zone convexe et zone concave, où la courbure du terrain est maximale. Ainsi, nous avons placé virtuellement le mur étudié dans ces positions de sollicitation maximale.

Dans un deuxième temps nous avons repris cette méthodologie d'analyse pour étudier la vulnérabilité des maisons de la ville de Joeuf. Compte tenu des données disponibles qui résultaient d'une enquête de terrain antérieure, nous avons limité l'analyse à des variables géométriques descriptives de chaque ouvrage étudié, prenant ainsi en considération la variabilité des dimensions des maisons et la présence des ouvertures (portes et fenêtres). Les paramètres mécaniques retenus, communs à tous les modèles ensuite réalisés ayant été fixé au départ à partir de l'analyse du mur simple.

Préalablement à ce travail, il a fallu distinguer différents types de maisons. Ce que nous avons fait au moyen d'une typologie déterminée par classification hiérarchique. C'est ainsi que nous avons constitué 4 groupes ou 4 types de maisons et conduit l'analyse de chaque groupe, pour chacune des deux positions de sollicitations maximales.

Compte tenu par ailleurs de la taille des groupes, les expériences numériques réalisées ont porté, non pas sur l'ensemble des individus (ce qui nous aurait amené à réaliser 2×705 soit 1410 calculs avec le logiciel Udec), mais sur des échantillons représentatifs, choisis aléatoirement dans chacun des groupes. A chaque fois, nous avons décrit les caractéristiques générales des groupes au moyen de statistiques élémentaires ainsi que par une analyse en composantes principales, sur le groupe tout entier puis sur l'échantillon choisi.

Constatant la forte colinéarité entre les variables géométriques servant à l'analyse et l'impossibilité consécutive de fournir un modèle de régression reliant l'endommagement à la valeur de ces variables, nous avons dû décorrélérer les variables par déterminant les composantes principales puis en recherchant un modèle de régression sur ces composantes. Cette méthode porte le nom de régression orthogonale. Puis, revenant aux variables initiales et éliminant les variables non significatives, nous avons pu proposer un modèle d'endommagement (ou de vulnérabilité) pour chaque type identifié et pour chacune des positions étudiée, soit 8 modèles proposés.

Dans tous nos calculs, l'interaction sol-structure n'a pas été prise en compte aussi faut-il en limiter la portée. Néanmoins, l'analyse du comportement mécanique des modèles réalisés nous a permis de retrouver quelques grandes caractéristiques, observées sur le terrain sur des ouvrages en maçonnerie exposés à des affaissements miniers, tant pour ceux situés en zone convexe qu'en zone concave. En zone convexe, nous avons en effet constaté l'apparition

d'efforts de traction horizontale, en particulier dans la partie supérieure des modèles, entraînant l'ouverture des joints verticaux. Tandis qu'en zone concave, l'ouvrage voit naître des fissures (ouvertures de joints) engendrées par des efforts de cisaillement. Nous avons également relevé le rôle majeur joué par les ouvertures (portes ou fenêtres) d'où naissent et meurent les fissures, comme cela est souvent constaté en pratique.

Il résulte de nos analyses que tous les groupes présentent un endommagement plus important quand ils sont sollicités en zone concave (dommage D2 dans nos tableaux) que quand ils sont placés en zone convexe. Cela peut s'expliquer par la faible résistance des ouvrages en maçonnerie aux efforts de traction qui dominent en zone concave.

Par ailleurs, tant en zone concave qu'en zone convexe, c'est le groupe 2 qui présente les plus forts endommagements. Ce groupe est le groupe des maisons les plus longues. Ce résultat confirme donc l'influence prépondérante accordée généralement à la longueur des ouvrages, pour estimer les dommages d'un affaissement minier comme indiqué dans les abaques du NBC par exemple. Viennent ensuite, dans l'ordre des dommages décroissants, le groupe 1, le groupe 3 et le groupe 4. Le groupe 4, celui des maisons les moins vulnérables, est le groupe des maisons relativement petites (avec celles du groupe 3), mais relativement hautes par rapport aux autres, ce qui leur procure un élancement proche de 1.

Concernant le bassin ferrifère lorrain où les habitations présentent des caractéristiques proches, les résultats obtenus pour la ville de Joeuf sont aisément transposables à d'autres localités. Il suffit donc d'une enquête de terrain visant à déterminer l'appartenance de chaque habitation à l'un des groupes identifiés pour utiliser l'un des deux modèles proposés pour ce groupe et déterminer la vulnérabilité correspondante à une sollicitation en zone convexe ou en zone concave. Pour d'autres contextes, on peut reprendre la méthodologie proposée sur un échantillon représentatif des maisons.

Néanmoins, nous gardons bien à l'esprit qu'en se limitant à des variables géométriques, nous avons restreint l'analyse de la vulnérabilité. En effet, la vulnérabilité des maisons en maçonnerie dépend de bien d'autres paramètres comme l'état général de la structure, la nature des fondations, la nature des liaisons entre murs et planchers. Par ailleurs le caractère tridimensionnel des maisons a une importance considérable. Il y a donc bien d'autres pistes de recherche qui pourraient être explorées pour enrichir nos travaux, notamment en ce qui concerne la recherche d'autres paramètres aisément accessibles pouvant être pris en compte ou encore sur des méthodes d'acquisition rapide, systématique et plus ou moins automatisée de ces paramètres à partir de différentes sources accessibles (images satellites, photographies, cadastre, etc.).

C'est pourquoi, au-delà des résultats pratiques que nous avons obtenus pour la ville de Joeuf, ce qui constitue pour nous le principal résultat de cette recherche est l'élaboration d'une méthodologie d'analyse suivant les étapes suivantes : relevés de terrain, analyse typologique, plans d'expériences numériques sur échantillons représentatifs, puis analyse des variances et régressions orthogonales. Cette méthodologie constitue un cadre scientifique, rigoureux et systématique qui peut être déployé dans d'autres contextes.

Un autre point d'importance qui doit être souligné est le fait que nous avons élaboré des modèles d'endommagement uniquement à partir de calculs réalisés pour deux positions particulières (les plus défavorables du point de vue de la courbure) dans une cuvette d'affaissement. Cela signifie que nous avons virtuellement placé toutes les maisons à deux endroits particuliers d'une cuvette. Cette approche maximise l'estimation des dommages. Il

serait relativement facile de corriger ces estimations par la position réelle des ouvrages par rapport à ces deux positions. Par exemple, nous pourrions corriger l'estimation obtenue par la distance réelle qui sépare la vraie position de la maison des deux positions étudiées. Dans une première approche, cette correction pourrait être proportionnelle à cette distance.

De même, nous avons travaillé avec un unique modèle de cuvette. Là encore, sans refaire toute l'analyse avec un nouveau modèle d'affaissement, les résultats obtenus pourraient être corrigés, pour tenir compte d'autres amplitudes de mouvement de terrain attendues.

Ces enrichissements pourraient ainsi alimenter le fonctionnement d'un simulateur de dommages qui fait actuellement l'objet de plusieurs travaux de recherche au Laego (Figure 71). Ce simulateur permet en effet de modéliser une ou plusieurs cuvettes d'affaissement et vise à estimer les dommages sur des habitations localisées précisément. On dispose des données du cadastre et d'informations sur chaque unité d'habitations. Dès lors, nous pourrions y intégrer les modèles d'endommagement que nous avons élaborés, corrigés des positions réelles comme nous venons de l'évoquer, et les utiliser pour fournir une estimation des dommages prévisibles sur la zone pour un scénario d'affaissement donné. La simulation de plusieurs scénarios de cuvettes (car la prédiction des cuvettes reste un challenge à relever dans de nombreux cas) permettrait également de donner des résultats en termes de probabilité d'atteinte d'un certain niveau de dommage reliée à la probabilité d'occurrence des scénarios envisagés. Ceci constitue une perspective de notre travail dont nous espérons qu'elle sera envisagée.

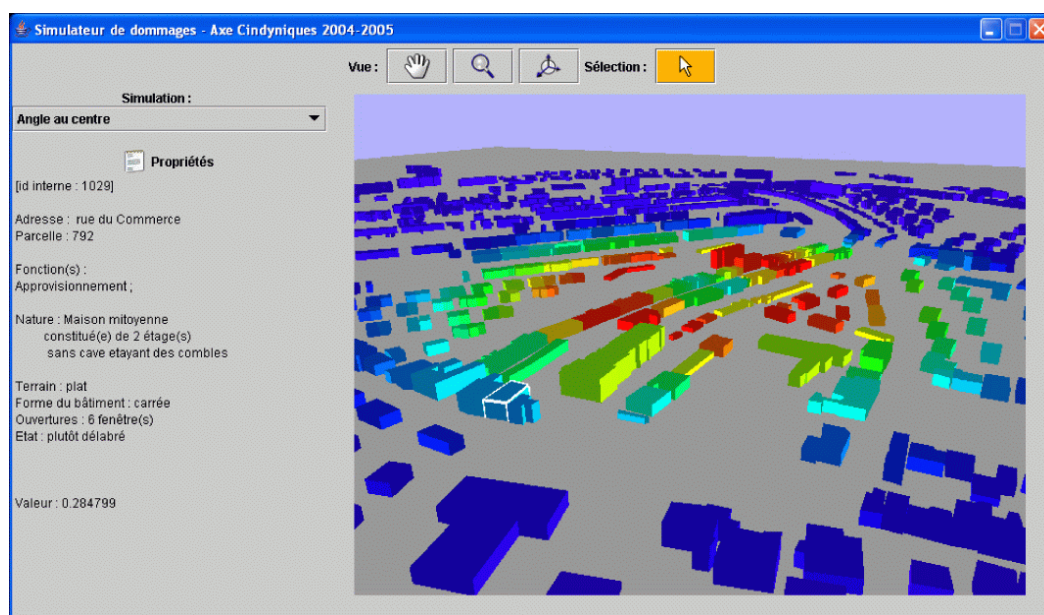


Figure 71. Simulateur de dommages dans son état actuel, en cours d'élaboration au Laego

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abbass- Fayad. A. (2004). *Etude de stabilité de fontis au toit des carrières souterraines et traitements apportés aux conséquences en surface*. Thèse de Doctorat de l'institut National polytechnique de Lorraine.

AFPS (2002) : *Conception parasismique des bâtiments*. ISBN 2-911709-13-6, Paris.

Aftes (1998). *Dossier pilote des tunnels génie civil*. Centre d'étude des tunnels, paris.

Aissaoui K. (1999). *Amélioration de la prévision des affaissements dans les mines à l'aide des approches empiriques, numériques et analytiques*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.

Akossou A. Y. J., Palm. R. (2005). *Conséquences de la sélection de variables sur l'interprétation des résultats en régression linéaire multiple*. Biotechnol. Argon. Soc. Environ. Vol. 9, N° 1, pp.11-18.

Al- Heib. M. (2003). *Effets et conséquences des mouvements du sous- sol sur le bâti, Modélisation des conséquences des mouvements de terrains sur les structures*. Rapport Ineris-EAT- DRS-02.

Asch M., Ninèze L. A. (2003). *Le Risque*. EDP- Sciences. ISBN: 2-86883-634-8

Atkinson J. H., Brown E. T., Potts D. M. (1977). *Ground movements near shallow model tunnels in sand*, In: *Large Movements and Structures/* edited by James D Geddes, London: Pentech, pp. 372-385.

Atkinson J. H., Potts D. M. (1977). *Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil*. Geotechnique, Vol 27 N. 2, pp. 203-215.

Atkinson J. H., Potts D. M. (1977). *Subsidence above shallow tunnels in soft ground*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol ASCE GT4, pp. 307-325.

Berry D. S. (1977). *Progress in the analysis of ground movements due to mining*. Conf. "large ground movement's ans structures", Cardiff, pp. 781-811.

Bhattacharya S. et Singh M.M. (1984).-*Proposed criteria for subsidence damage to buildings*. *Rock mechanics in productivity and protection*, 25st Symposium on rock mechanics, pp.747-755.

Bjerrum. L. (1963). *Allowwable settlement of structures*. In Proc. European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, Germany, vIII, PP. 135- 137.

Boones S. J. (1996). *Ground Movement Related Building Damage*, J. Of Geotech. Eng., ASCE, 122 (11), pp. 886-896.

Boones S. J. (2001). *Assessing construction and settlement-induced building damage: a return to fundamental principles*. Proceedings, Underground, Construction, Institution of Mining and Metalurgy, London, pp. 559-570.

Borcard D. (2001-2007). *Régression multiple - corrélation multiple et partielle*. Bio-2042, Département de sciences biologiques, université de Montréal, 17 pages.

- Boscardin M.D. and Cording E. J. (1989). *Bulding Response to Excavation-Induced Settlement*. Journal of Geomechanical Engineering Vol. 115 No.
- Bouroche J. M., Saporta G. (1980). *L'analyse des données*. Presses Universitaires de France, boulevard Saint-Germain, ISBN 213 038298 3, Paris.
- Burland J. B., Wroth C. P. (1974). *Settlement of buildings and associated damage*. Conf. settlement of structures, pp. 611-654.
- Burland. J. B. (1977). *Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation*. Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed.) 1997 Balkema, Rotterdam.
- Chapeau C. (1993). *Calcul des tassements associés au creusement d'un tunnel ou d'une galerie*, Bron : Cetu, document interne, pp. 33.
- Commissariat Général du Plan (1997). *La prévention des risques naturels*. Rapport d'évaluation. Comité interministériel de l'évaluation des politiques publiques. Paris : la documentation française. 702 p.
- Confais J., Le Guen M. (2006). *Premiers pas en Régression linéaire avec SAS*. SAS/INSIGHT sont les marques déposées de SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. Revue MODULAD.
- Cox D. W. (1980). *Modeling stochastic behaviour using the friction table with examples of cracked brickwork and subsidence*. Proc. of the 2nd international conference on ground movements and structures, Cardiff, Edité par Geddes J. D., Pentech press, pp. 307-328.
- DDE (Direction départementale de l'équipement de Moselle, Service, Aménagement, Habitat), (2005). *Plans de prévention des risques miniers*.
- Deck. O. (2002). *Etude des conséquences des affaissements miniers sur le bâti (Propositions pour une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité du bâti)*.Thèse de Doctorat de l'institut National polytechnique de Lorraine.
- Deck. O., Harlaka A. (2007). *Evaluation des sollicitations induites par des affaissements miniers sur les ouvrages*. Congrès Français de Mécanique, Grenoble.
- Foucart T. (2006), « *Colinéarité et Régression linéaire*, Mathématiques et Sciences humains » 44ème année, n°173, pp. 5-25.
- Fougeron J. (2007). *Effondrement et affaissement des mines de fer de Lorraine : Rôle de la couverture et de la morphologie*. Thèse de doctorat de l'INPL, Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages, Ecole des Mines de Nancy.
- Franzius N. J., Potts D. M., Burland B. J. (2006). *The response of surface structures to tunnel construction*; Proceedings of the institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering 159 January (2006) Issue GEI, pp. 3-17.
- G.T.P.B.M.I (2003) : *Guide Technique Parasismique Belge pour Maisons Individuelles*.
- Geddes. J.D. (1984). *Structural design and ground movements. Ground movement and their effects on structures*, Surrey University Press, édité par Attewell et Taylor.

Grant. R, Christian. J. T and Vanmarke. E. H. (1974). *Differential settlement of buildings*. J. Geotech. Eng. Div, ASCE 100, (GT9), PP. 973- 991.

Hart R. (1990). *2-D and 3-D distinct elements analysis with Udec and 3dec – Advanced Concepts*. Séminaire sur la modélisation des massifs rocheux fracturés en blocs. Laego – Ecole des Mines de Nancy. 26-30 mars 1990.

Hoerl A. E., Kennard R. W., (1970), « *Ridge Regression: (1) biased estimation for nonorthogonal problems; (2) applications to nonorthogonal problems* », Technometrics, 12, pp. 55-67; pp. 68-82.

Ineris (1998). *Conséquences prévisibles d'affaissement sur le tissu bâti des communes de Homécourt et Joeuf*. Réponse à l'arrêté préfectoral n°96-MI-005 du 12 août 1997, Rapport DNO-SKo.CG/CS-98-26MA46/R02.

Ineris (2005). Kazmierczak J. B, Al heib M. *Recommandations pour l'évaluation et le traitement des conséquences des mouvements du sous - sol sur le bâti*. Rapport (Ineris) - EAT- DRS-02.

Itasca (1992). Consulting Group, Inc. Udec v.1.8. Minneapolis, MN: Itasca Consulting Group

Janssen H. J. M. (1997). *Structural Masonry, Numerical studies with UDEC*. Centre for civil engineering research and codes. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, ISBN 90 5410680 8, pp. 96- 106.

Kwiatk J. (1998).- *Protection des constructions sur les terrains miniers (traduction du polonais : "Ochrona obiektow budowlanych na terenach gorniczych")*. Publication du G.I.G., Katowice."

Leone F., Asté J. P., Leroi E. (1996). *L'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain : pour une quantification du risque*. Revue de Géographie Alpine.

Leroy A., Signoret J.P. (1992). *Le risque technologique*. Que sais-je n°2669. Presses Universitaires de France.

Magnan J. P. (1997). "*Géotechnique 1ère année*", tome 2, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.

Manche Y. (1997). *Propositions pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels prévisibles*. Revue de Géographie Alpine.

Manche Y. (2000). *Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels*, thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier- Grenoble 1.

Mair R. J., Taylor R. N., Bracegirdle A. (1993). *Subsurface settlement profiles above tunnels in clays*, geotechnique, Vol 43, N° 2, pp. 315-320.

Martin F. (2004). *Les exploitations minières angevines : Approche géotechnique de l'après-mine Aléas liés aux cavités souterraines*. Séminaire patrimoine technique minier angevin.

MATE (1999). Plans de prévention des risques naturels (PPR) – Risques de mouvements de terrains - Guide méthodologique. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement - Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement. Paris : La Documentation Française.

MATE (Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Ministère de l'équipement, des transports et du logement) (1997). *Plans de prévention des risques naturels (PPR), Risques de mouvements de terrain*. Guide méthodologique. La documentation française.

MISE (1999). *Mission d'inspection relative à l'autorisation de construire dans un secteur protégé en zone de montagne. Rapport de la mission spécialisée d'inspection environnement (MISE)*, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Sous-direction de la prévention des Risques Majeurs. pp. 31.

Nations Unies (1992). *Département des affaires humanitaires*. Glossaire international multilingue agréé de termes relatifs à la gestion des catastrophes. 81 pages.

NCB (National Coal Board) (1975).- *Subsidence engineer's handbook*.

Oteo C. S., Sagasetta C. (1982). *Prediction of settlements due to underground openings*, Int. Symp. On numerical models in geomechanics, Zurich, pp. 653-659.

P.L.U (2005) : *Plan Local d'Urbanisme*, Commune de Joeuf, rapport de présentation (2a).

Page A.W. (2001). *The serviceability design of low- size masonry structures*. University of Newcastle, New South Wales, Australia. Prog. Struct. Engng Mater, 3, PP. 257- 267.

Panet M. (1969). *Contribution à l'étude des affaissements superficiels provoqués par creusement de galeries souterraines*, Paris : LCPC, pp. 24.

Piguet J. P. (1983). *La modélisation en mécanique des terrains et son application à l'exploitation minière*. Thèse de doctorat de l'INPL, Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages, Ecole des Mines de Nancy.

Piguet. J. P et al. (2004). *Manuel de mécanique des roches*. Tome.2 : les applications. Ecoles des mines de Paris, pp. 319-337 et 341- 373.

Potts D. M., Addenbrooke T. I. (1997). *A structure's influence on tunnelling-induced ground movements*. Proc. Insin Civ. Engrs Geotech. Engng, 125, pp. 109-125.

Poupelloz B. (1984). *Tassements engendrés par le creusement des galeries de petite section à faible profondeur*, exemple en région parisienne, Paris : Rapport du laboratoire régional de l'est parisien, pp. 78.

Prim.net (2002). *Définition générale du risque majeur*. http://www.prim.net/citoyen/definition_risque_majeur/definition.html.

Resendiz D., Romo M. P. (1979). *Settlement upon soft-ground tunneling : theoretical solution*, 6th Panamerican conf. On soils mechanics and foundation engineering, Lima, pp. 312-320.

Saeidi A, Deck O, Verdel T. (2008). *Development of a simulator of damage for evaluation of the vulnerability of buildings in subsidence zones. case study: Joeuf city*. Post Mining conference, Nancy, France.

Sagaseta C., Moya J. F. (1980). *Estimation of ground subsidence over urban tunnels*, 2nd int. conf. "ground movements and structure", Cardiff, pp. 331-345.

Schlosser F. (1989). *Le projet national clouterre*, Annales de l'ITBTP, n° 473, pp. 150.

Singh, B. (1973) "Continuum Characterization of Jointed Rock Masses: Part I. The Constitutive Equations," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., (10), pp. 311-335.

Skempton. A. W et MacDonald. D. H (1956). *Allowable settlement of buildings*. Proc. Inst. Civ. Engs 5, PP. 727- 768.

Soukatchoff. M. V. (2007). « *Cours géotechnique, 2ème année, 1er semestre* », Ecole de Mines de Nancy, <http://www.mines.u-nancy.fr/>.

Thepot O. (2004). *Prise en compte des caractéristiques en petites déformations des sols dans l'étude du comportement des collecteurs enterrés*. Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 267 pages.

Timoshenko S. (1953). *Résistance des Matériaux*, 1ème partie : Théorie Elémentaire & Problème. Paris et Liège, Librairie Polytechnique Ch. Béranger, Paris.

Tomassone R., Lesquoy E., Millier C. (1983), « *La régression, nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique* », Masson, Paris.

Tomassone R., Andrain S., Lesquoy E., Millier C. (1992). « *La Régression Nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique* », INRA-Masson, 2ème édition.

Tenenhaus M. (1998). *La régression PLS : Théorie et pratique*, Editions Technip.

Tibshirani R. (1996). « *Régression shrinkage and selection via the lasso* », Royal J. Statist. Soc B., Vol. 58, No. 1, pages 267-288.

Verdel T. (2006). *Décision et Prévision Statistiques*, Polycopié de cours à l'Ecole des Mines de Nancy. Téléchargeable sur www.thierry-verdel.com.

Verdel T. (2007). *Risques et incertitudes en géomécanique*. Mémoire d'Habilitation à diriger des recherches, Nancy Université, INPL, Laego, Ecole des Mines de Nancy, Janvier 2007.

Verdel T., Abdallah M. (2005). *Etude de comportement de mur en maçonnerie sous l'effet d'un mouvement de terrain induit par un affaissement minier*. Rapport, (Laego, Total), 39 p.

Vuillod E. (1995). *Modélisation Thermo-Hydro-Mécanique de massifs rocheux fracturés*. Thèse de doctorat de l'INPL, Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages, Ecole des Mines de Nancy.

Wagner H., Schumann E.H.R. (1991). *Surface effects of total coal-seam extraction by underground mining methods*. J.S. Afr. Inst. Min. Metall., Vol. 91, No. 7, pp. 221-231.

Whittaker B.N. & Reddish D.J.(1989). *Subsidence : Occurrence, Prediction, Control*. Editions Elsevier.

Wood, L.A. and Larnach, W.J. (1975). *The Interactive Behavior of a Soil-Structure System and its Effect on Settlements*. Proceedings of the Technical Session of a Symposium held at University of New South Wales, Australia, pp.75-88.

YU Z. et al (1988). *Development of damage criteria for buildings affected by mining subsidence. 6th annual workshop generic mineral technology center mine system design and ground control* (Juillet1988), pp. 83-92.

Zacek M. (1996). *Construire Parasismique*. Marseille, Editions Parenthèses. ISBN 2-86364-2.

Zihri G. (2004). *Risques liés aux ouvrages souterrains : Constitution d'une échelle de dommages*. Inpl, Thèse de Doctorat de l'institut National polytechnique de Lorraine.

LISTE DE FIGURES

Figure 1.	Exemples de désordres miniers à Auboué en 1996.....	27
Figure 2.	Illustration d'un affaissement progressif sous une zone agricole suite à une exploitation minière (source : Ineris)	27
Figure 3.	Exemple d'un affaissement brutal (source : Ineris).....	28
Figure 4.	Exemple d'effondrement localisé (fontis) en zone pavillonnaire (source : BRGM)	28
Figure 5.	Caractéristiques du mouvement des terrains associés à un affaissement minier (à gauche) et endommagement structurel d'une maison à la ville d'Auboué en 1996 (Deck, 2007)	29
Figure 6.	Comportement des mouvements du terrain associé aux dommages structurels (Geddes 1984)	30
Figure 7.	Distribution des efforts dans la structure sous l'influence de la pente (Ineris, 2003)	30
Figure 8.	Comportements types d'une maison en maçonnerie exposée à une courbure du terrain de fondation (Page, 2001)	31
Figure 9.	Modes de rupture d'une structure en zone concave (en aval de l'affaissement) (Burland, 1977)	31
Figure 10.	Sens des déformations principales imposées à une structure selon sa position dans une cuvette d'affaissement.....	32
Figure 11.	Exemples de ruptures dans les ouvrages en maçonnerie exposés à un affaissement minier (source : Ineris 2005).....	33
Figure 12.	Principe conceptuel d'évaluation de la vulnérabilité (Leone, 1996).....	35
Figure 13.	Dommages directs aux habitations de la rue de Metz à Auboué après l'affaissement minier de 1996 (Source : Gisos).....	35
Figure 14.	Effondrement brutal à la Pouëze en 1990, qui met fin à l'exploitation minière (Source : W. Zumbo, LRPC Angers)	36
Figure 15.	Prévision de dommages selon NCB (1975)	37
Figure 16.	Prévision de dommages selon Wagner et Schümann (1991)	37
Figure 17.	Prévision de dommages selon Boscardin et Cording (1989)	38
Figure 18.	Interaction entre la déflection relative et la déformation horizontale dans la structure d'après Burland (catégories de dommages de Négligeable (0) à Très Sévères (5)) ;	

pour les bâtiments situés en zone convexe et pour les valeurs suivantes : $L/H=1$, $E/G=2.6$ et $v=0.3$ 38

Figure 19. Analyse de comportement d'un ouvrage simple : point de vue de la structure (portique) et point de vue du sol..... 40

Figure 20. Modèle d'interaction entre une fondation filante et une cavité souterrain circulaire en plusieurs positions (Wood et Larnach, 1975)..... 41

Figure 21. Forme d'une cuvette d'affaissement de surface (Schlosser, 1989)..... 41

Figure 22. Exemple de fiche individuelle d'une maison recueillie 45

Figure 23. Localisation de la ville de Joeuf en France et en Lorraine..... 46

Figure 24. Types de maisons à Joeuf (INSEE 2004)..... 47

Figure 25. Dégâts sur les murs jointifs en raison de la variation de la hauteur (Zacek 1996) 47

Figure 26. Zonage des types d'instabilités et des zones à surveiller vis-à-vis de l'affaissement minier..... 48

Figure 27. Coupe de l'organisation des couches géologiques dans la région de Joeuf (P.L.U. 2005) 49

Figure 28. Exemple de maison située en terrain plat à gauche ou en pente à droite 50

Figure 29. Exemple d'une maison mitoyenne à gauche et d'un immeuble à droite..... 50

Figure 30. Influence de la forme de maison sur la résistance à la torsion (à gauche) avec possibilité concentration de contraintes dans les angles rentrants, à droite (AFPS 2002)..... 51

Figure 31. Maison d'avant 1940 à gauche, maison récente à droite..... 52

Figure 32. Principe de l'interaction entre blocs dans le code Udec (jkn : raideur normale, jks : raideur tangentielle, jtens : résistance à la traction, jcoh : cohésion, jfric : angle de frottement). 54

Figure 33. Principe du comportement élasto- plastique en cisaillement (à gauche) et de l'entrée en plasticité (à droite) des joints. L'entrée en phase plastique (qu'on peut assimiler à une rupture) s'opère quand le demi-cercle (qui relie la contrainte majeure à la contrainte mineure) rencontre la limite figurée en pointillés (critère de rupture). 55

Figure 34. Géométrie du modèle employé 55

Figure 35. Principe d'estimation de la raideur normale des joints pour obtenir la raideur choisie d'un milieu continu équivalent (JKN : raideur normale des joints, E : module des blocs individualisés, S : espacement entre les joints (espacement entre les joints horizontaux est égal à 0.2 m, Ee : module de Young du milieu continu équivalent). Dans le cas de la rigidité de cisaillement des joints, S doit être remplacé par un espacement horizontal entre les joints verticaux (ici 0.5 m) 56

Figure 36.	Méthode d'exploitation par chambres et piliers (cas lorrain, Aissaoui 1999) .	57
Figure 37.	Extrait du plan de mine situé sous la ville de Joeuf dans l'une des couches exploitées (Ineris, 1998).....	58
Figure 38.	Principe de formation d'une cuvette d'affaissement progressif (γ angle d'influence, A_m : affaissement maximal)	58
Figure 39.	Caractéristiques géométriques d'un affaissement minier pour le modèle de King et Whetton	59
Figure 40.	Cuvette utilisée dans nos calculs et localisation des deux situations étudiées (1 et 2)	59
Figure 41.	Déplacement vertical imposé à la base du mur pour chacune des deux positions étudiées	60
Figure 42.	Répartition des contraintes principales (à gauche : traction en gris et compression en noir) et indication des joints ouverts (à droite) dans le modèle pour lequel j_{tens} est égal à 0,12 MPa et j_{coh} à 0,2 MPa (mur en position 1, zone convexe).	64
Figure 43.	Surface de réponse obtenue pour le mur en position 1 (axe vertical : longueur cumulée des fissures ; premier axe horizontal : J_{tens} ; deuxième axe horizontal : J_{coh})	65
Figure 44.	Répartition des contraintes principales (à gauche : traction en gris et compression en noir) et indication des joints ouverts (à droite) dans le modèle pour lequel j_{tens} est égal à 0,12 MPa et j_{coh} à 0,2 MPa (mur en position 2, zone concave))	66
Figure 45.	Surface de réponse obtenue pour le mur en position 2 (axe vertical : longueur cumulée des fissures ; premier axe horizontal : j_{tens} ; deuxième axe horizontal : j_{coh})	67
Figure 46.	Plan d'expérience à gauche (les axes représentent les valeurs de j_{coh} et j_{tens} normalisées et les points indiquent les valeurs utilisées dans la régression) et les différents coefficients de régression obtenus, à droite, pour l'analyse de la position 1	69
Figure 47.	Histogrammes des coefficients de régression multiple (J_{tens} : β_1 , J_{coh} : β_2 , ($J_{tens} J_{coh}$) : β_{12}) obtenus par méthode de Monte Carlo.	69
Figure 48.	Plan d'expérience à gauche (les axes représentent les valeurs de j_{coh} et j_{tens} normalisées et les points indiquent les valeurs utilisées dans la régression) et les différents coefficients de régression obtenus, à droite, pour l'analyse de la position 2	70
Figure 49.	Histogrammes des coefficients de régression multiple (J_{tens} : β_1 , J_{coh} : β_2 , ($J_{tens} J_{coh}$) : β_{12}).....	70
Figure 50.	Illustration graphique des inerties de chaque axe factoriel telles que calculées par l'analyse en composante principale (en valeurs simples et en valeurs cumulées).....	80
Figure 51.	Cercles de corrélation correspondent à la projection des variables dans le plan factoriel (F1 et F2) qui intercepte environ 75.2% d'inertie totale ; dans le plan factoriel (F1 et F3) qui intercepte environ 62.93% de l'inertie totale et dans le plan (F2,F3)	82

Figure 52.	Principe de classification par l'agrégation successive des maisons de Joeuf dans un arbre (basé sur la méthode CAH).....	83
Figure 53.	Indicateur de perte d'inertie intergroupe (indice de Ward).....	83
Figure 54.	Projection des quatre groupes de maisons de la ville de Joeuf sur le premier plan factoriel (75.2% d'inertie)	84
Figure 55.	Exemple d'un modèle employé dans le groupe 1	86
Figure 56.	En haut, distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en clair). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison du groupe 1 placée en zone convexe	88
Figure 57.	Cercles de corrélation correspondent à la projection des variables de contrôle dans le plan factoriel (F1 et F2), qui interceptent environ 70.54% d'inertie totale et dans le plan factoriel (F1 et F3) qui interceptent environ 60.76% d'inertie totale.....	91
Figure 58.	En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en clair). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison du groupe 1 placée en zone concave	94
Figure 59.	Exemple d'un modèle employé dans le groupe 2	97
Figure 60.	En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en claire). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison du groupe 2 placée en zone convexe	98
Figure 61.	Cercles de corrélation correspondent à la projection des variables de contrôle dans le plan factoriel (F1 et F2), qui intercepte environ 74.62% d'inertie totale et dans le plan factoriel (F1 et F3) qui intercepte environ 67.35% d'inertie totale.....	100
Figure 62.	En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en clair). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison du groupe 2 placée en zone concave	102
Figure 63.	Exemple d'un modèle employé dans le groupe 3	105
Figure 64.	En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en clair). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison du groupe 3 placée en zone convexe	106
Figure 65.	Cercles de corrélation correspondent à la projection des variables de contrôle dans le plan factoriel (F1 et F2), qui intercepte environ 75.46% de l'inertie totale et dans le plan factoriel (F1 et F3) qui intercepte environ 57.19% de l'inertie totale.....	107
Figure 66.	En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en claire). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison placée en zone convexe	109
Figure 67.	Exemple d'un modèle employé dans le groupe 4	112

- Figure 68. En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en claire). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison placée en zone convexe 113
- Figure 69. Cercles de corrélation correspondent à la projection des variables de contrôle dans le plan factoriel (F1 et F2), qui interceptent environ 77.16% d'inertie totale et dans le plan factoriel (F1 et F3) qui interceptent environ 59.69% d'inertie totale..... 114
- Figure 70. En haut : distribution des contraintes principales (de traction en sombre, de compression en claire). En bas, localisation des ouvertures de joints (fissures) correspondantes, dans le cas d'une maison placée en zone convexe 116
- Figure 71. Simulateur de dommages dans son état actuel, en cours d'élaboration au Laego
123

LISTE DE TABLEAUX

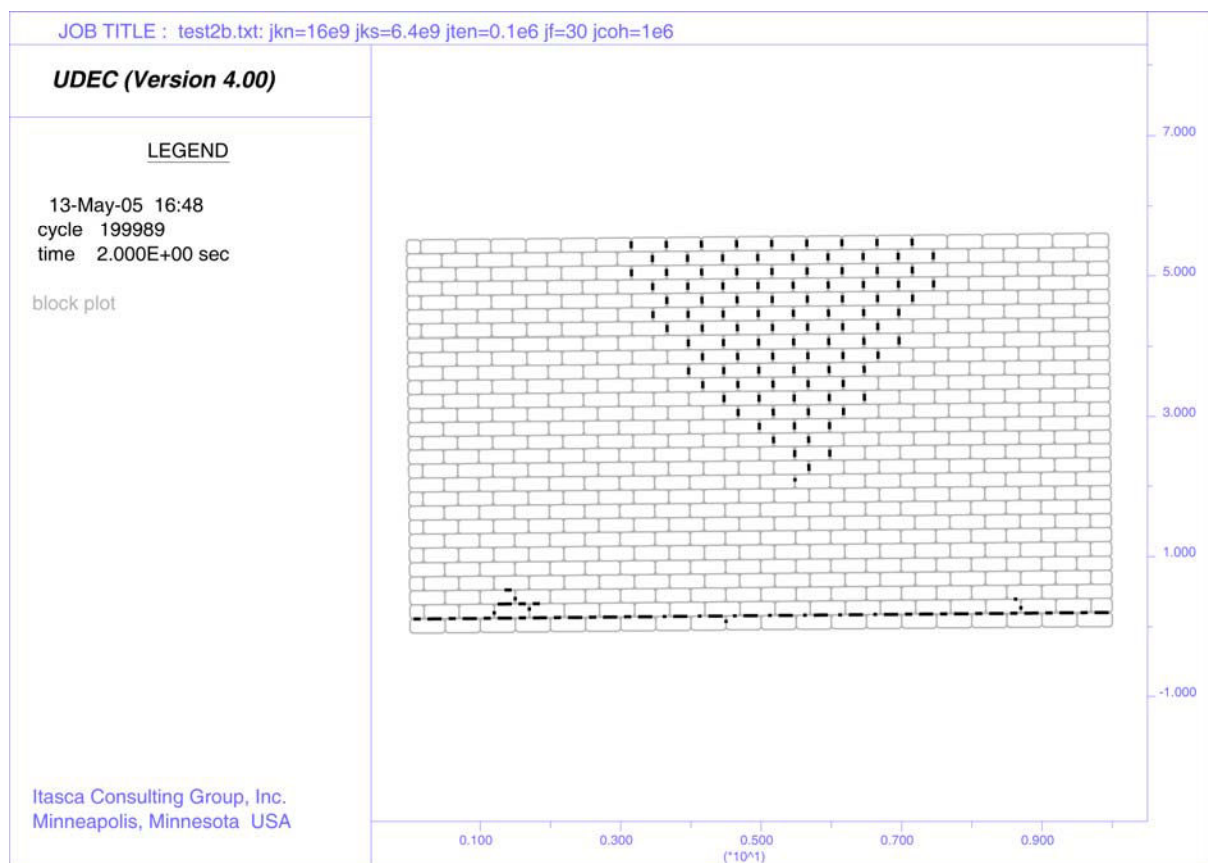
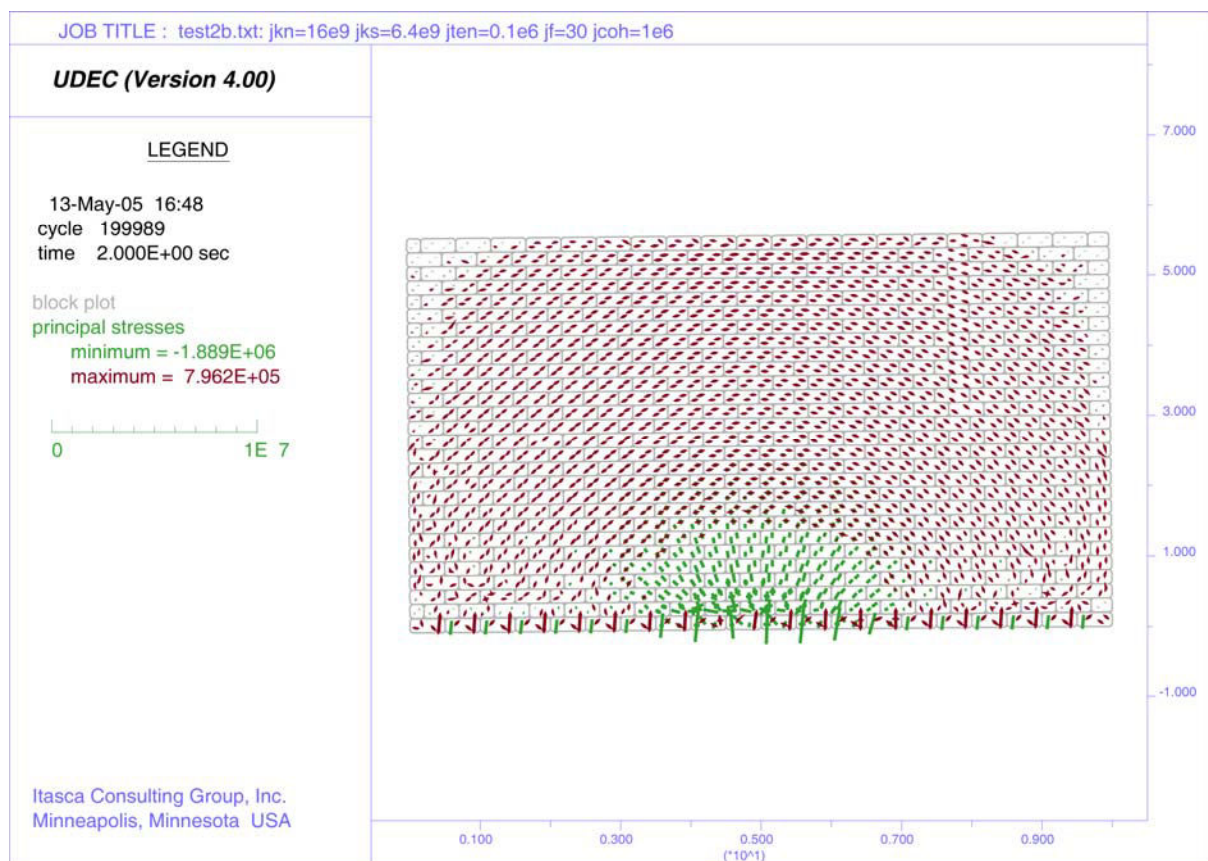
Tableau 1.	Calcul analytique de la déformation maximale de traction dans une structure assimilée à une poutre simple (Timoshenko, 1953).....	39
Tableau 2.	Forme finale de la base de données utilisées ; les maisons en ligne et les variables caractéristiques de chaque maison en colonne	49
Tableau 3.	Variable « Terrain » (deux modalités)	49
Tableau 4.	Variable « Type de maison » (trois modalités)	50
Tableau 5.	Variable « Forme des maisons » (quatre modalités)	51
Tableau 6.	Type de toiture (trois modalités)	52
Tableau 7.	Age des maisons (trois modalités)	52
Tableau 8.	Caractéristiques physiques et mécaniques de base utilisées pour la maçonnerie 56	
Tableau 9.	Tableau montrant le plan d'expérience utilisé	61
Tableau 10.	Tableau d'analyse de la variance	63
Tableau 11.	Valeurs de la longueur cumulée des joints ouverts (en m) obtenues dans chacun des calculs réalisés pour un mur en position 1 (zone convexe).	63
Tableau 12.	Tableau d'analyse de la variance pour l'expérimentation sur le mur placé en position 1 (zone convexe)	65
Tableau 13.	Valeurs de la longueur cumulée des joints ouverts (en m) obtenues dans chacun des calculs réalisés pour un mur en position 2 (zone concave).	66
Tableau 14.	Tableau d'analyse de la variance pour l'expérimentation sur le mur placé en position 2 (zone concave).....	67
Tableau 15.	Statistiques élémentaires des 705 maisons répertoriées de la ville de Joeuf....	80
Tableau 16.	Tableau des corrélations (valeurs de R). Les valeurs supérieures à 0.7 sont mise en valeur.....	82
Tableau 17.	Statistiques élémentaires de 350 maisons distinctes du groupe 1	85
Tableau 18.	Statistiques élémentaires des 68 maisons choisies représentatives du groupe 1 85	
Tableau 19.	Paramètres de la maçonnerie employés dans les calculs.....	86
Tableau 20.	Présentation des variables caractéristiques de groupe 1.....	87

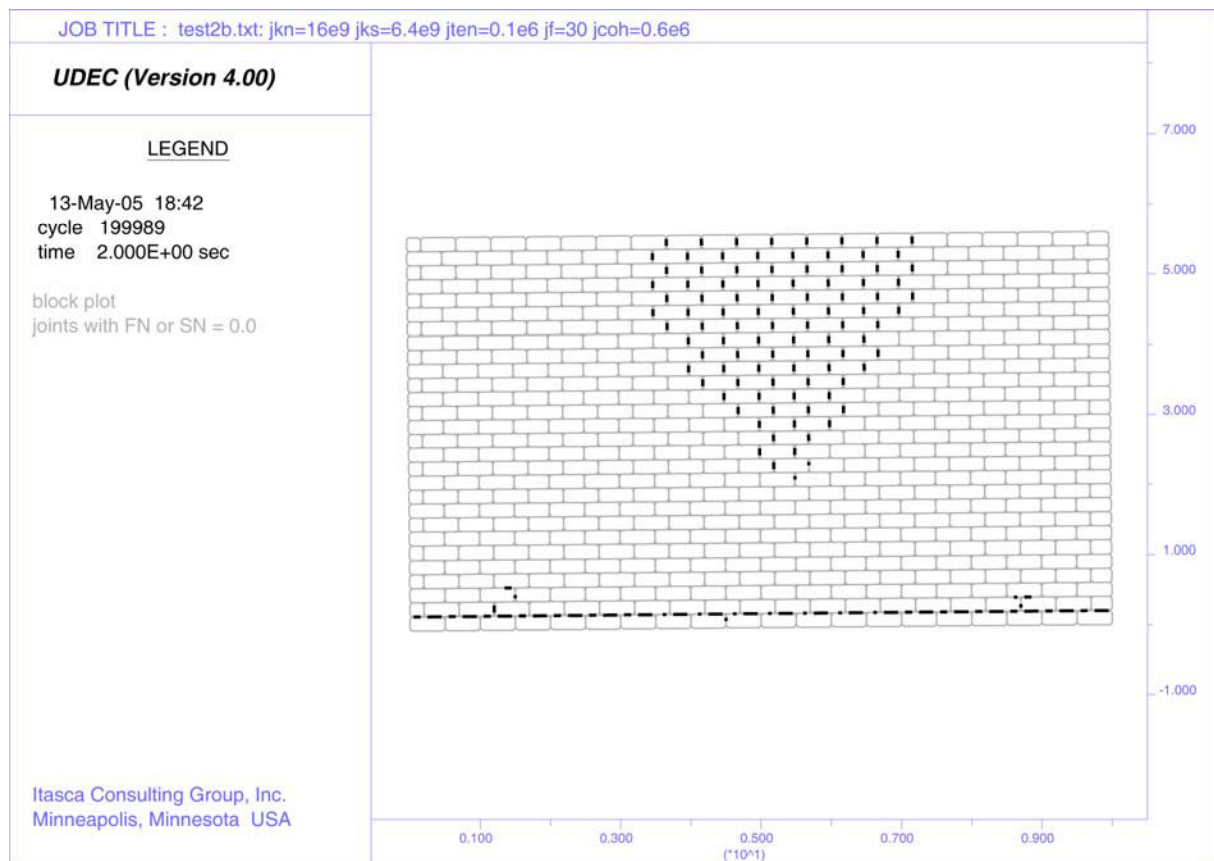
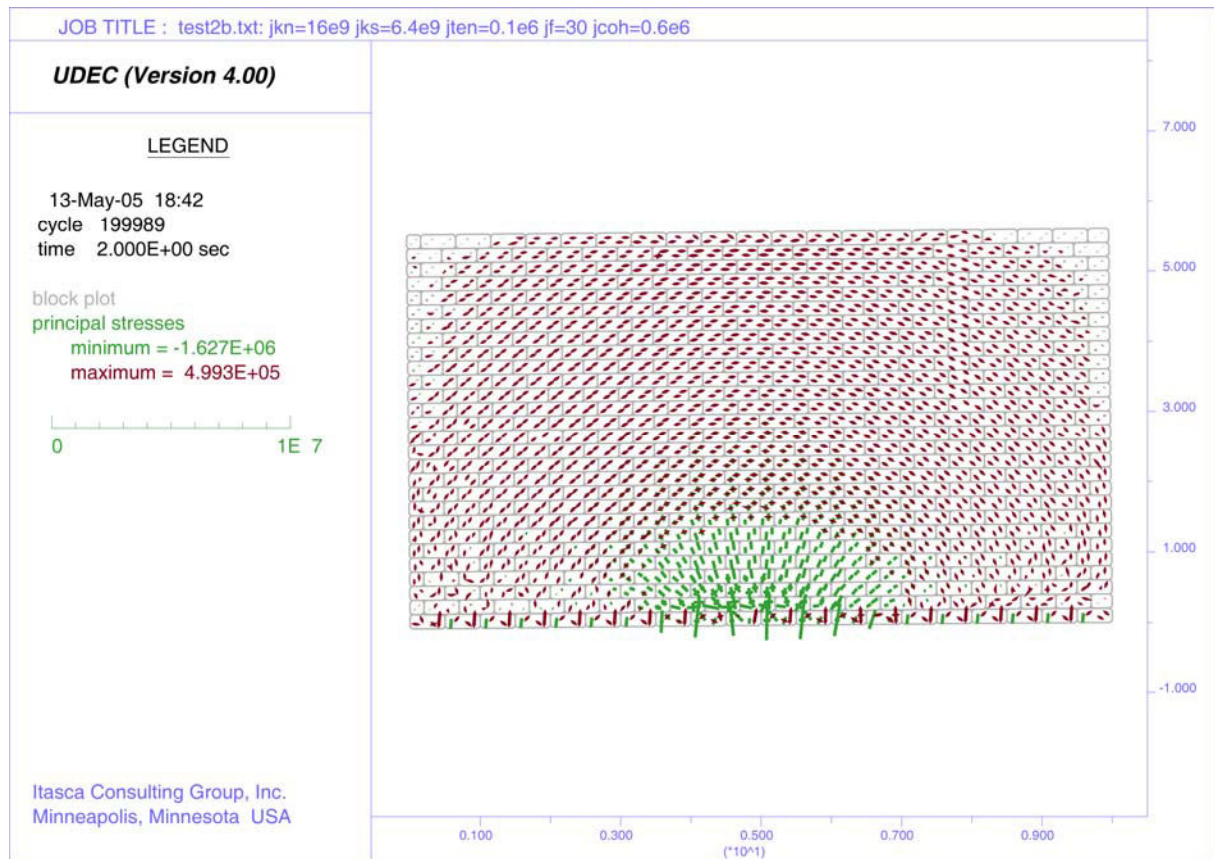
Tableau 21. Estimation des coefficients de la régression linéaire multiple sur les variables de contrôle (68 calculs, $R^2 = 0.68$, zone convexe). *j est l'estimation du coefficient de régression, S_j , l'écart-type de cette estimation, t_j la valeur de Student correspondante et Pro sa probabilité symétrique correspondante (à l'extérieur de l'intervalle $[-t_j, t_j]$). VIF est le coefficient d'inflation de variance (voir explication dans le texte).....	89
Tableau 22. Estimation des coefficients de régression à partir des seules variables significatives présentant une valeur test supérieure à 2 en valeur absolue (68 calculs, $R^2 = 0.65$, zone convexe).....	90
Tableau 24. Coefficients de la liaison linéaire entre les variables et les composantes principales (groupe 1, échantillon des 68 maisons)	92
Tableau 25. Estimation des coefficients de la régression sur les variables initiales obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (zone convexe, groupe 1) 92	
Tableau 26. Coefficients estimés de régression orthogonale avec $n=68$ individus (zone concave, groupe 1)	94
Tableau 27. Estimation des coefficients de la régression sur les variables initiales obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (zone concave, groupe 1) 95	
Tableau 28. Statistiques élémentaires de 53 maisons distinctes du groupe 2	96
Tableau 29. Statistiques élémentaires de 11 maisons choisies représentatives du groupe 2 96	
Tableau 30. Présentation des variables caractéristiques de groupe 2.....	97
Tableau 31. Estimation des coefficients de la régression linéaire multiple sur les variables de contrôle (11 calculs, $R^2 = 0.99$, zone convexe)	98
Tableau 32. Estimation de nouveaux coefficients de la régression linéaire multiple sur les variables de contrôle (19 individus, $R^2 = 0.93$, zone convexe)	99
Tableau 33. Statistiques élémentaires de 19 maisons choisies représentatives du groupe 2 99	
Tableau 34. Coefficients estimés de régression orthogonale avec $n=19$ individus (zone convexe, groupe 2)	100
Tableau 35. Coefficients de la liaison linéaire entre les variables de contrôle utilisées et les composantes principales (groupe 2, zone convexe)	101
Tableau 36. Estimation des coefficients de la régression sur les variables de contrôle obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (groupe 2, zone convexe) 101	
Tableau 37. Coefficients estimés de régression orthogonale avec $n=19$ individus (zone concave, groupe 2)	103

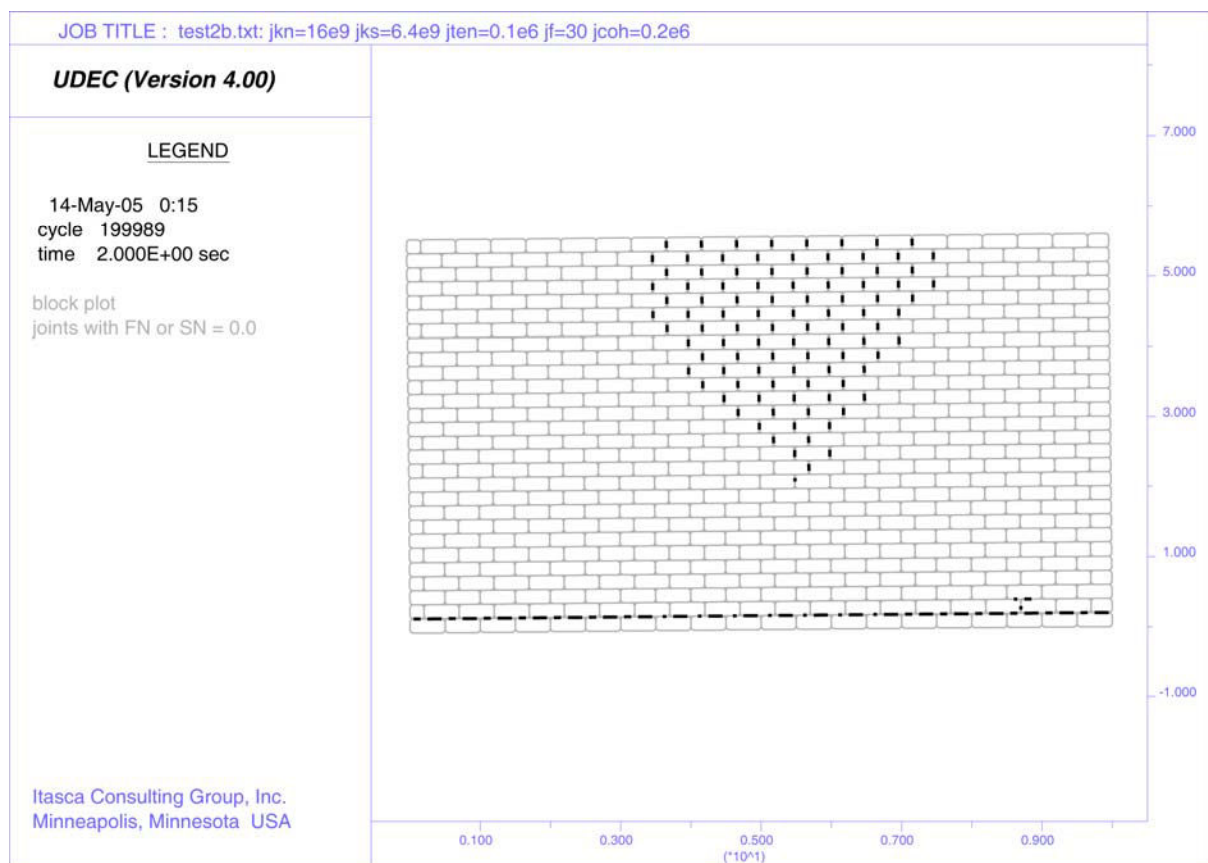
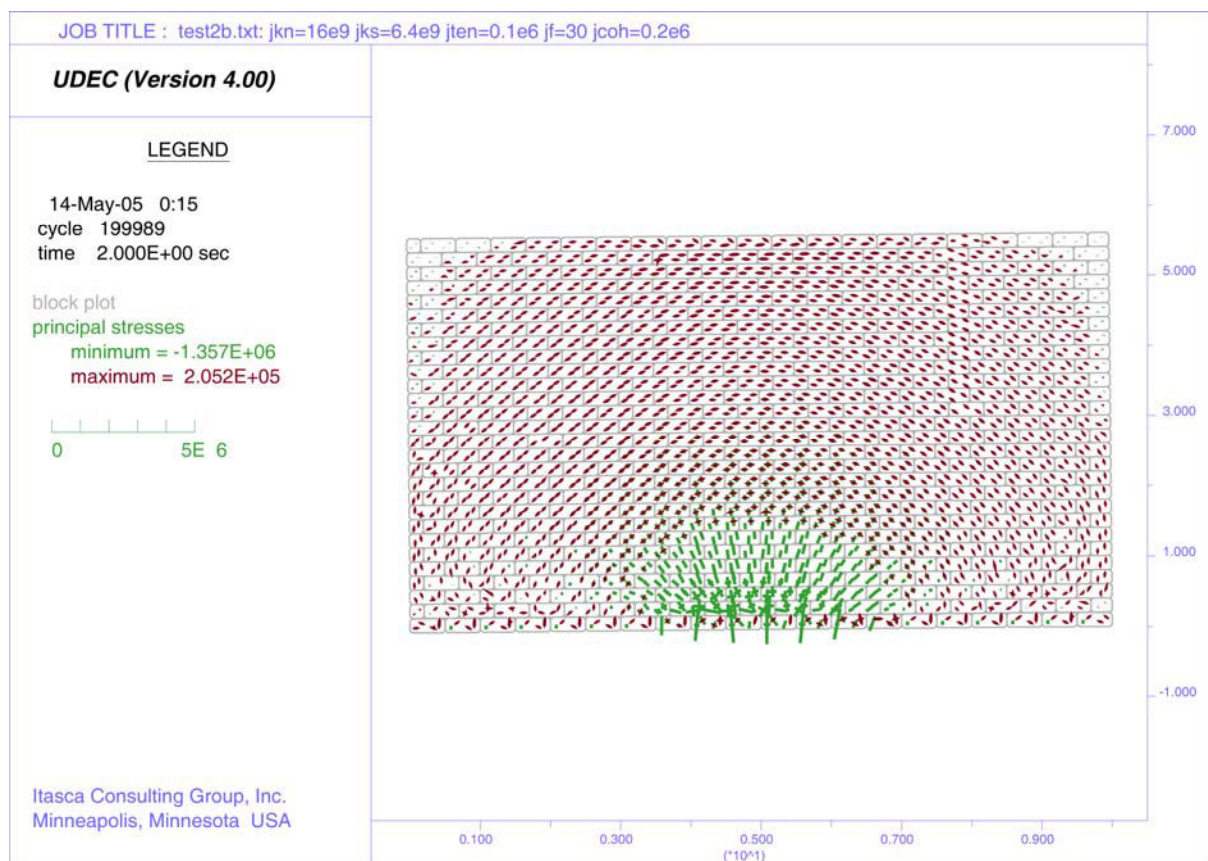
Tableau 38. Estimation des coefficients de la régression sur les variables de contrôle obtenues à partir de la régression sur les 5 premières composantes principales (groupe 2, zone concave)	103
Tableau 39. Statistiques élémentaires de 116 maisons distinctes du groupe 3	104
Tableau 40. Statistiques élémentaires de 25 maisons choisies aléatoirement dans le groupe 3 et résultats des simulations en terme de longueur cumulée des joints ouverts en zones convexe et concave.....	104
Tableau 41. Présentation des variables caractéristiques de groupe 3.....	105
Tableau 42. Coefficients estimés de la régression orthogonale avec n=25 individus (zone convexe, groupe 3)	107
Tableau 43. Coefficients de la liaison linéaire entre les variables de contrôle utilisées et les trois composantes principales.....	107
Tableau 44. Estimation des coefficients de la régression sur les variables de contrôle obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (groupe 3, zone convexe)	108
Tableau 45. Coefficients estimés de régression orthogonale avec n=25 individus (zone concave, groupe 3)	109
Tableau 46. Estimation des coefficients de la régression sur les variables de contrôle obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (zone concave, groupe 3)	110
Tableau 47. Statistiques élémentaires de 186 maisons distinctes du groupe 4	111
Tableau 48. Statistiques élémentaires des 36 maisons choisies représentatives du groupe 4	111
Tableau 49. Présentation des variables caractéristiques du groupe 4	112
Tableau 50. Coefficients estimés de régression orthogonale avec n=36 individus (zone convexe, groupe 4)	114
Tableau 51. Coefficients de la liaison linéaire entre les variables de contrôle utilisées et les trois composantes principales (groupe 4, zone convexe).....	115
Tableau 52. Estimation des coefficients de la régression sur les variables de contrôle obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (groupe 4, zone convexe)	115
Tableau 53. Coefficients estimés de régression orthogonale avec n=36 individus (zone concave, groupe 4)	117
Tableau 54. Estimation des coefficients de la régression sur les variables de contrôle obtenues à partir de la régression sur les 3 premières composantes principales (groupe 4, zone concave)	117

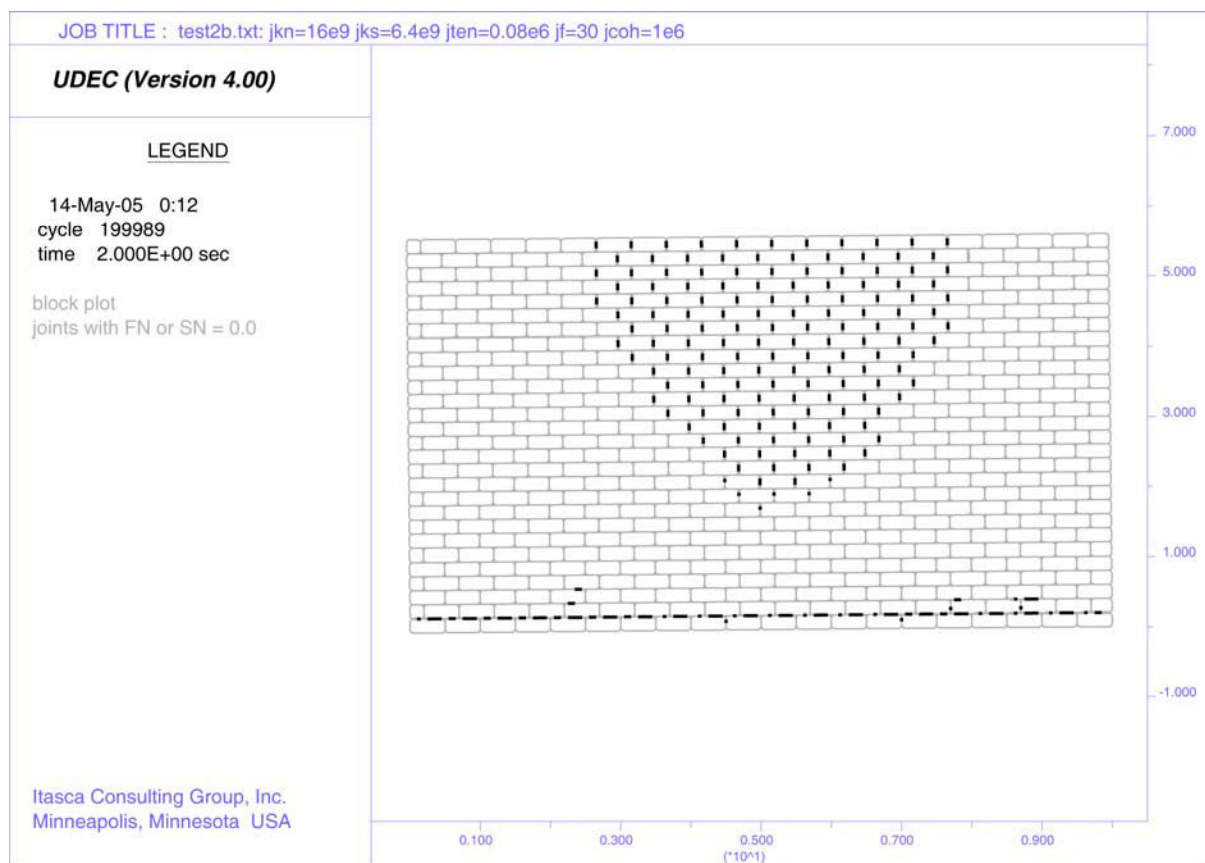
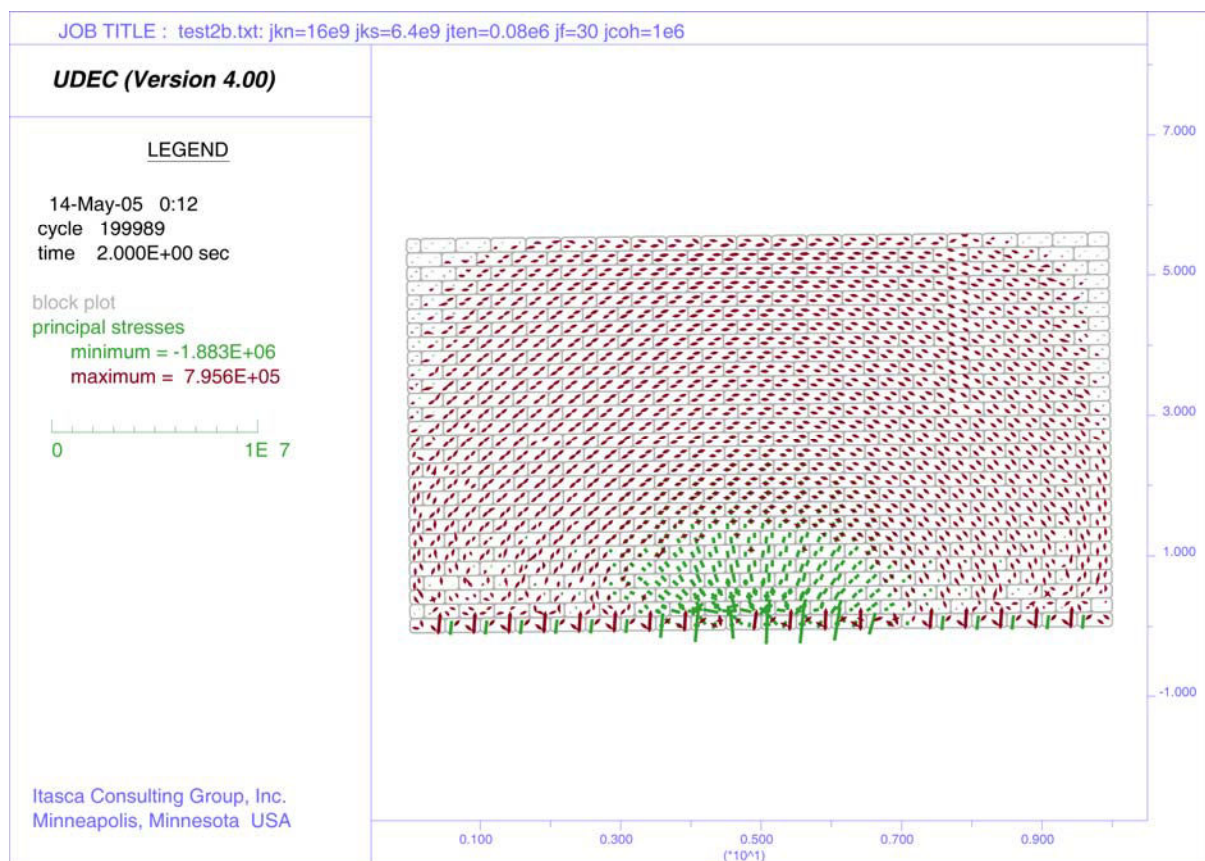
ANNEXE 1

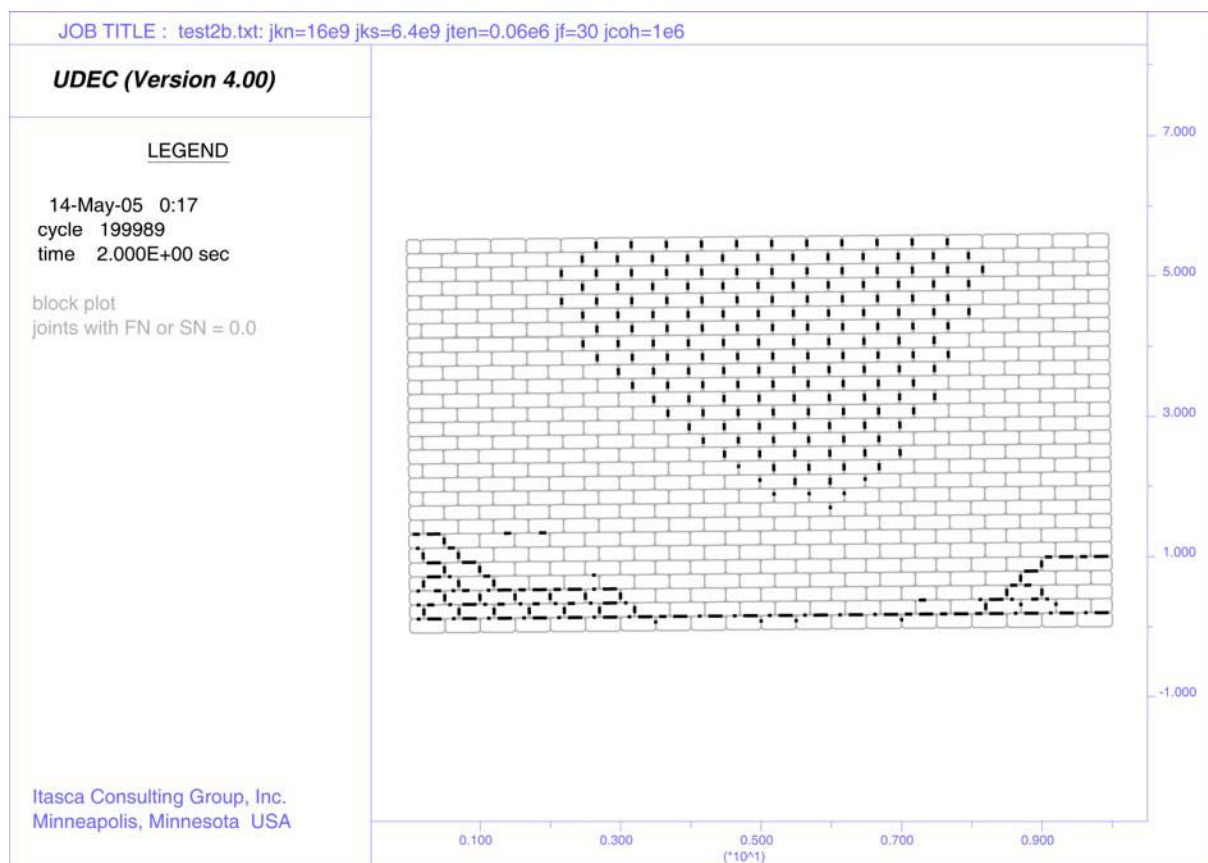
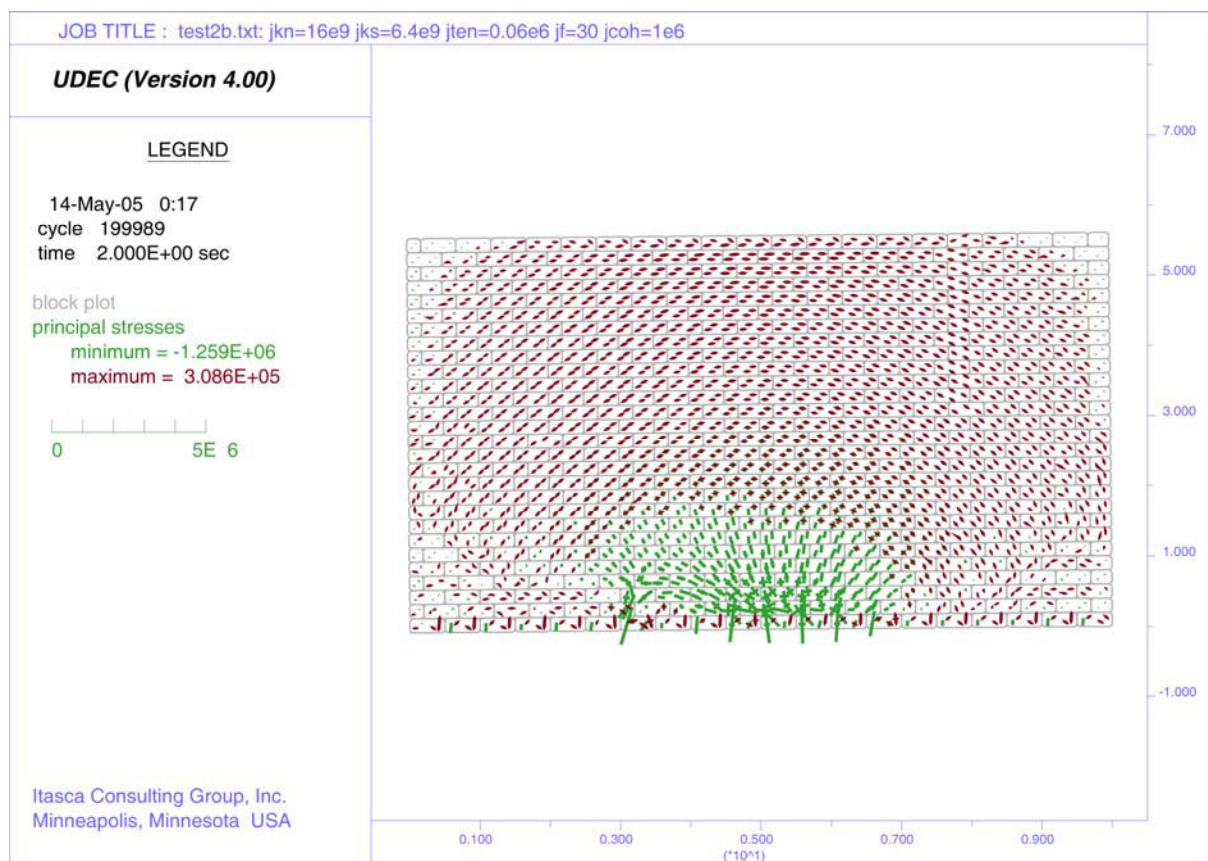
La présente annexe montre quelques exemples de résultats obtenus avec Udec pour un mur en position 1 (en amont de la cuvette d'affaissement de la Figure 40). Les valeurs des paramètres (J_{tens} : résistance à la traction en MPa et J_{coh} : cohésion en MPa) sont données dans la figure. On montre à chaque fois la répartition des contraintes principales puis la distribution des joints ouverts (fissures) correspondantes.

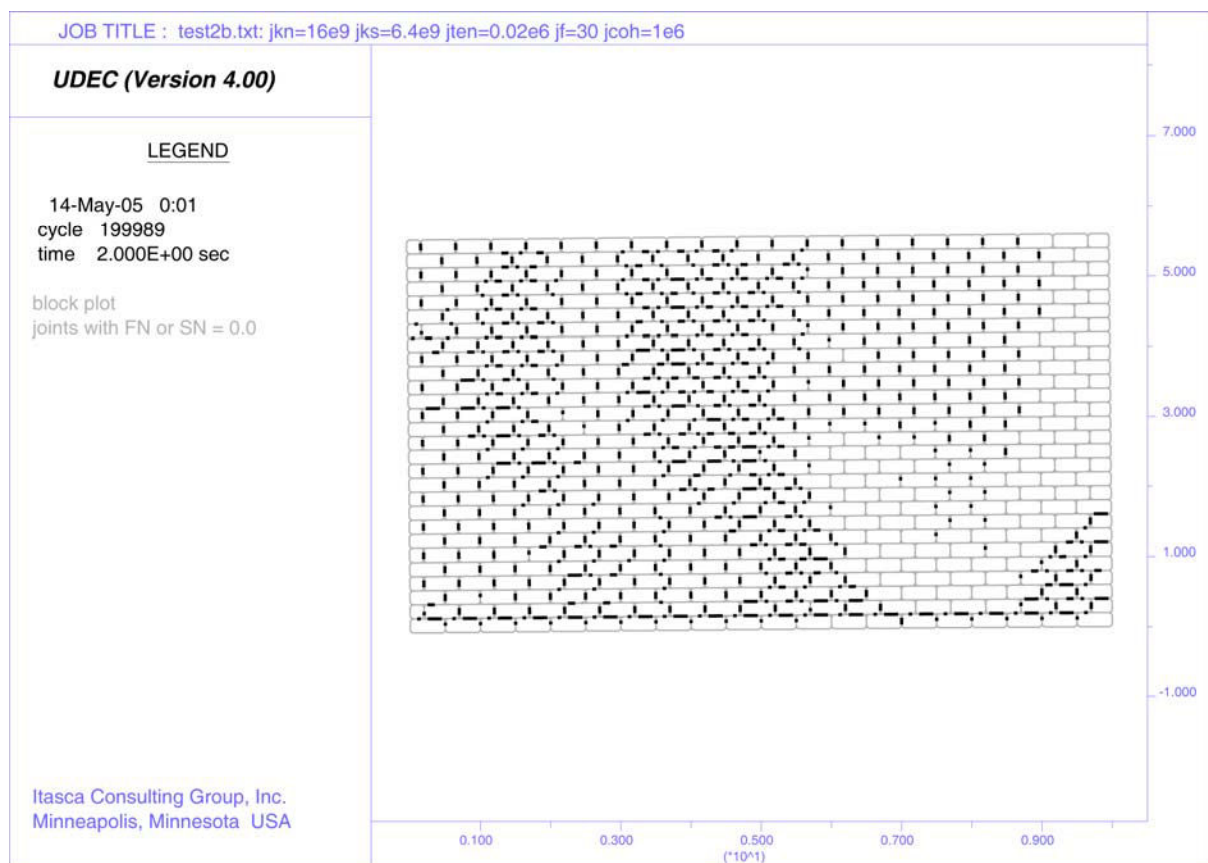
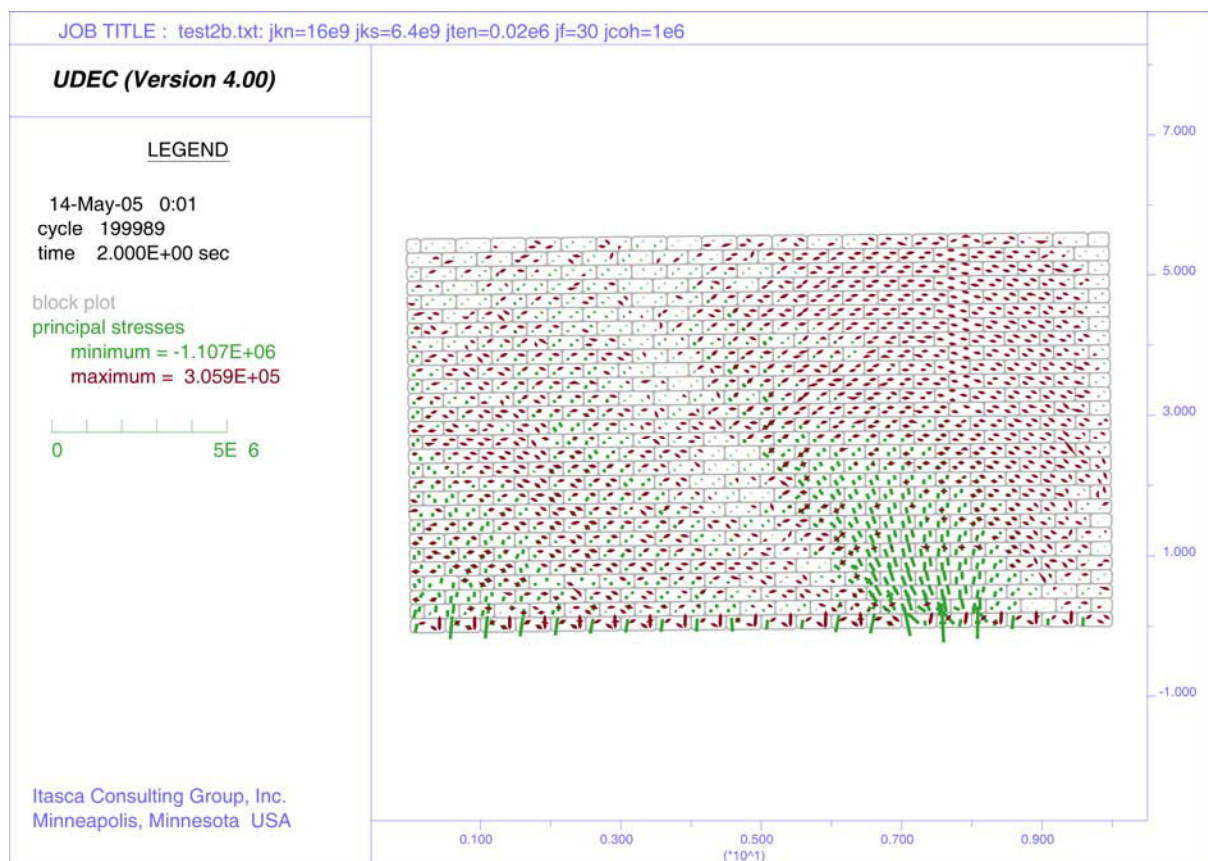






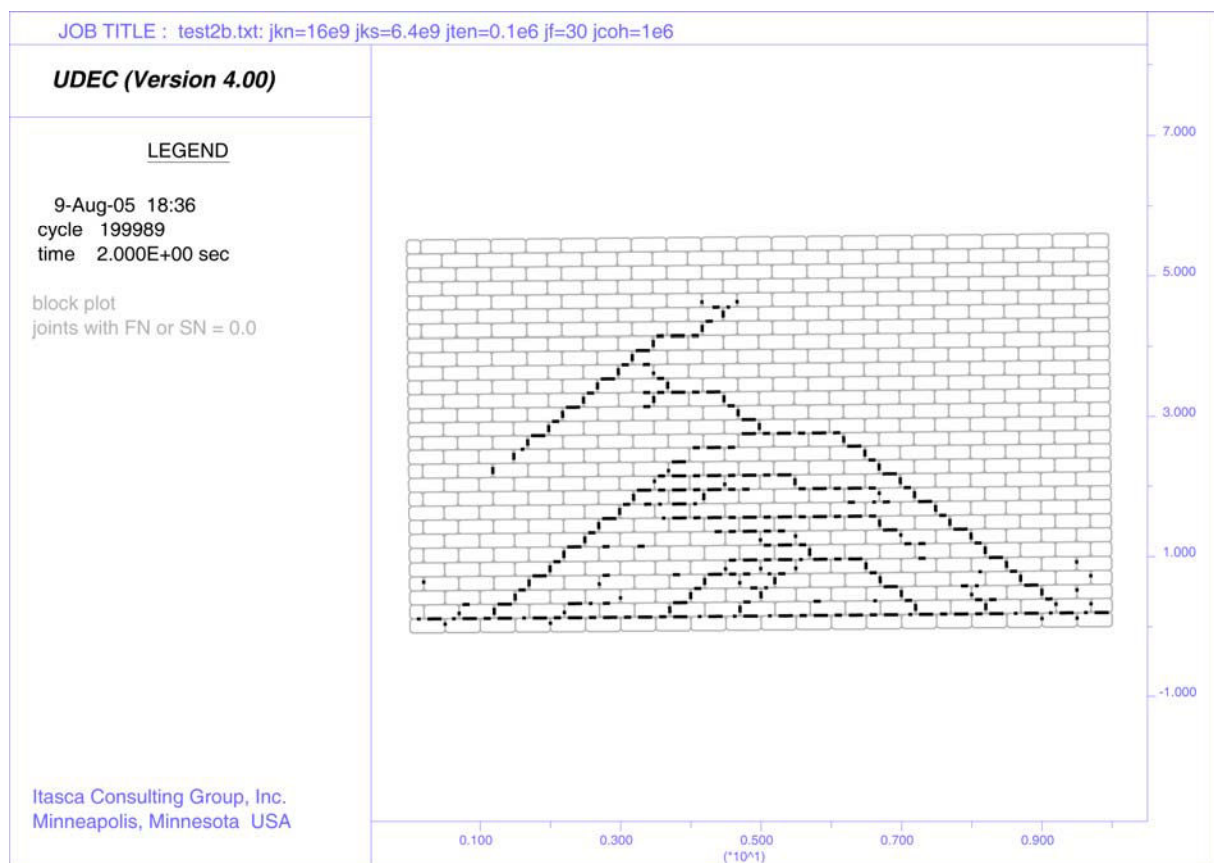
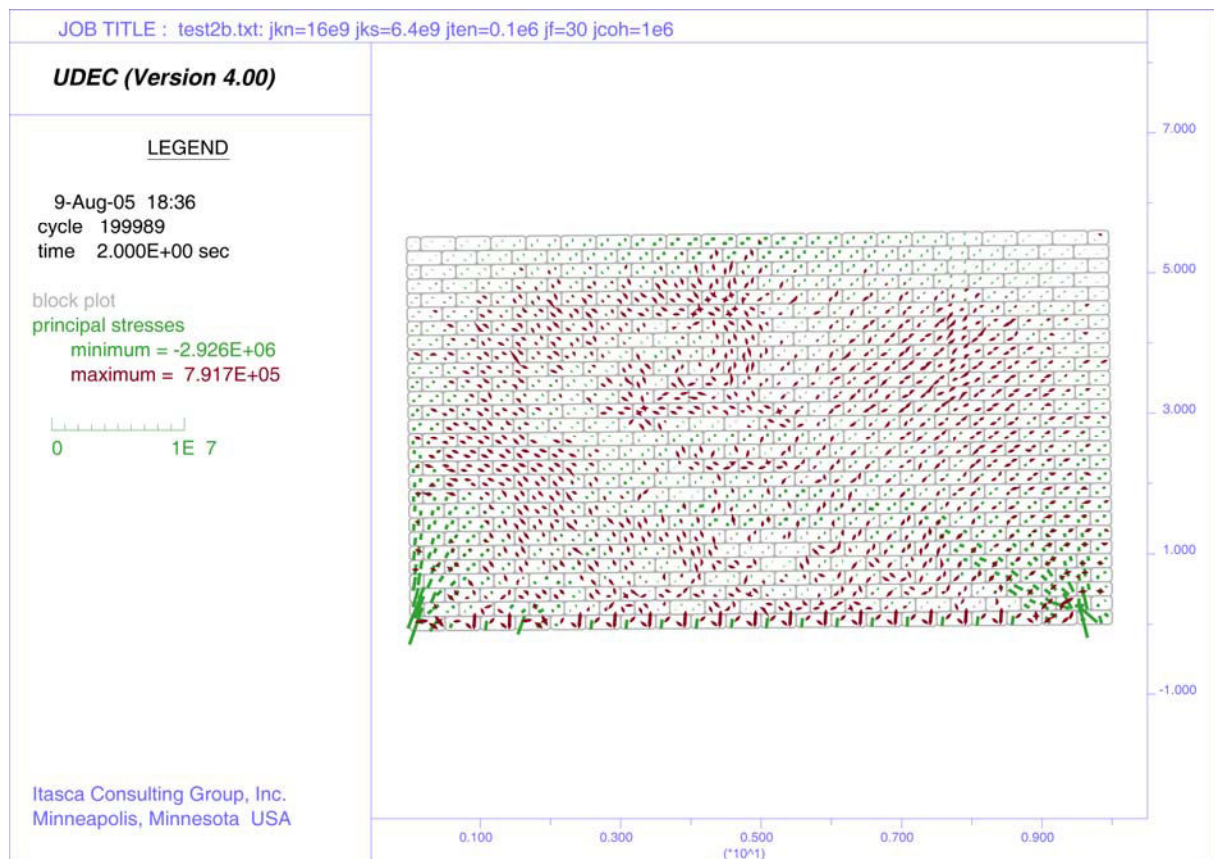


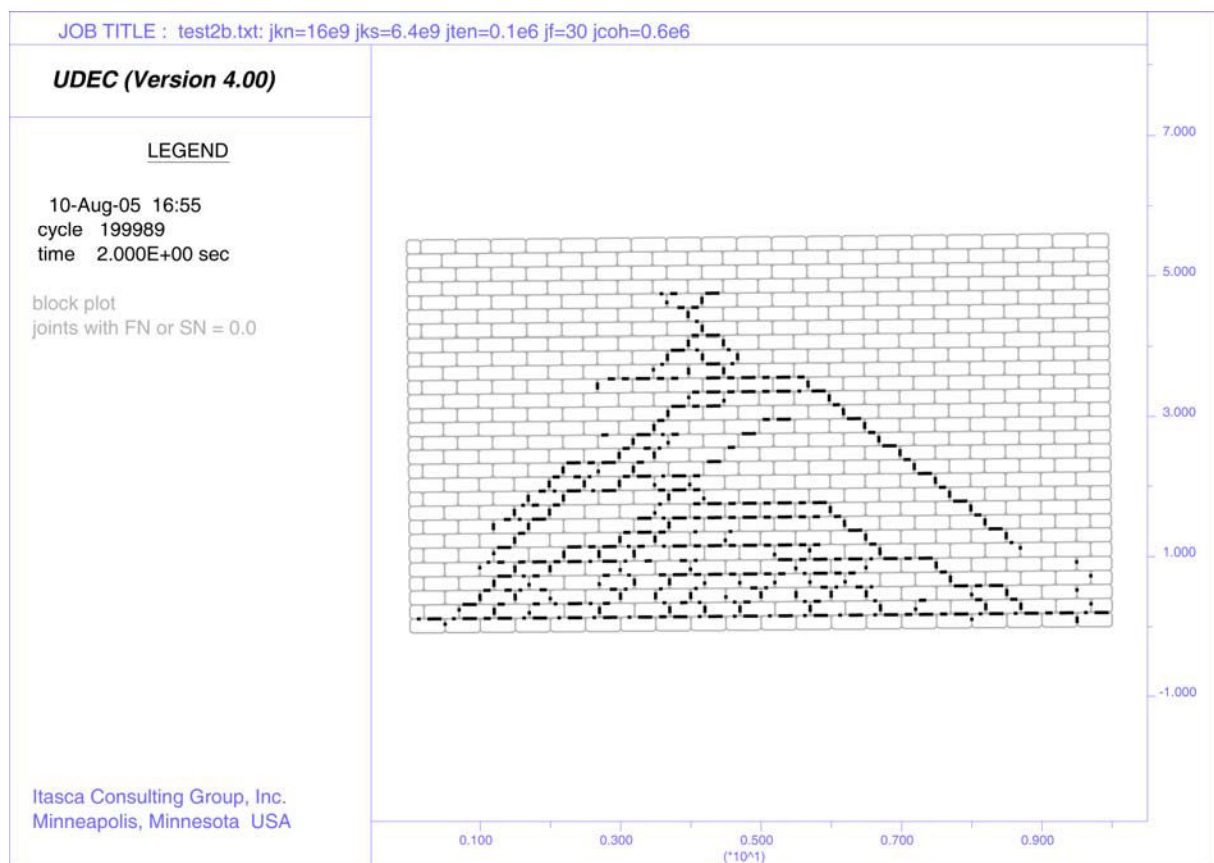
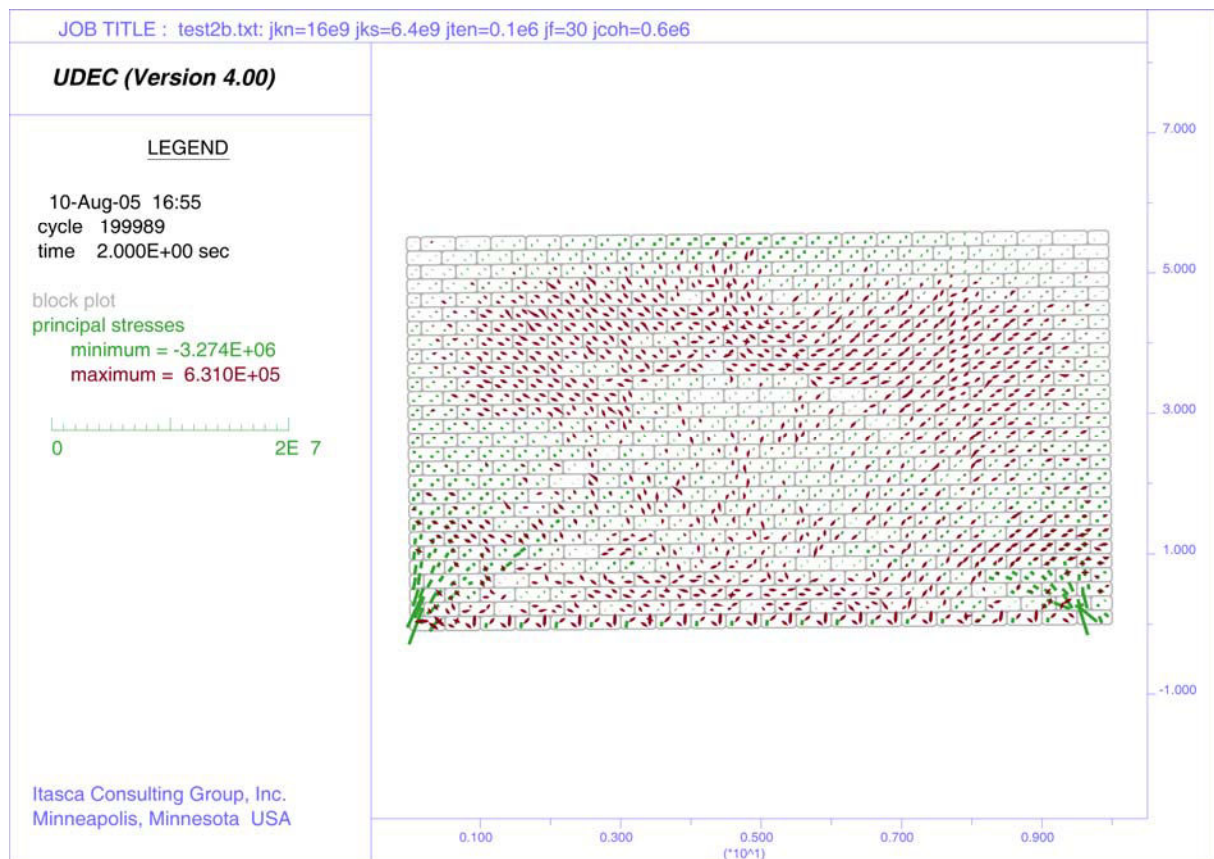


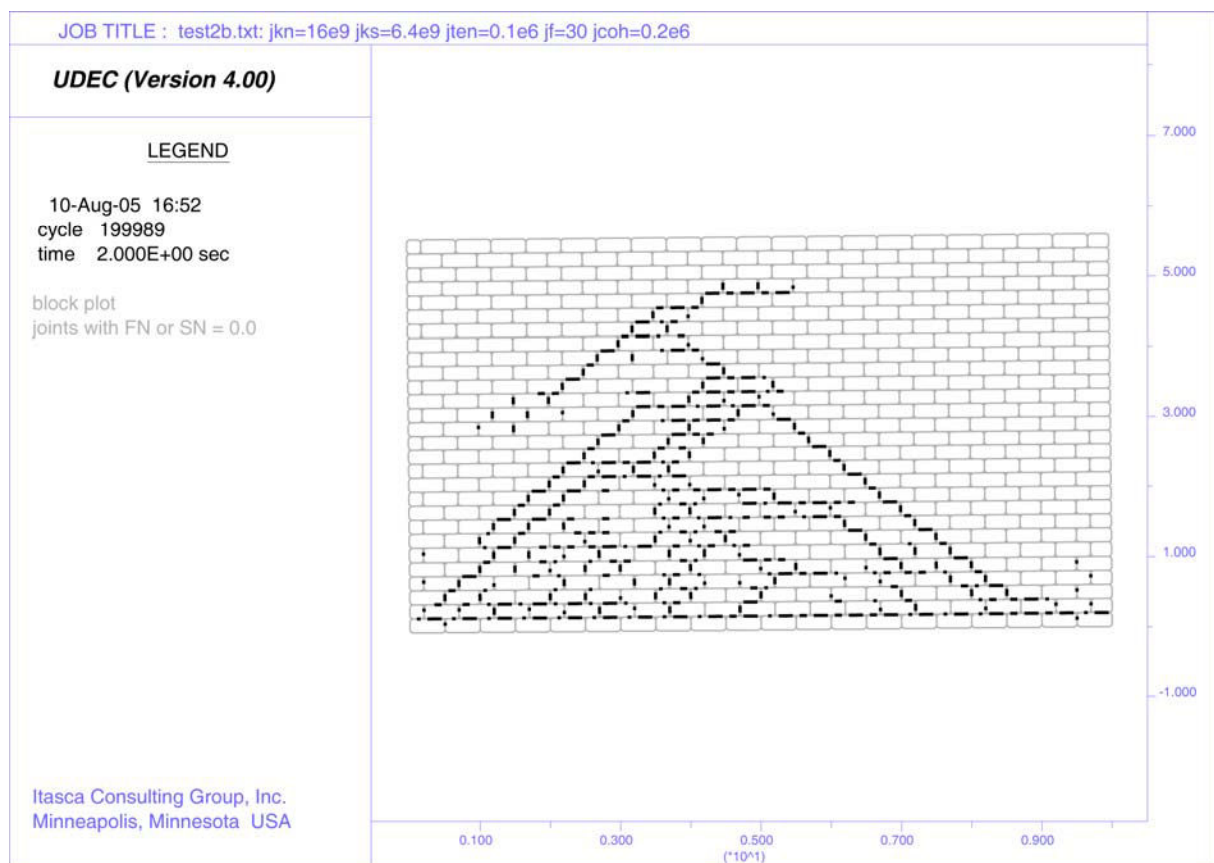
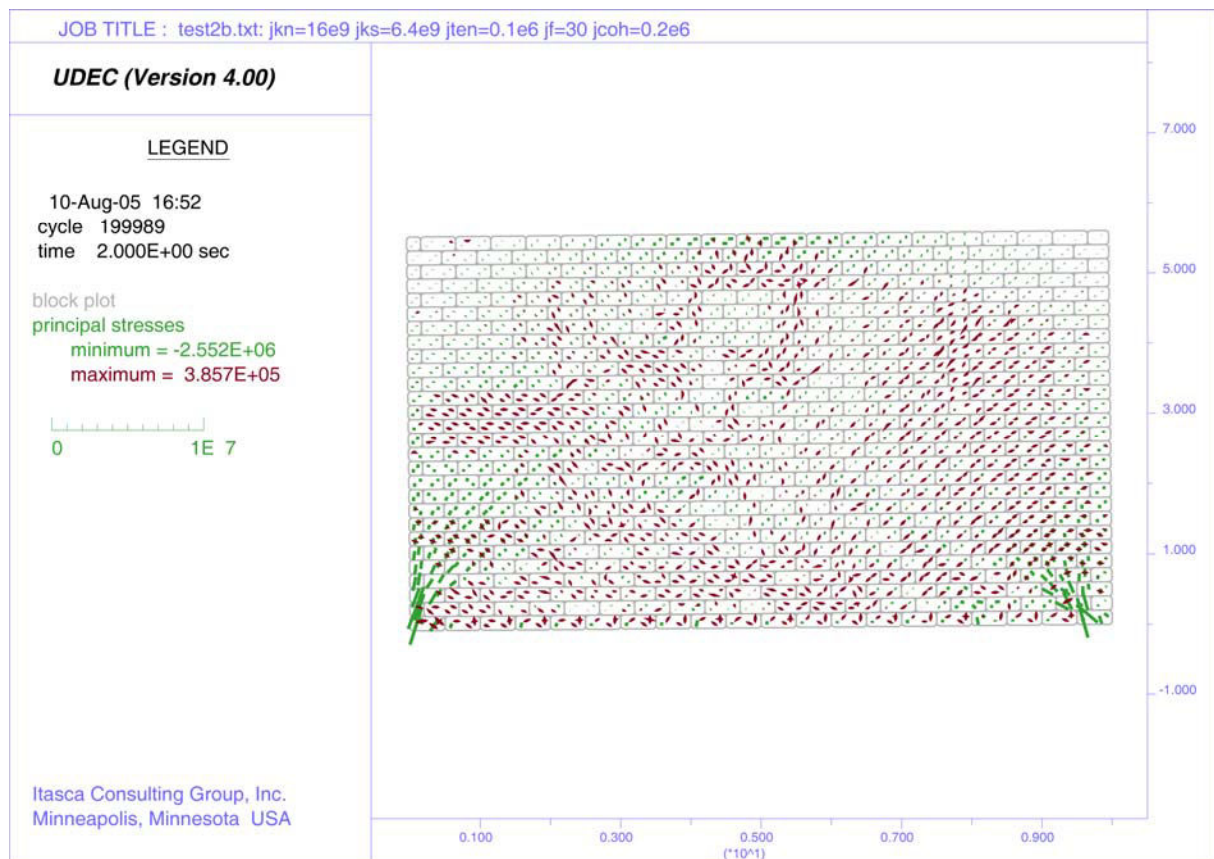


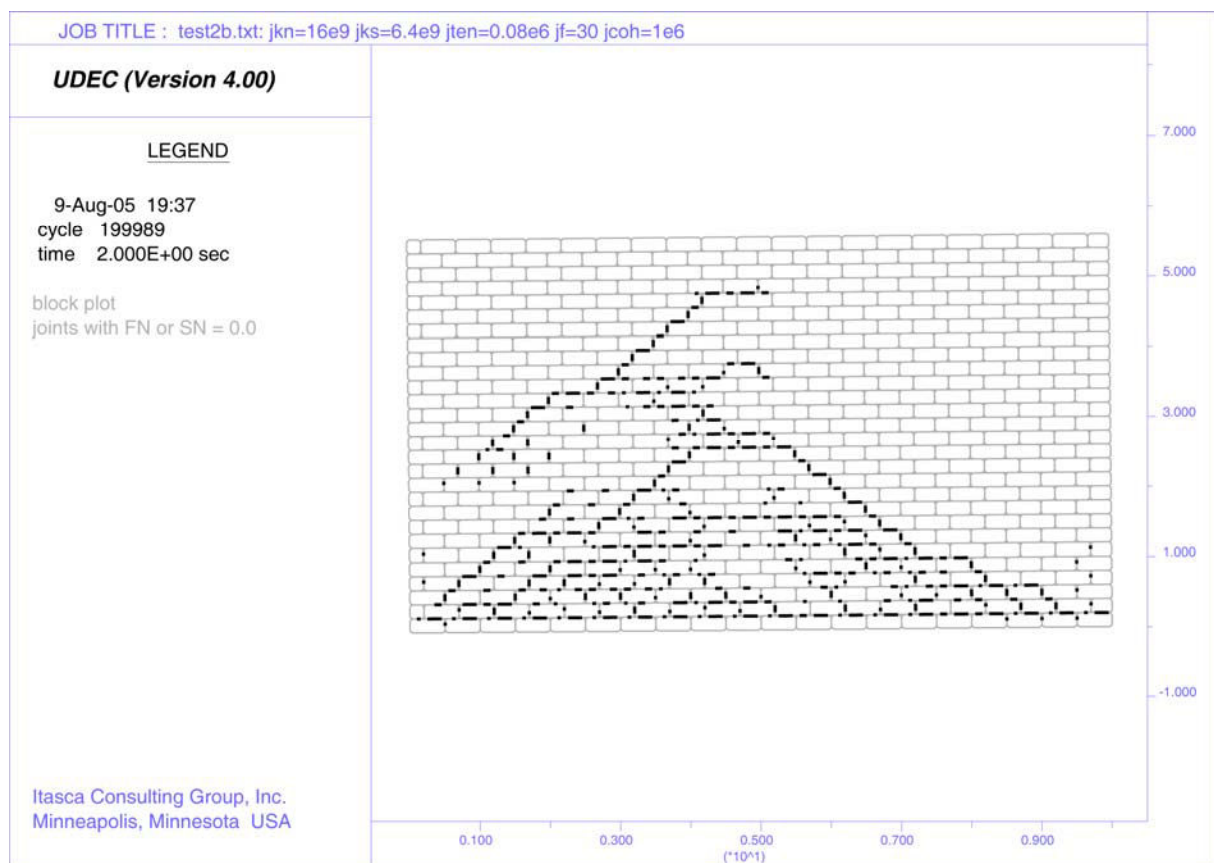
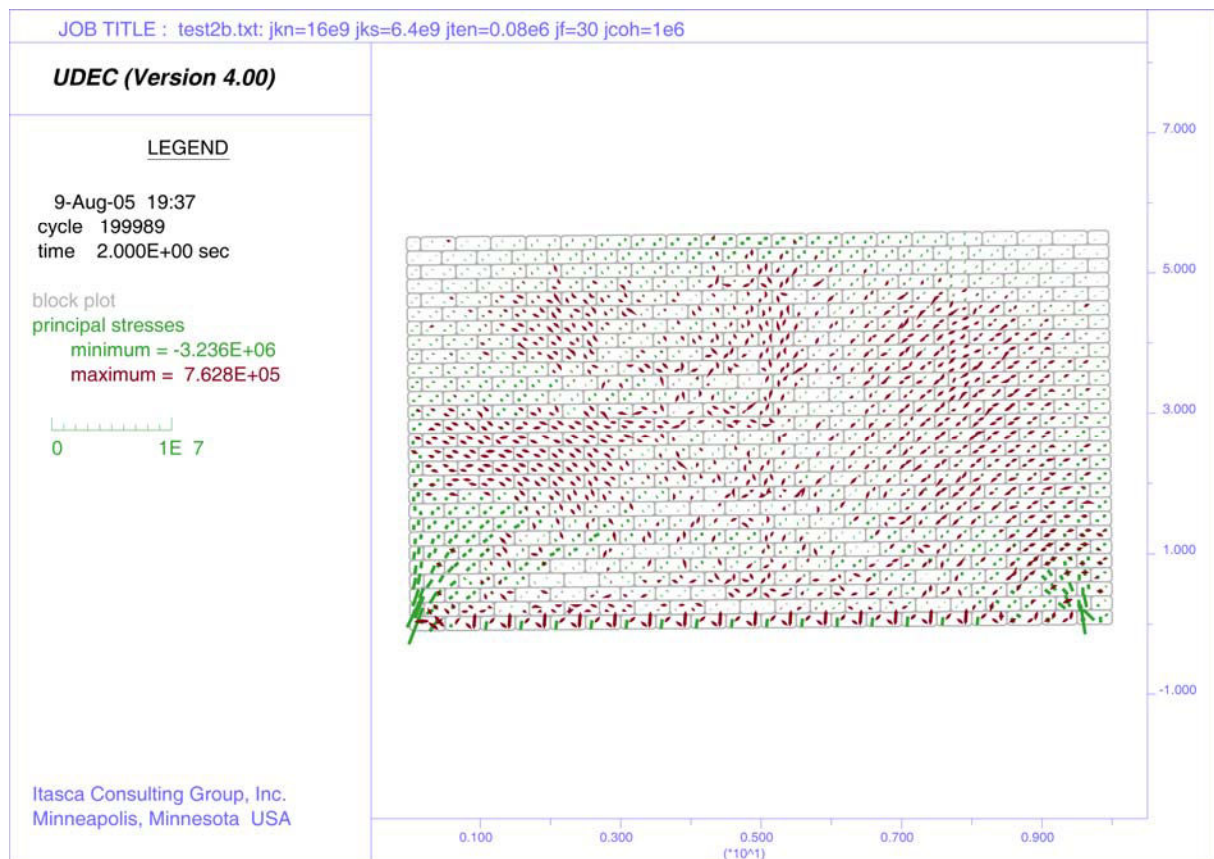
ANNEXE 2

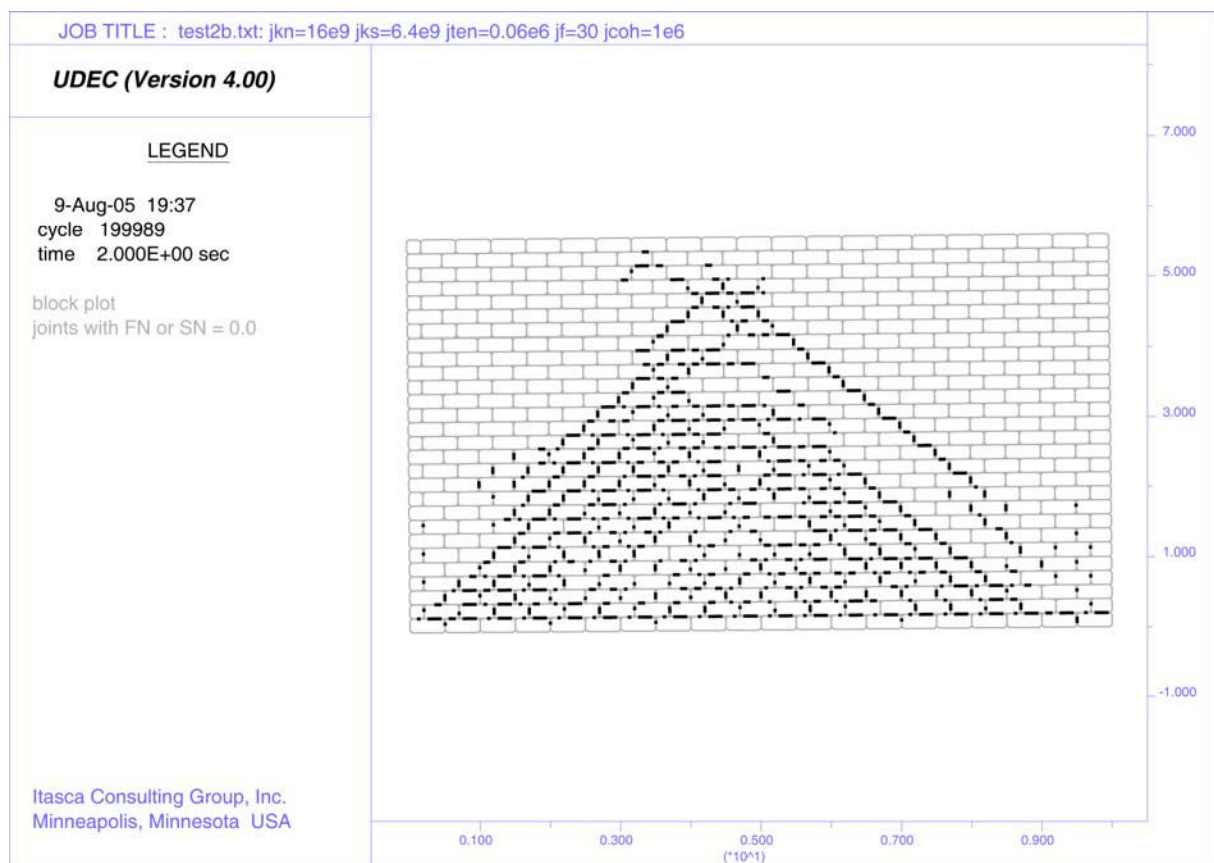
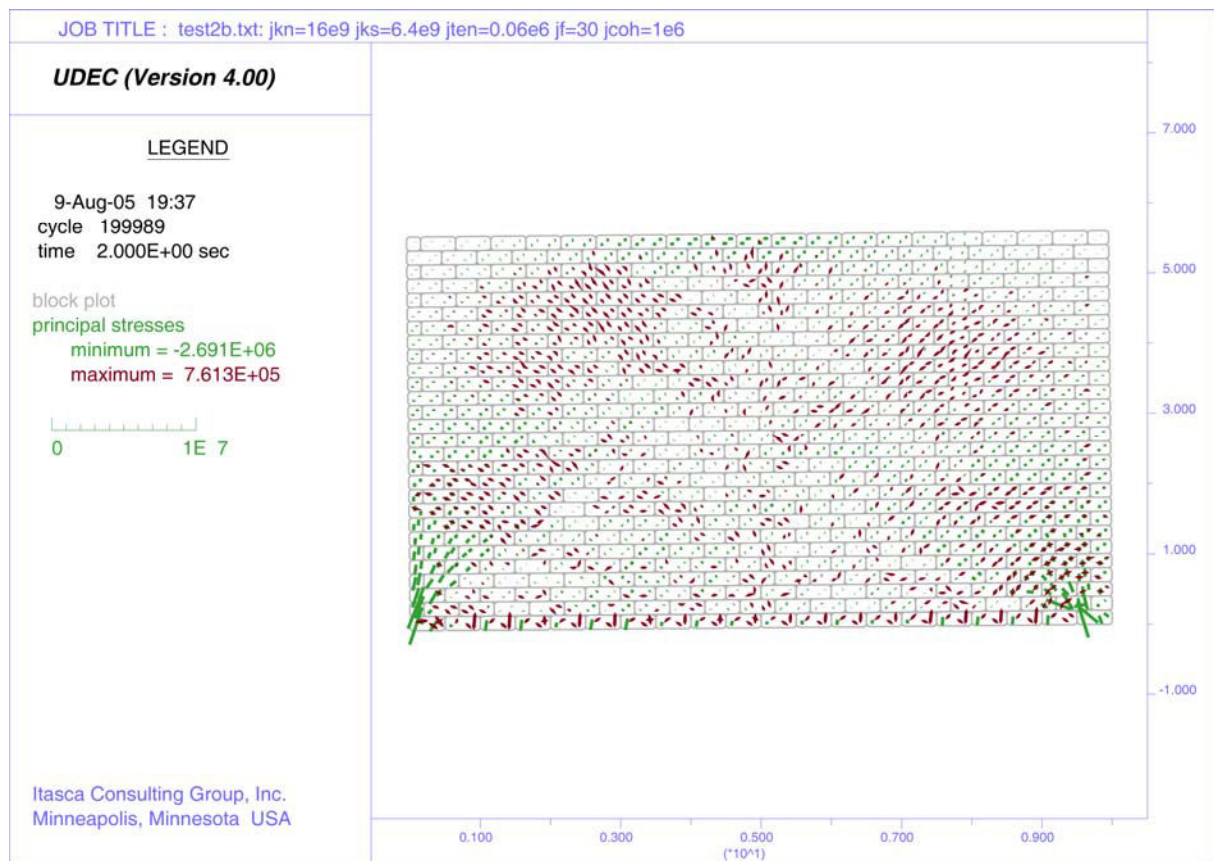
La présente annexe montre quelques exemples de résultats obtenus avec Udec pour un mur en position 2 (en aval de la cuvette d'affaissement de la Figure 40). Les valeurs des paramètres (J_{tens} : résistance à la traction en MPa et J_{coh} : cohésion en MPa) sont données dans la figure. On montre à chaque fois la répartition des contraintes principales puis la distribution des joints ouverts (fissures) correspondantes.

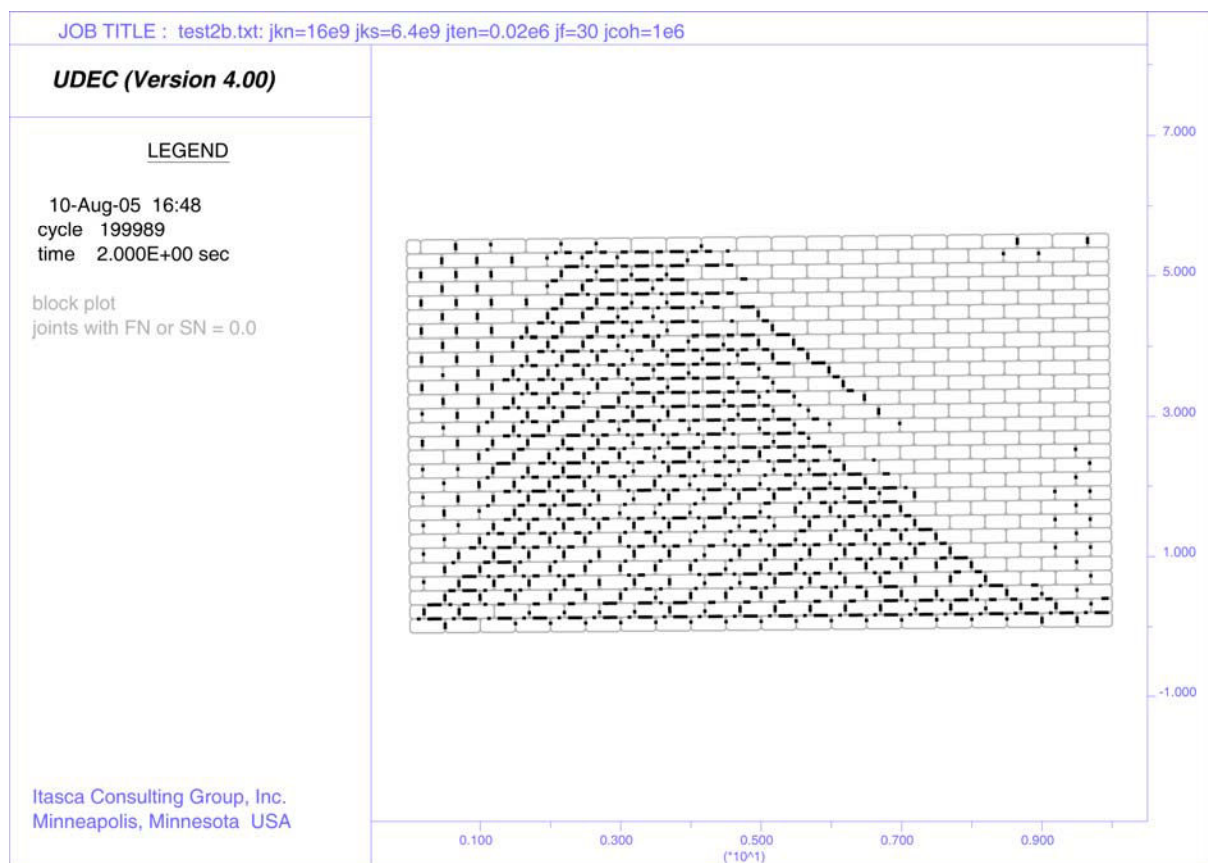
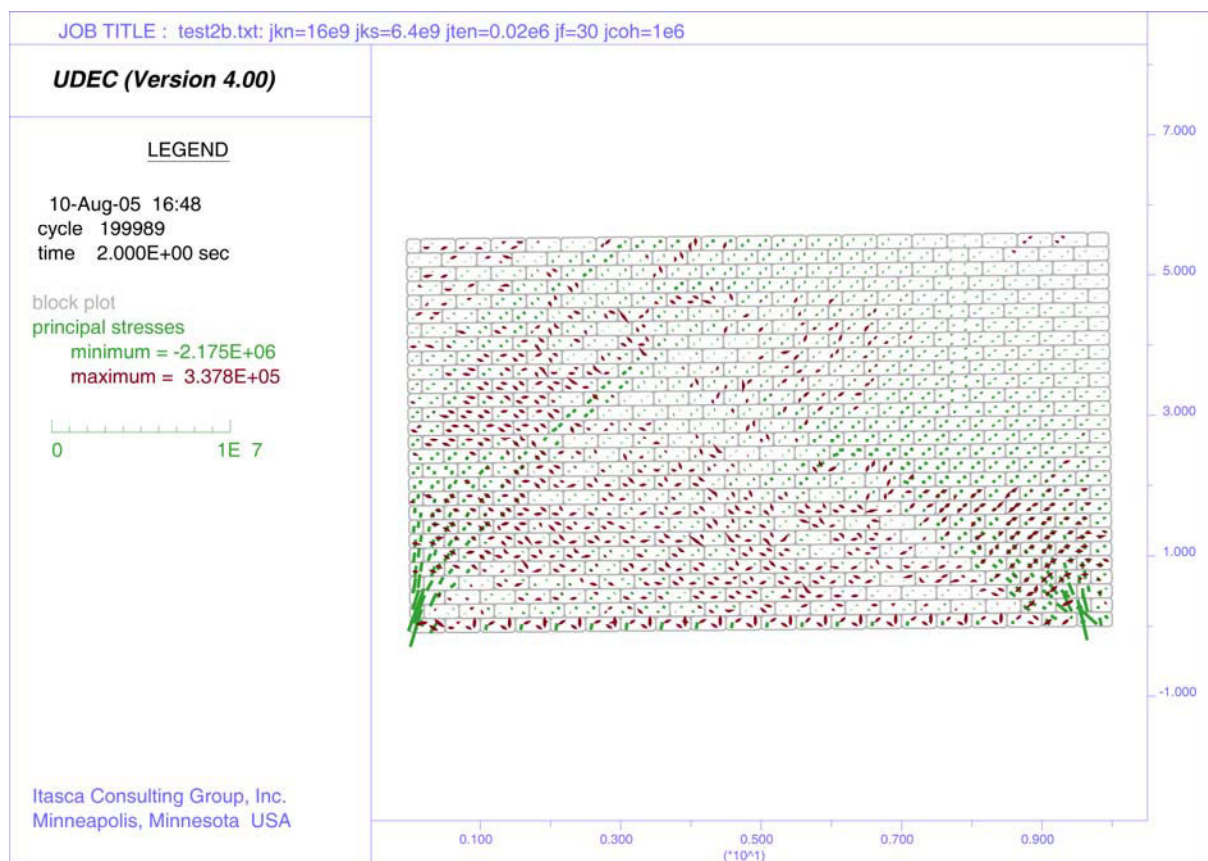






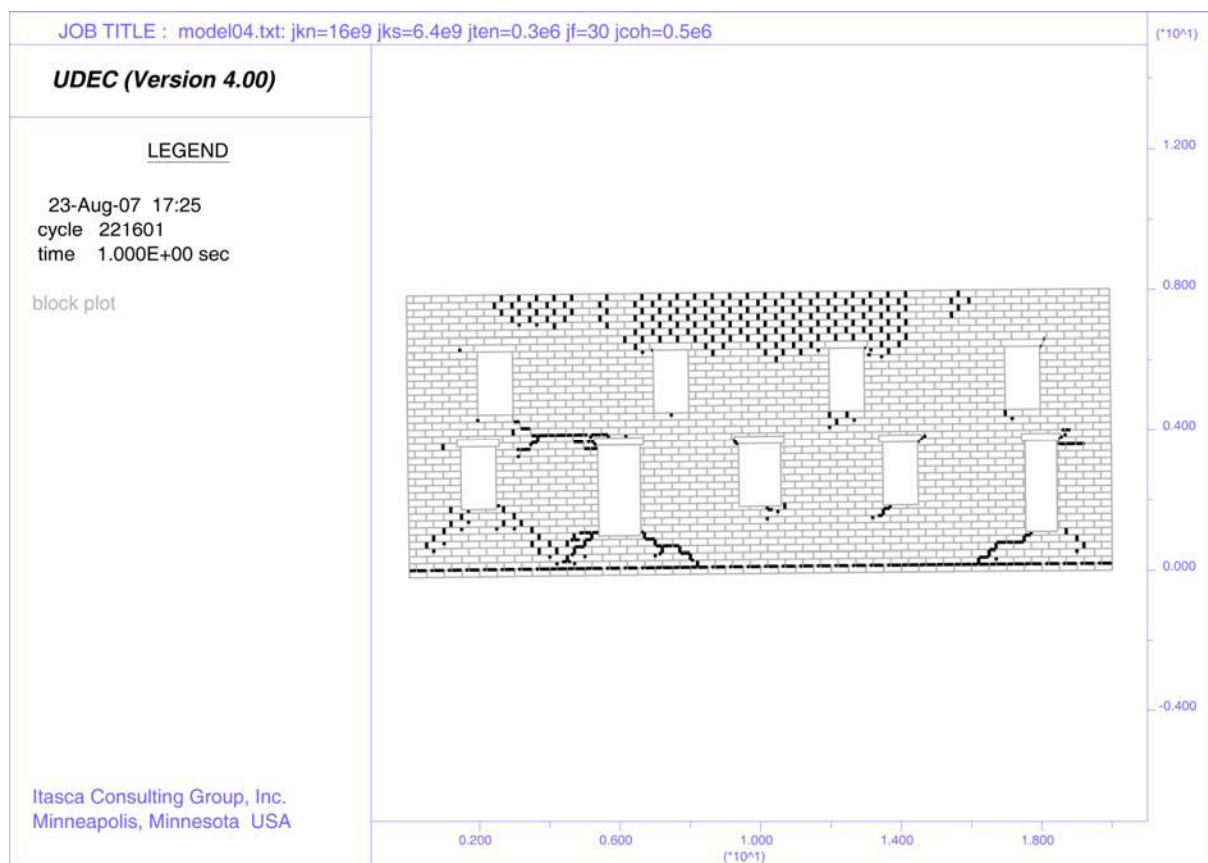
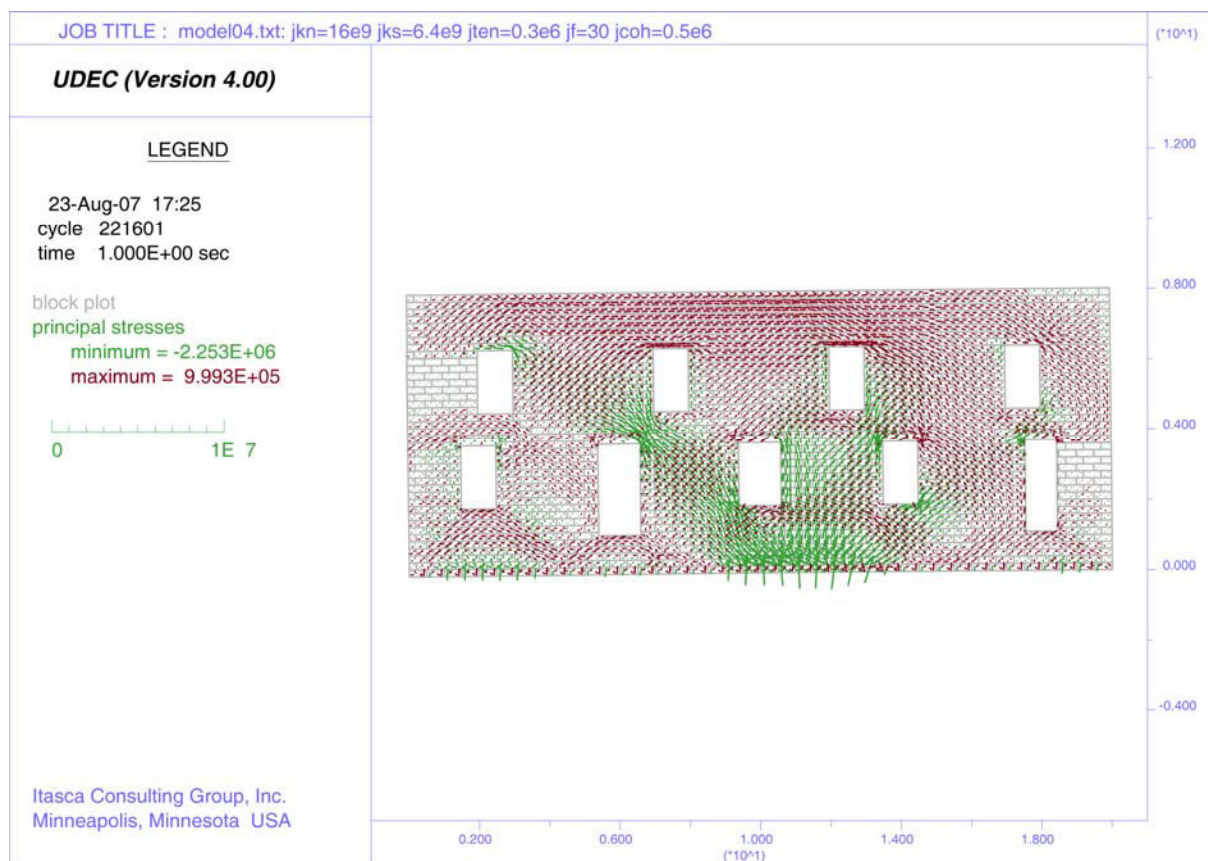


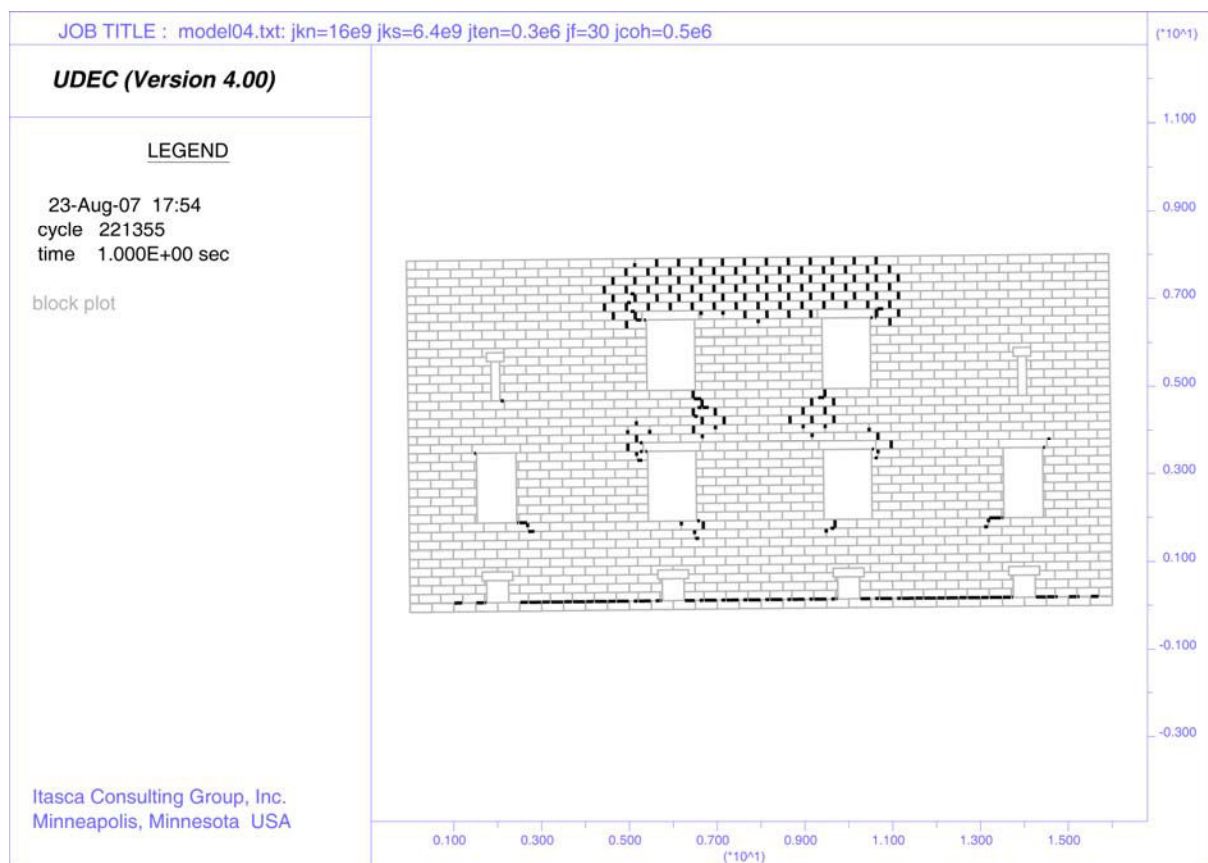
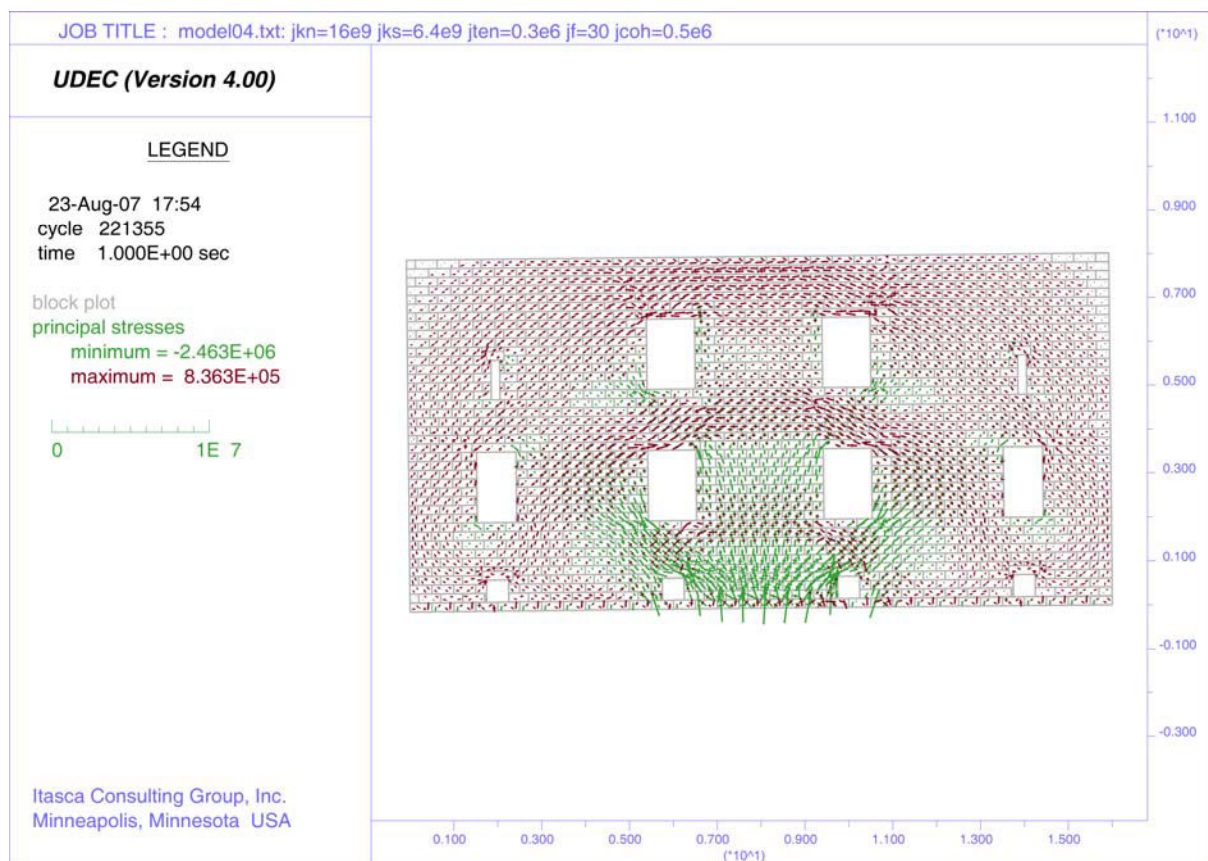


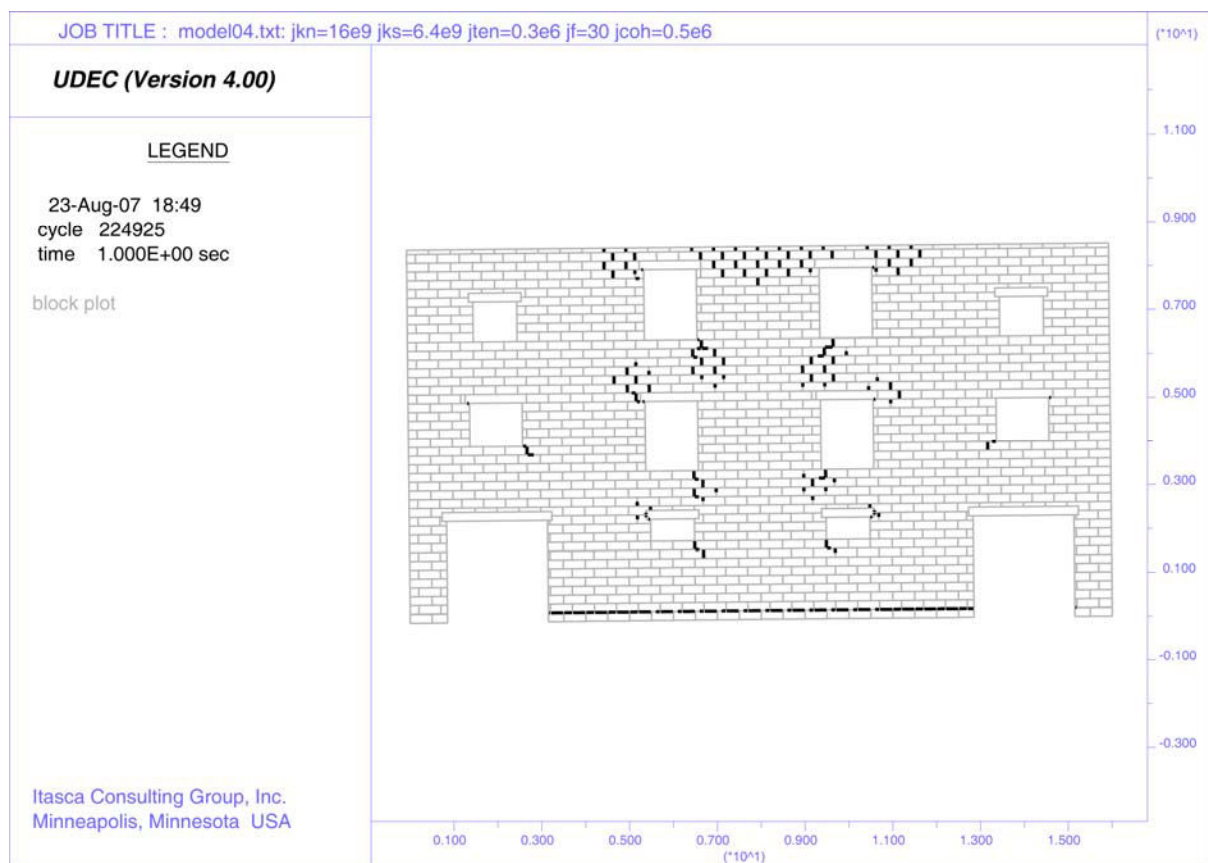
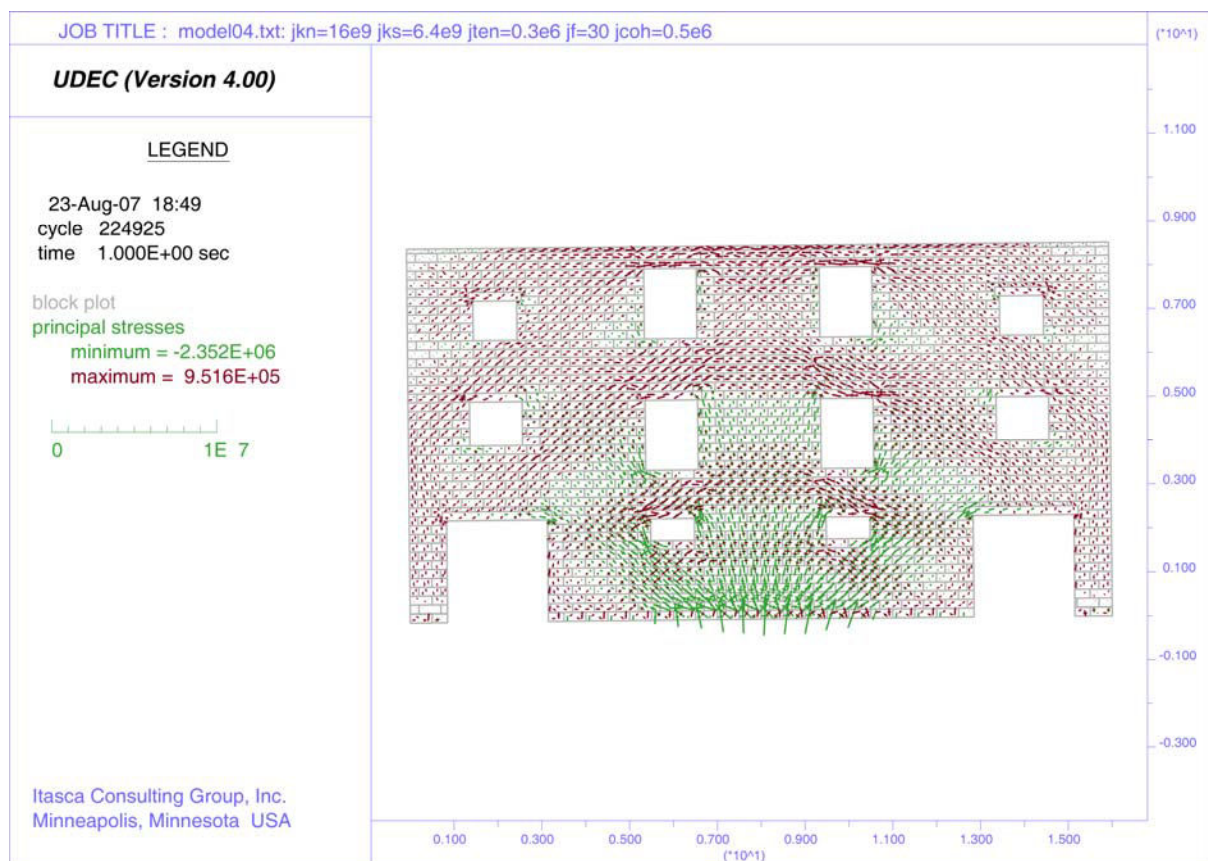


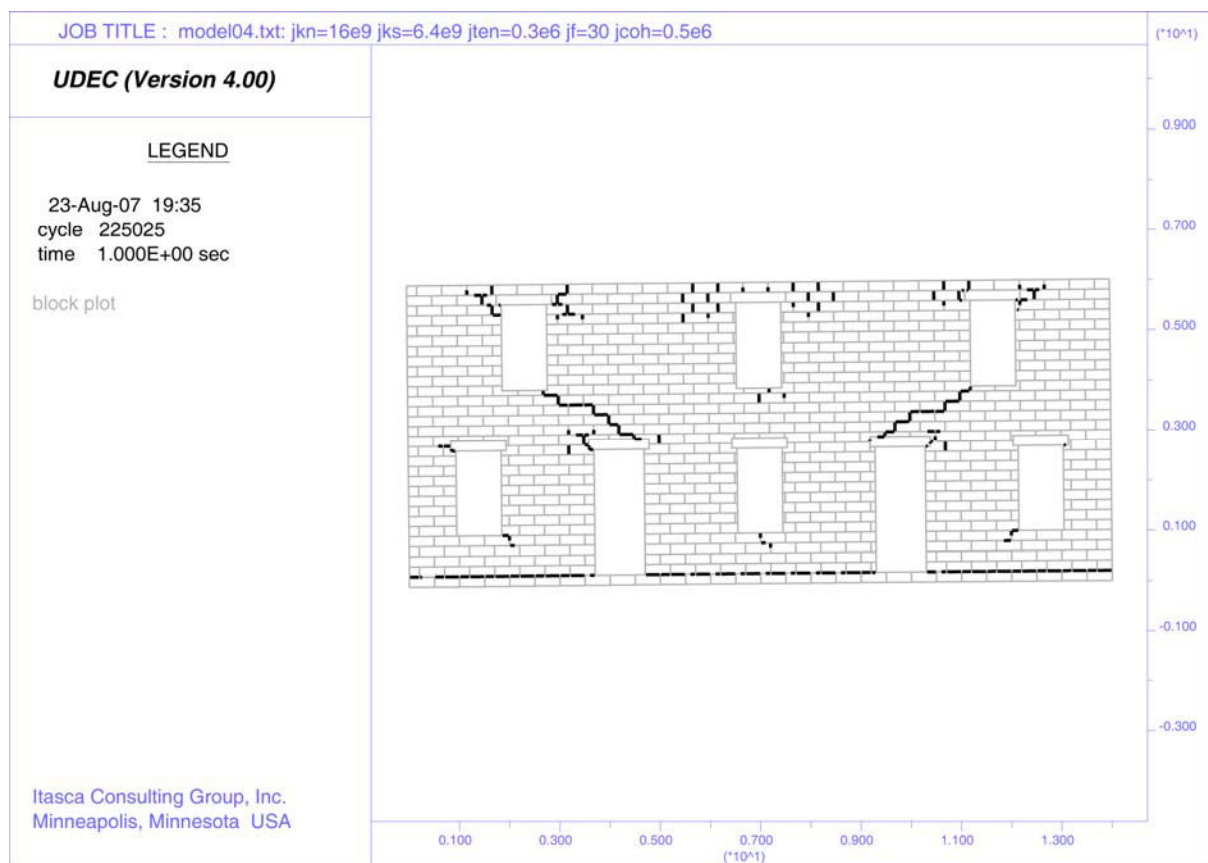
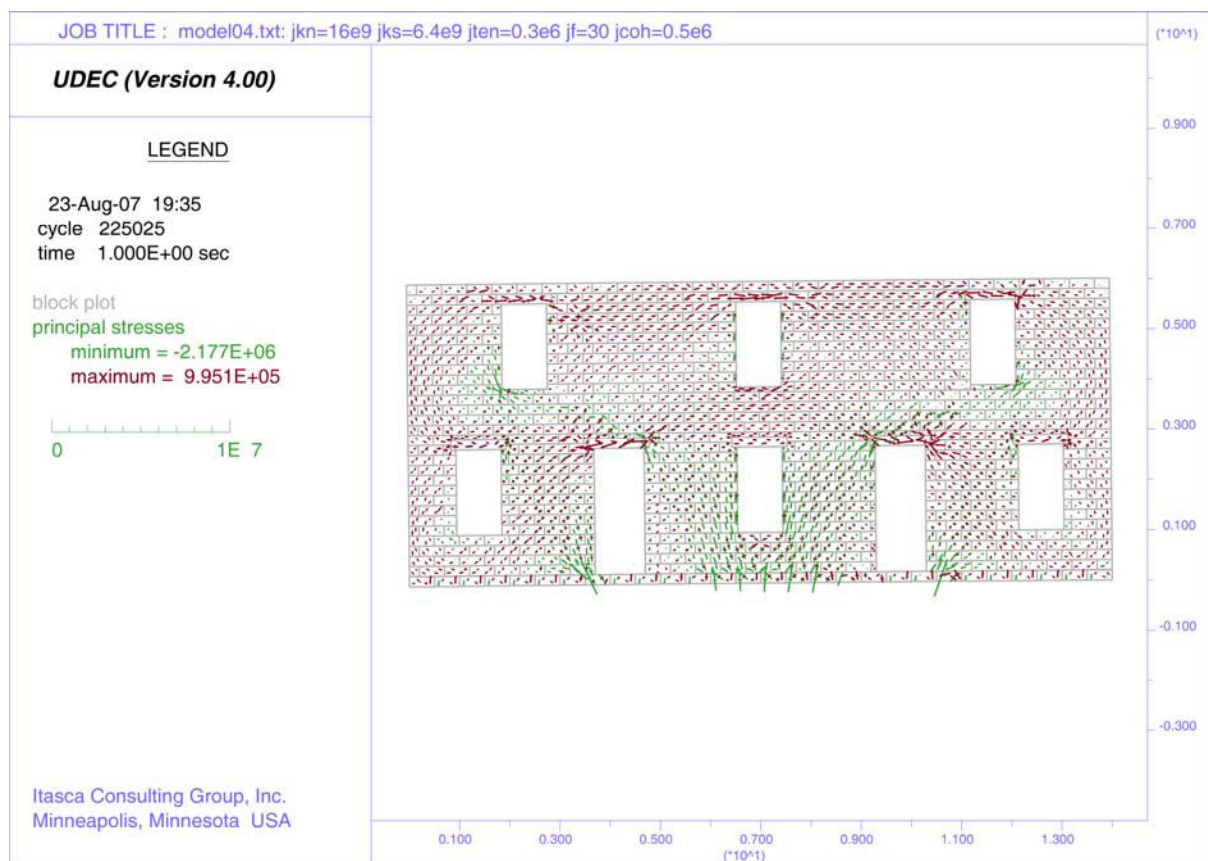
ANNEXE 3

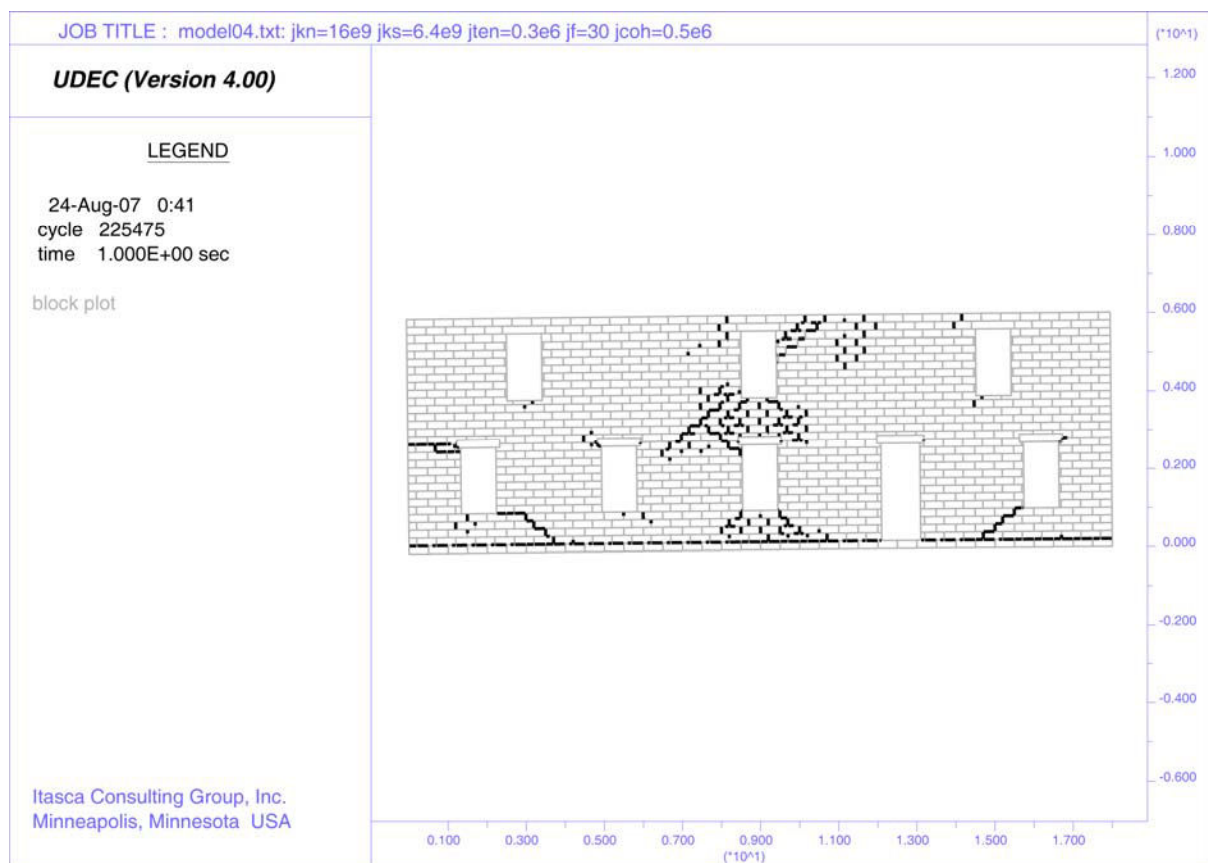
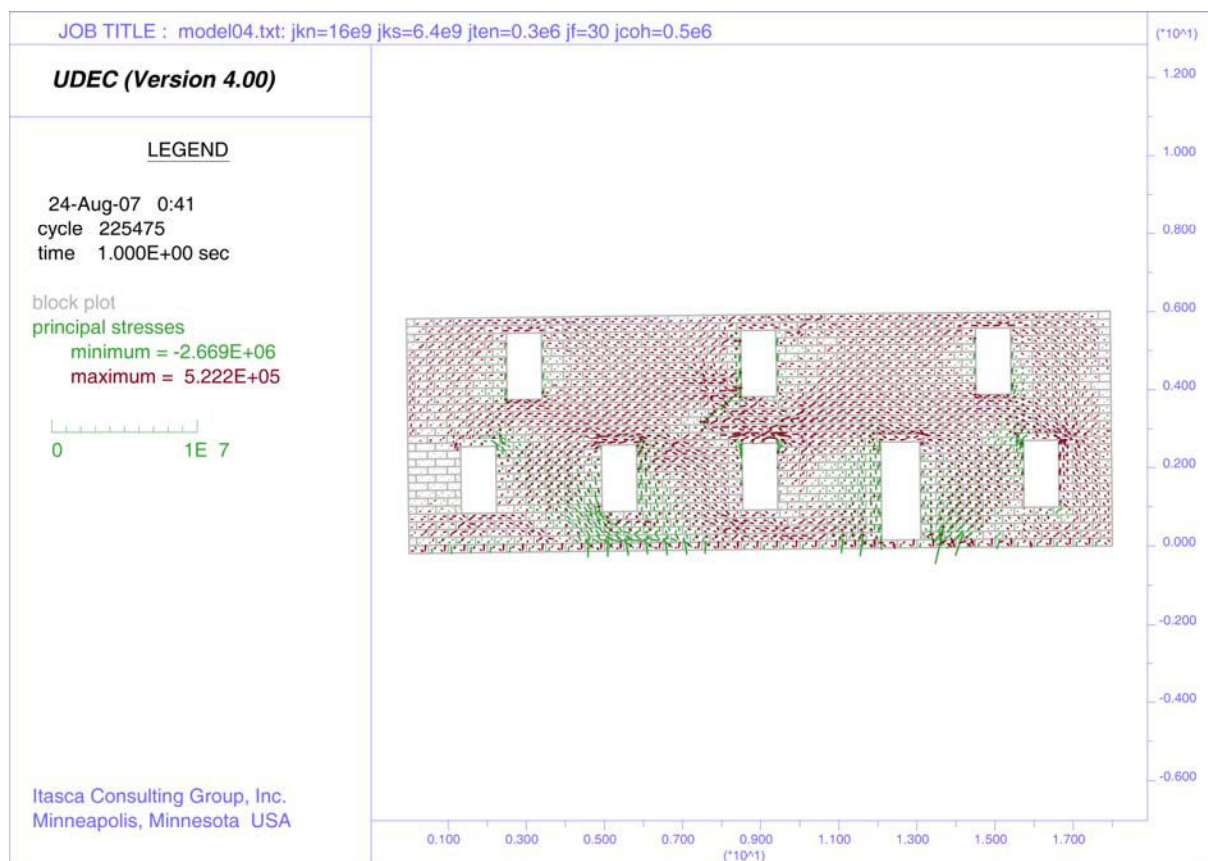
La présente annexe montre quelques exemples de résultats obtenus avec Udec pour plusieurs types de maisons en position convexe (en zone d'extension des terrains, dans la couronne externe, de la cuvette au-delà du point d'inflexion telle qu'indiqué sur la Figure 40). Les valeurs des paramètres mécaniques sont celles du Tableau 19. On montre à chaque fois la répartition des contraintes principales puis la distribution des joints ouverts (fissures) correspondantes.

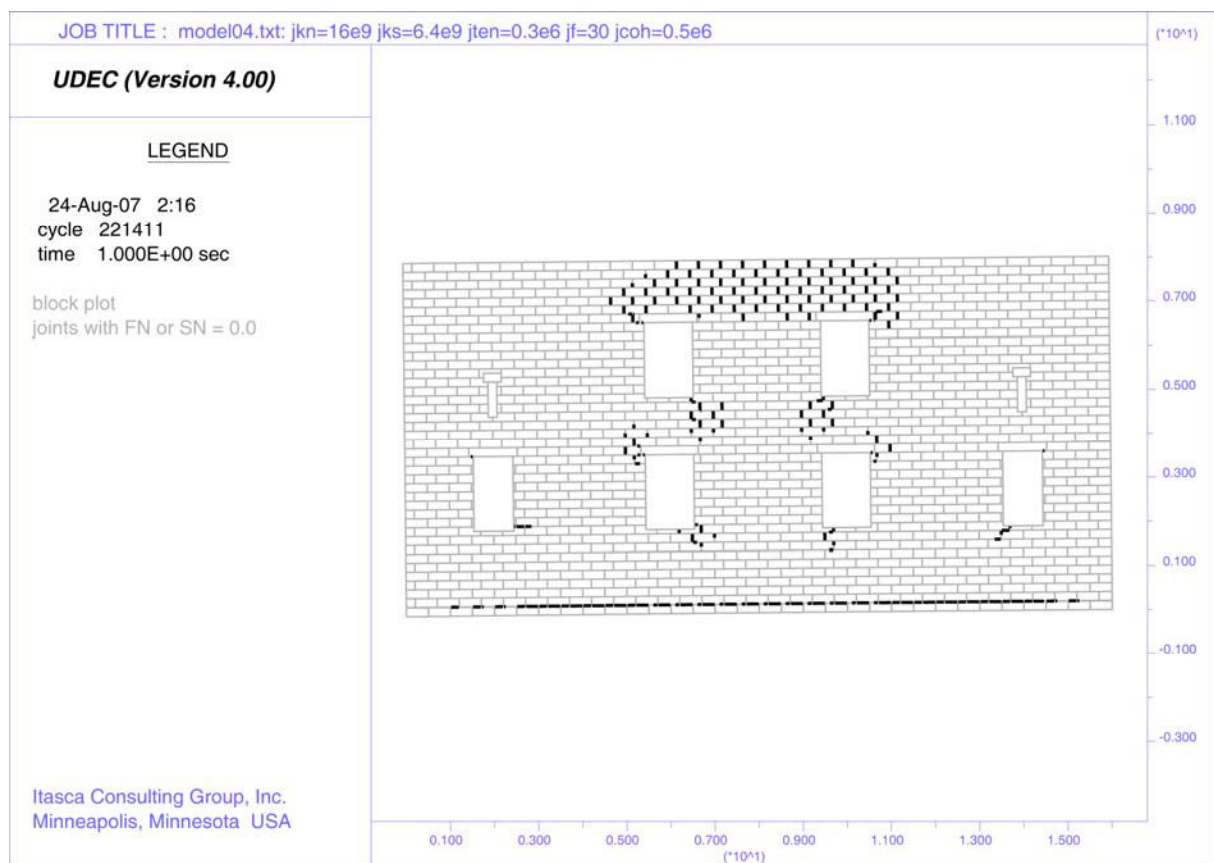






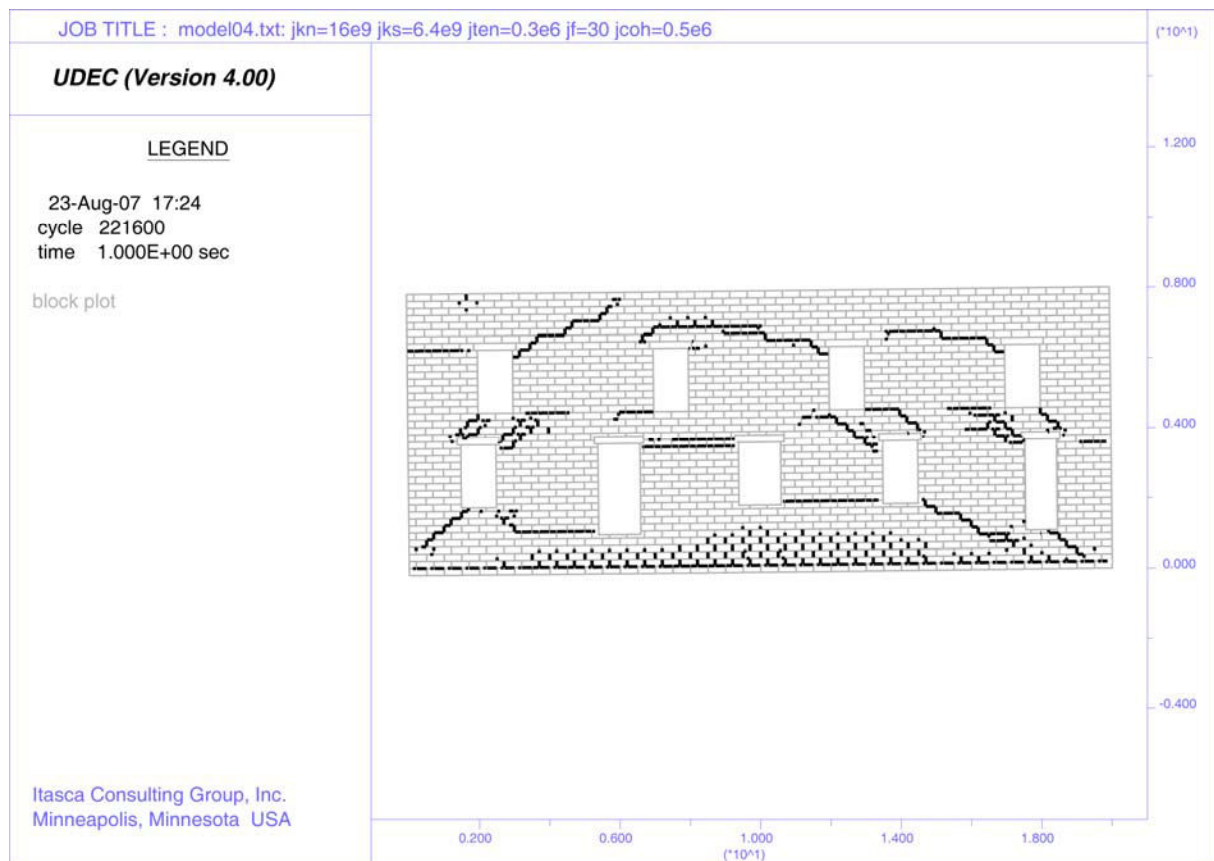


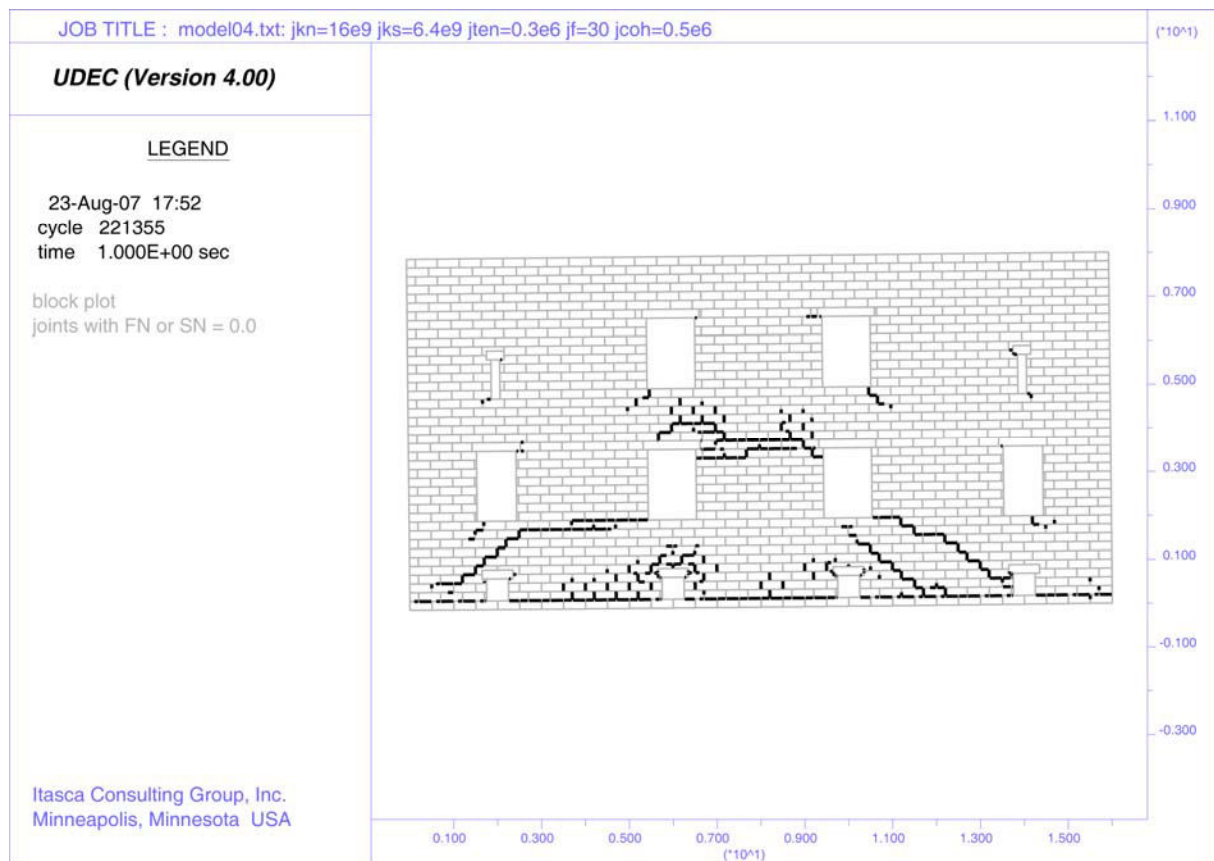
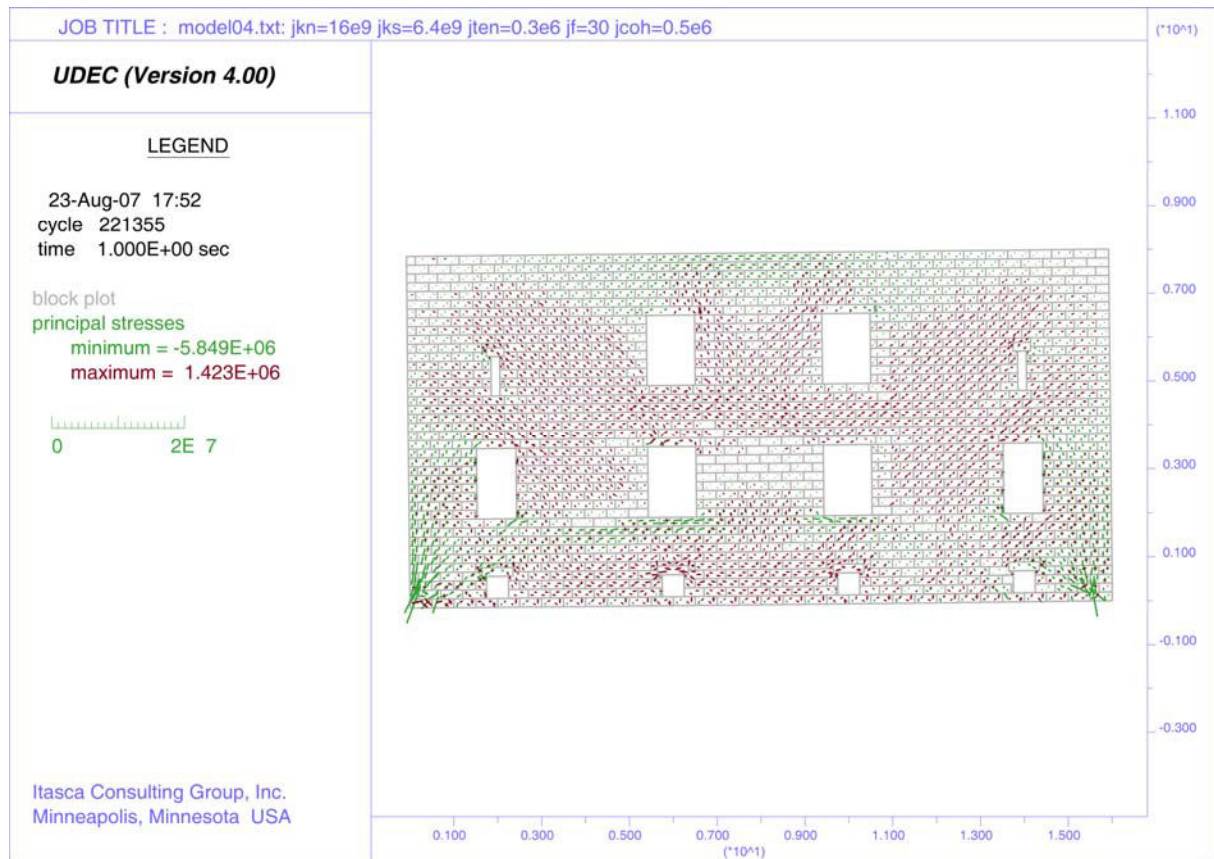


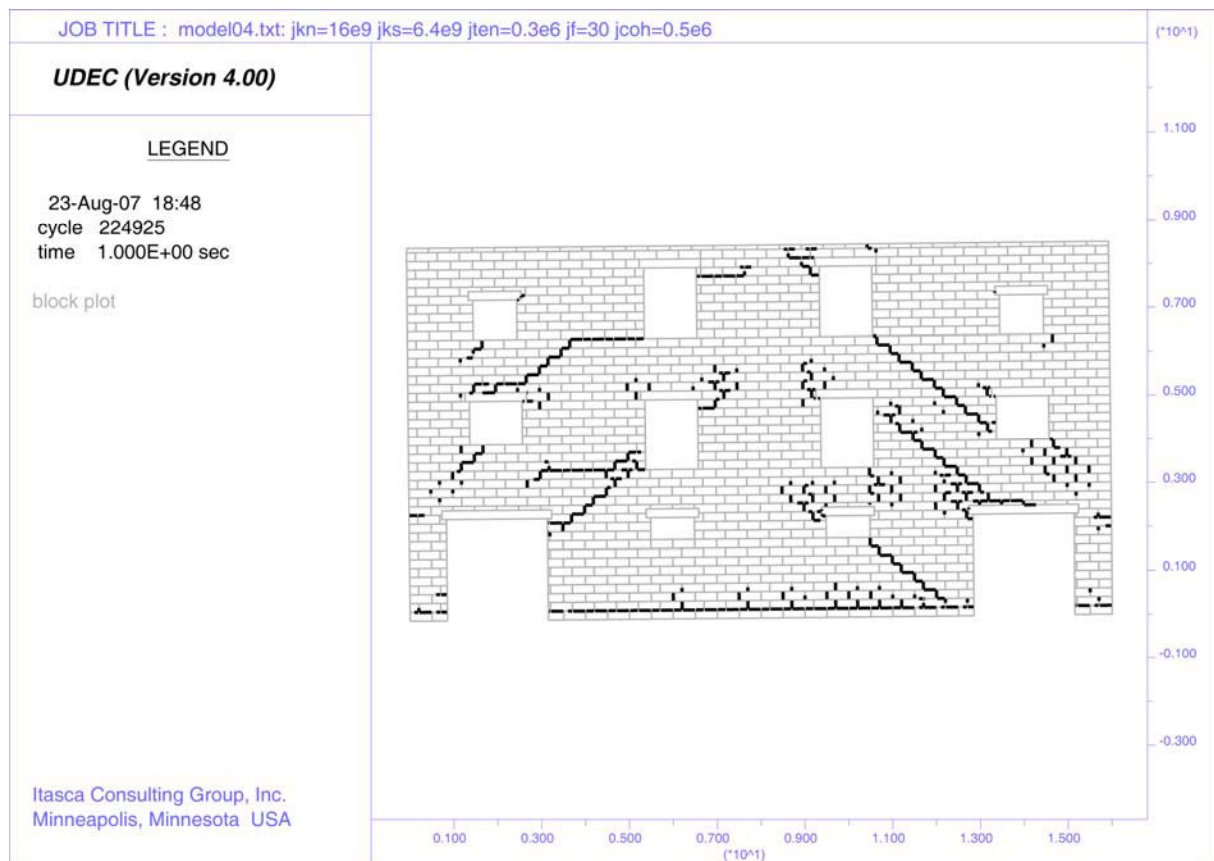
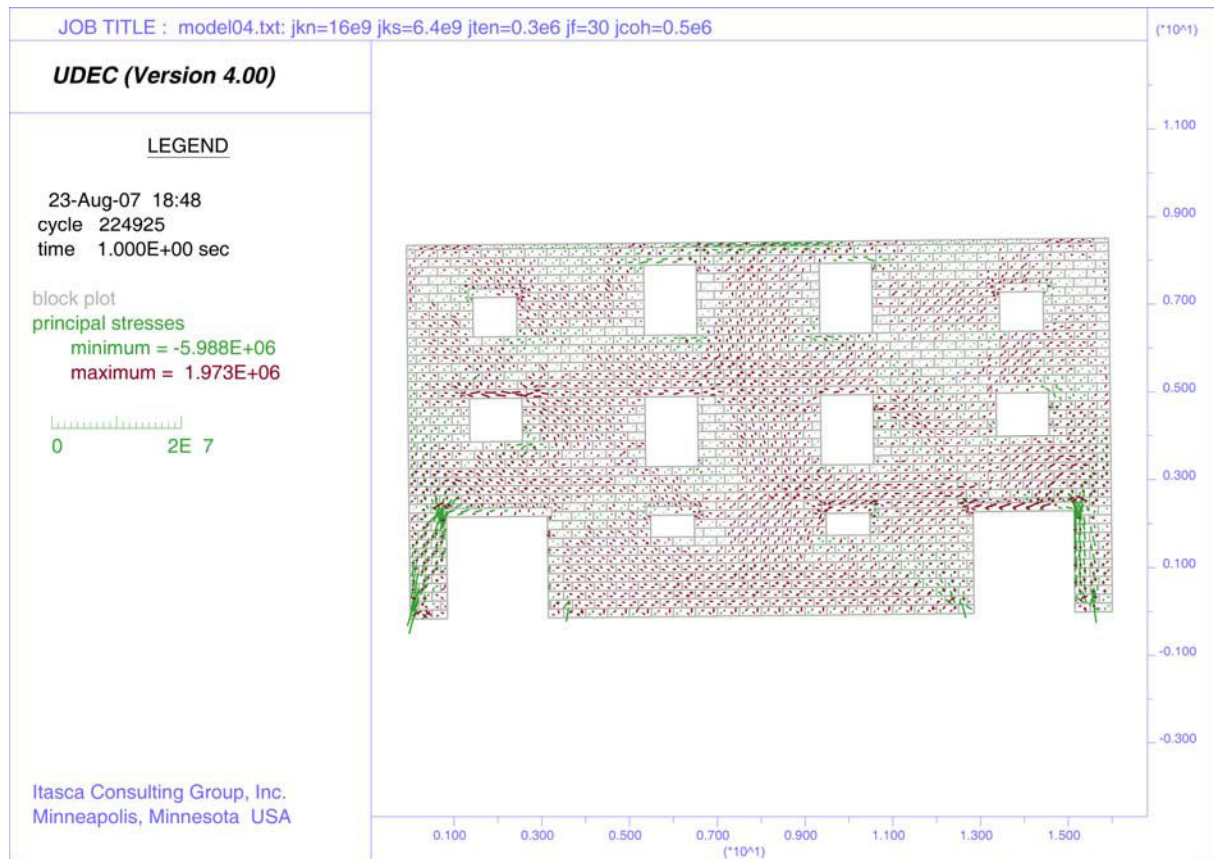


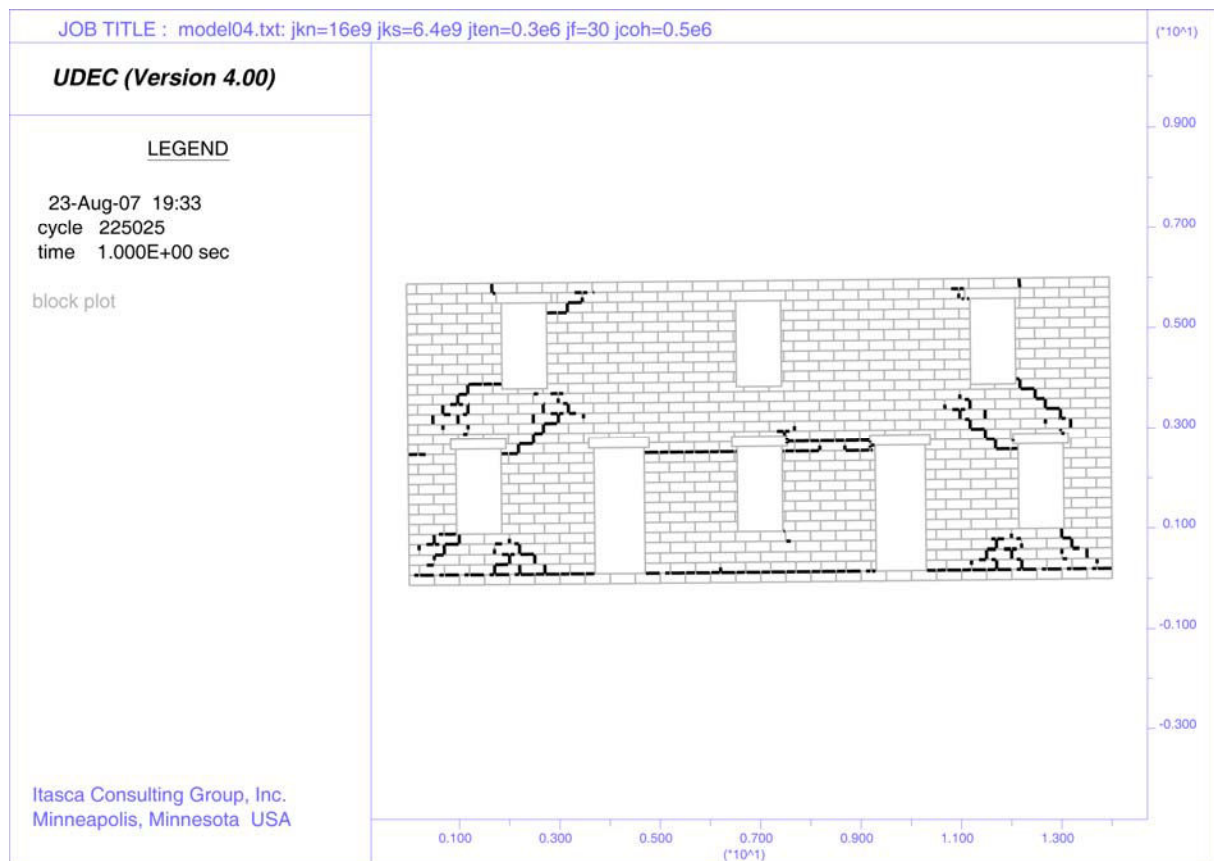
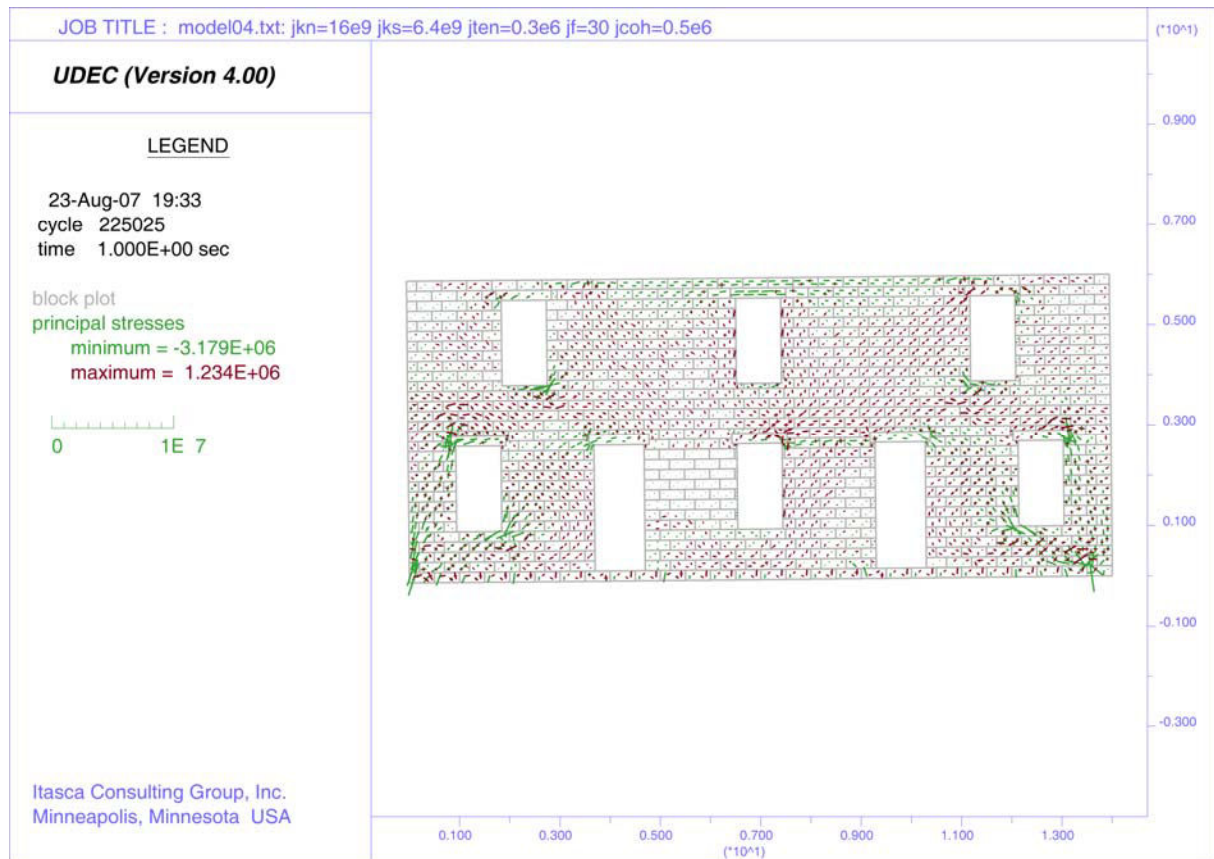
ANNEXE 4

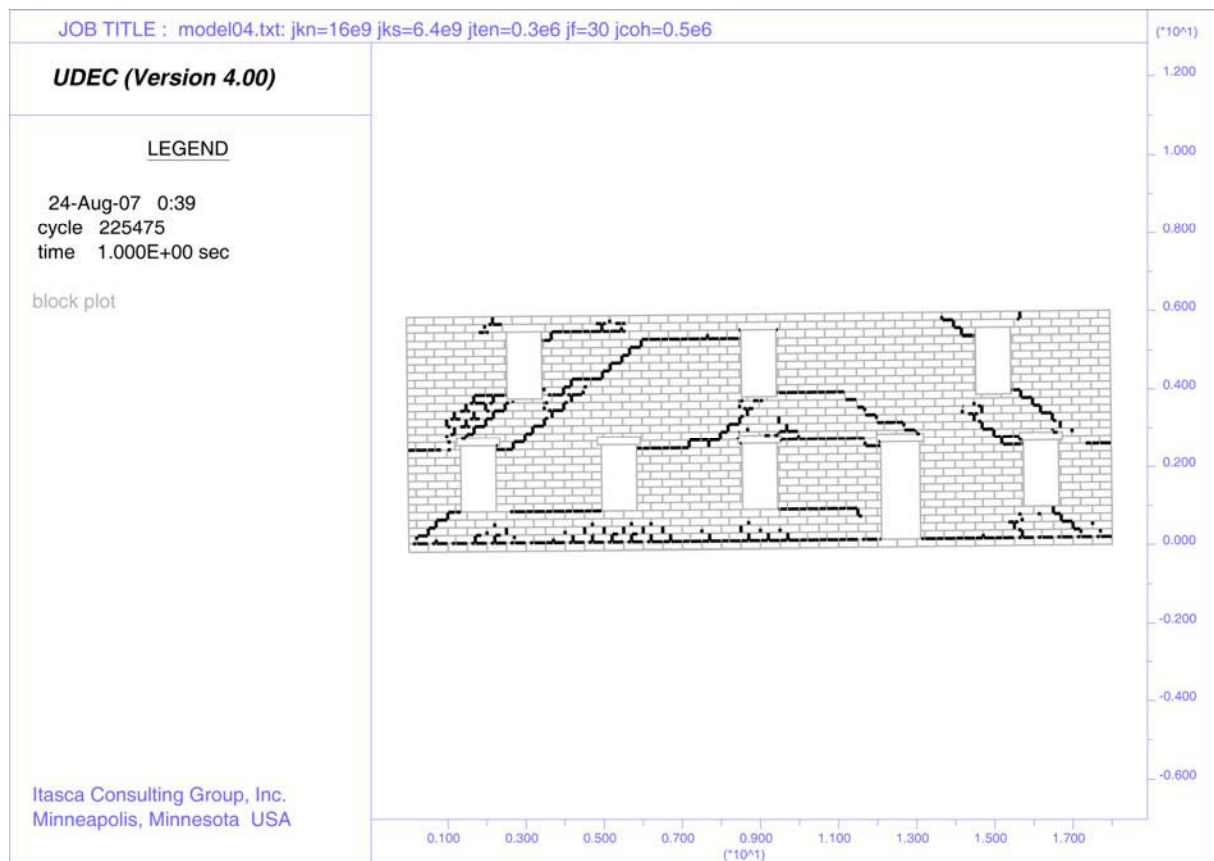
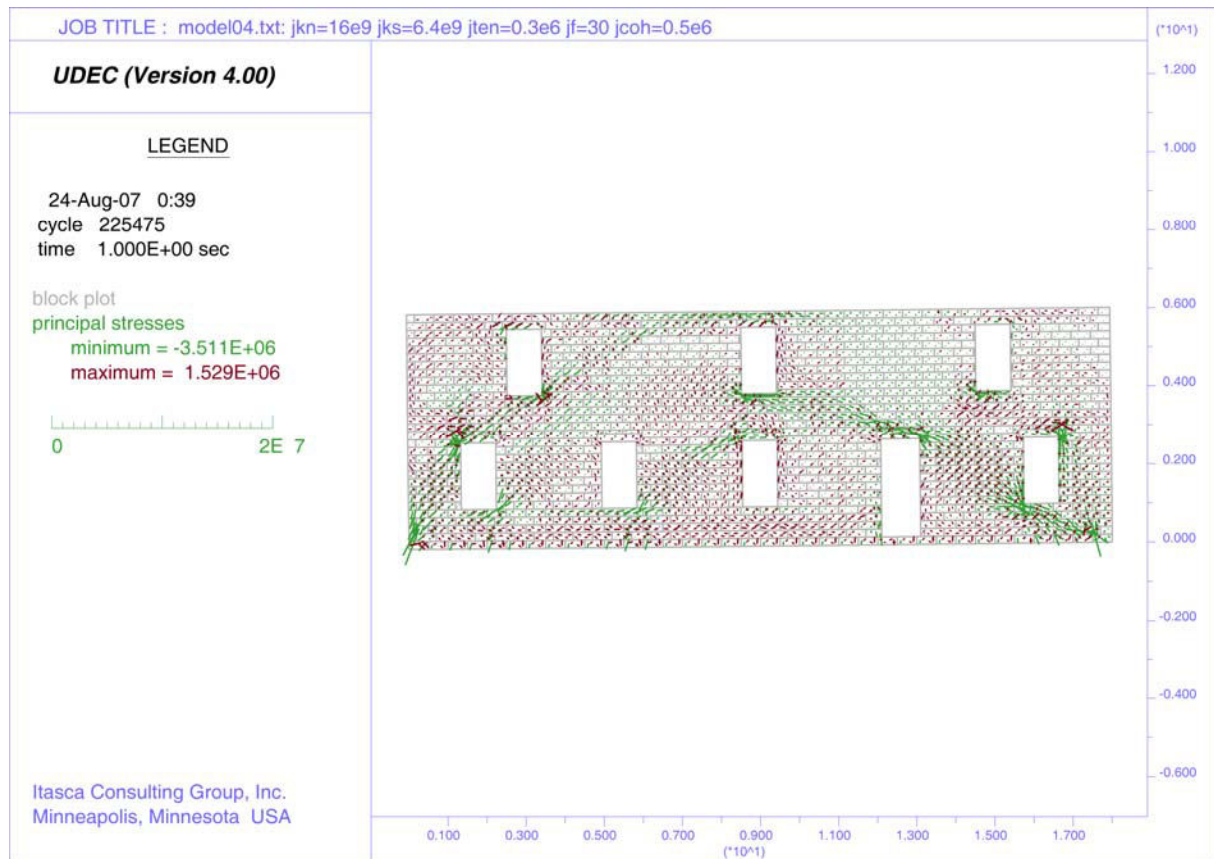
La présente annexe montre quelques exemples de résultats obtenus avec Udec pour plusieurs types de maisons en position concave (en zone de compression des terrains, dans la couronne intérieure, de la cuvette entre le centre et le point d'inflexion telle qu'indiqué sur la Figure 40). Les valeurs des paramètres mécaniques sont celles du Tableau 19. On montre à chaque fois la répartition des contraintes principales puis la distribution des joints ouverts (fissures) correspondante.

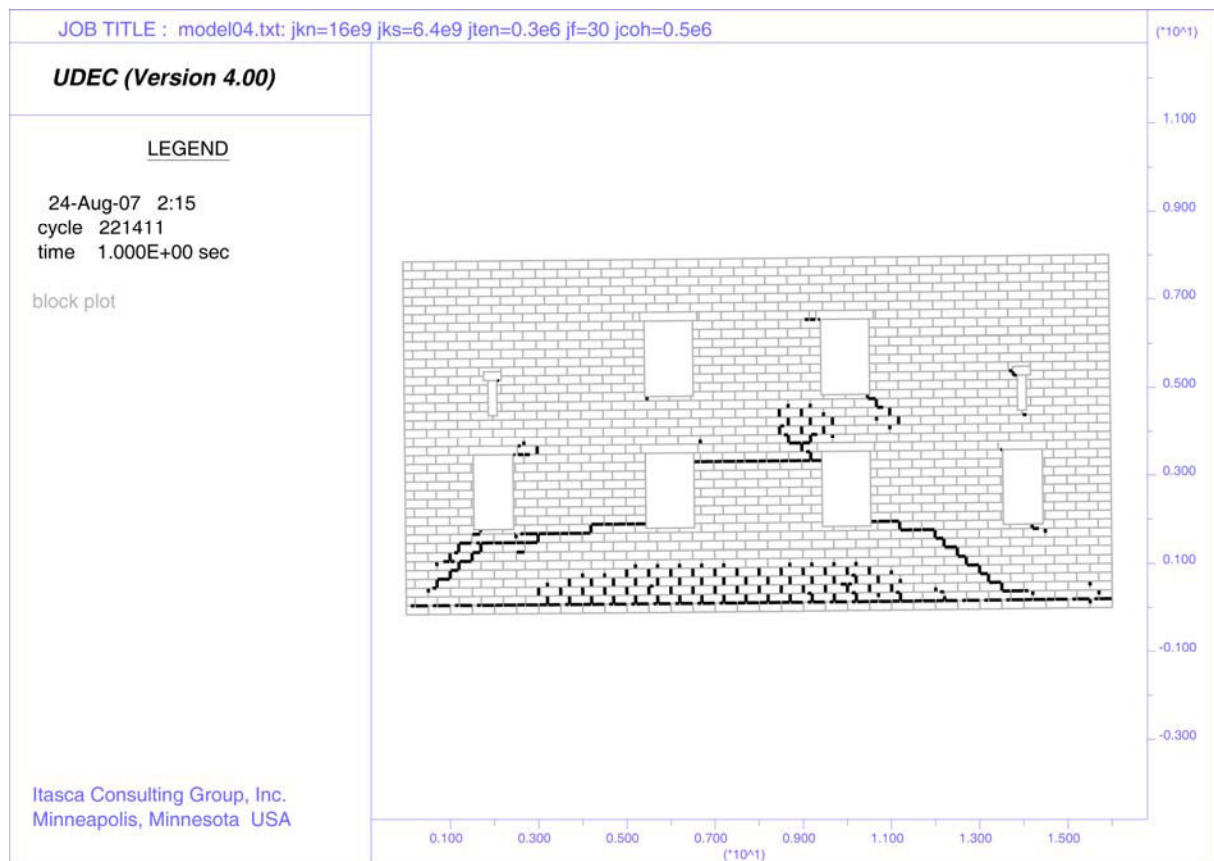








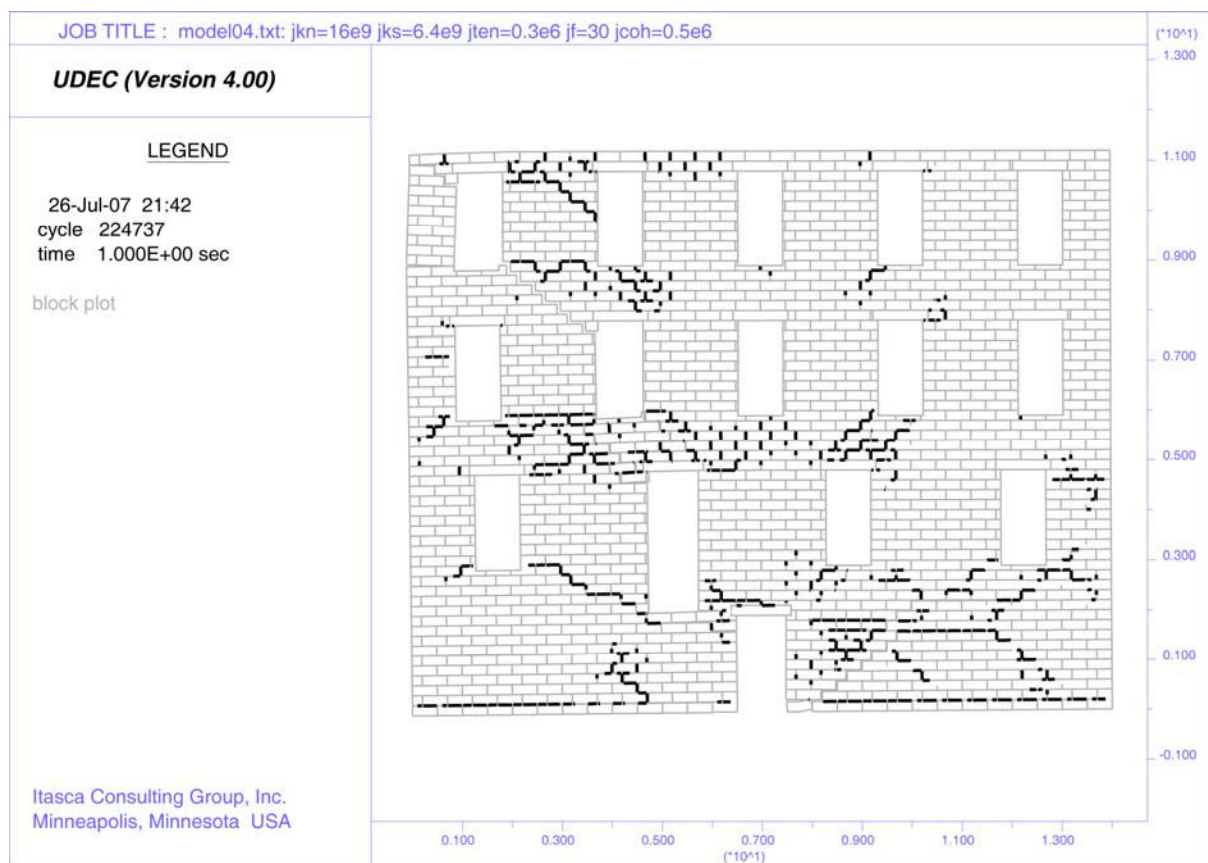
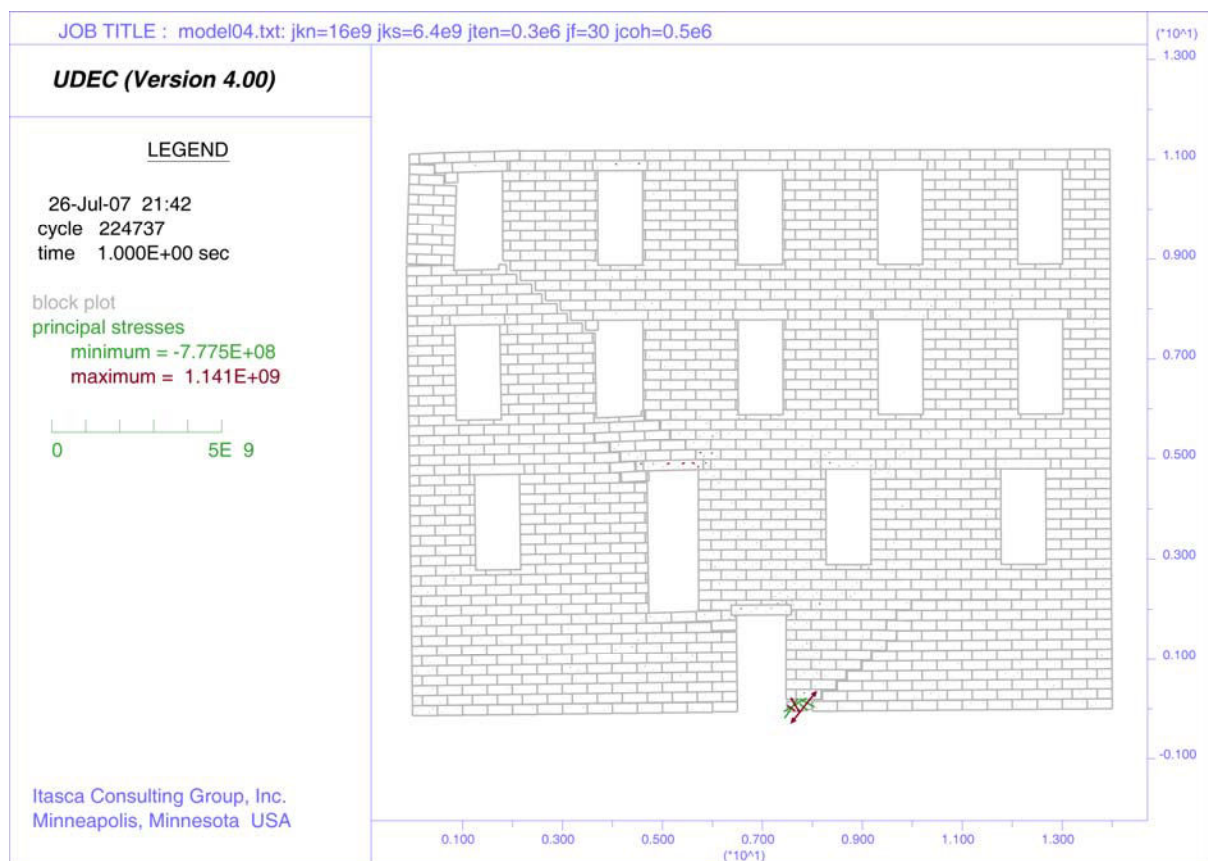


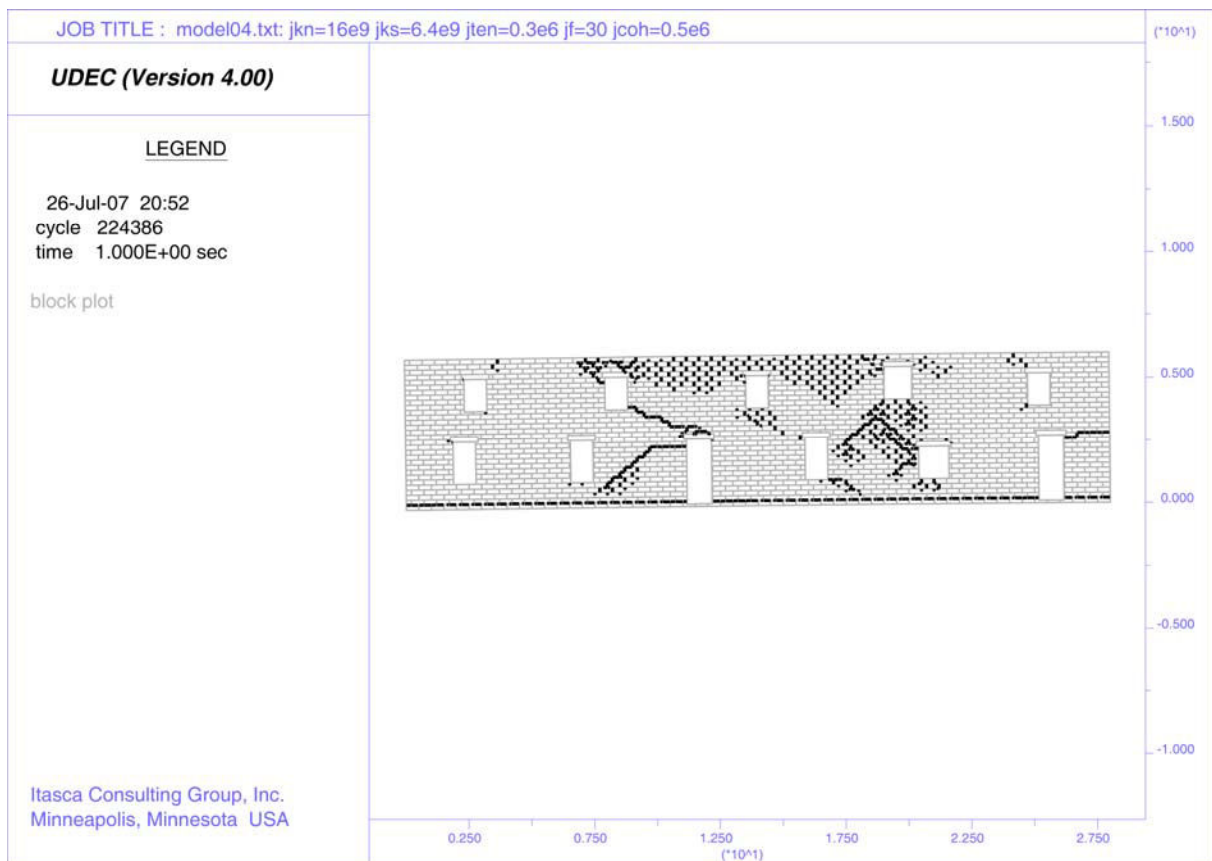
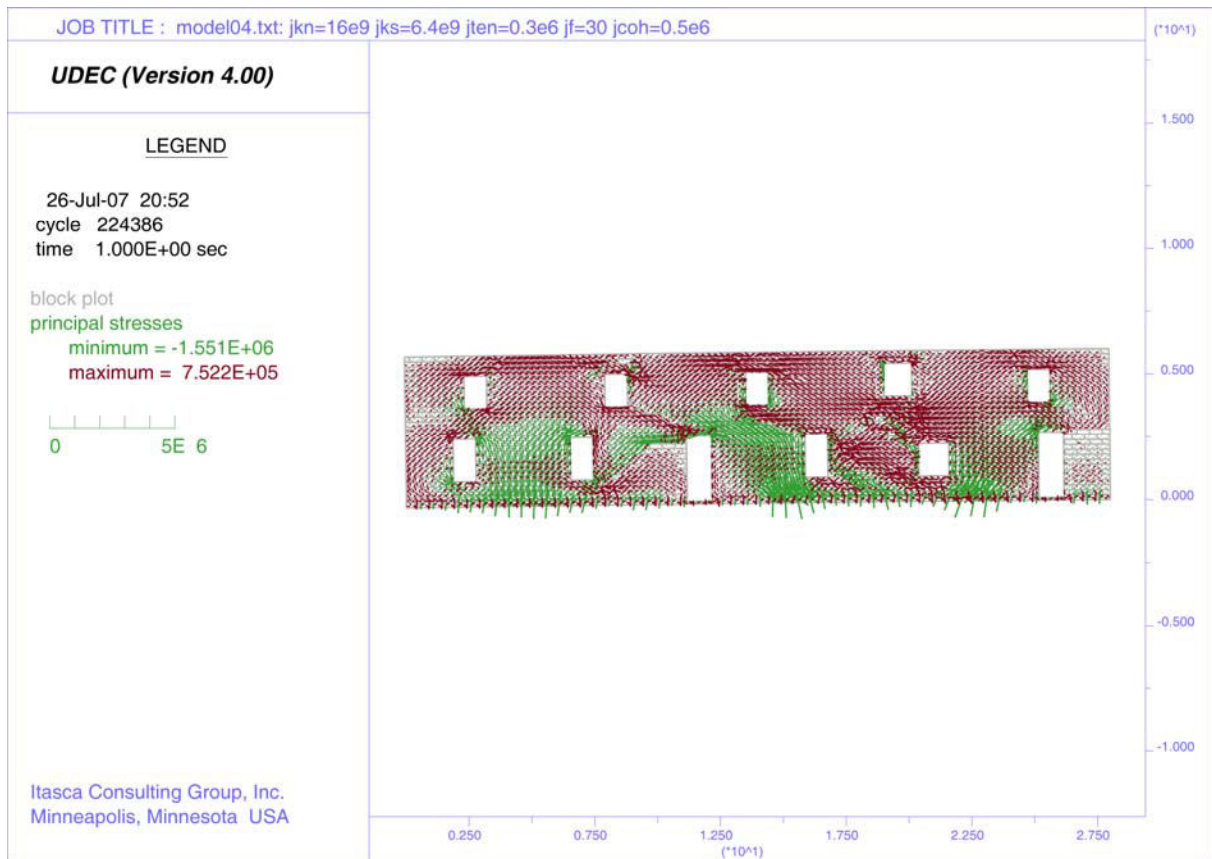


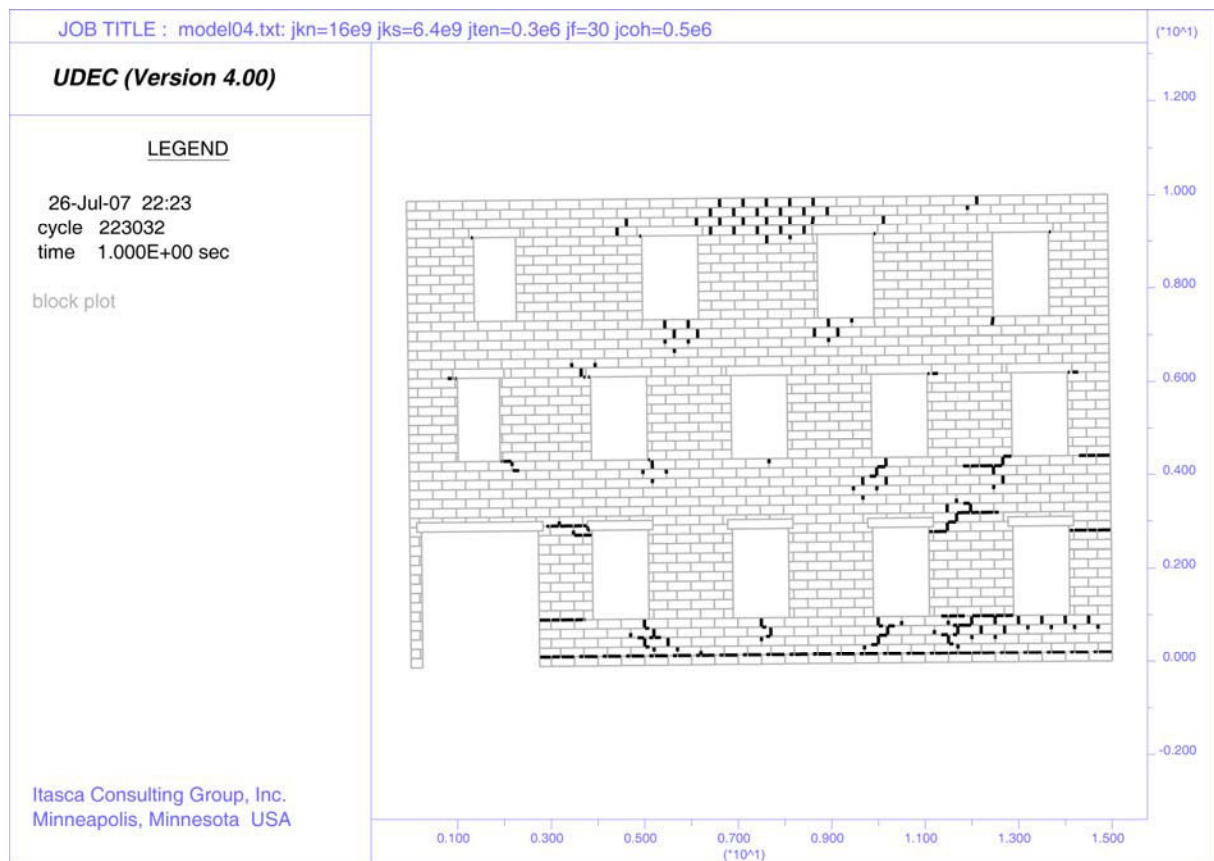
ANNEXE 5

La présente annexe montre quelques exemples de résultats obtenus avec Udec pour plusieurs types de maisons en position convexe (en zone d'extension des terrains, dans la couronne externe, de la cuvette au-delà du point d'inflexion telle qu'indiqué sur la Figure 40). Les valeurs des paramètres mécaniques sont celles du Tableau 19. On montre à chaque fois la répartition des contraintes principales puis la distribution des joints ouverts (fissures) correspondantes.



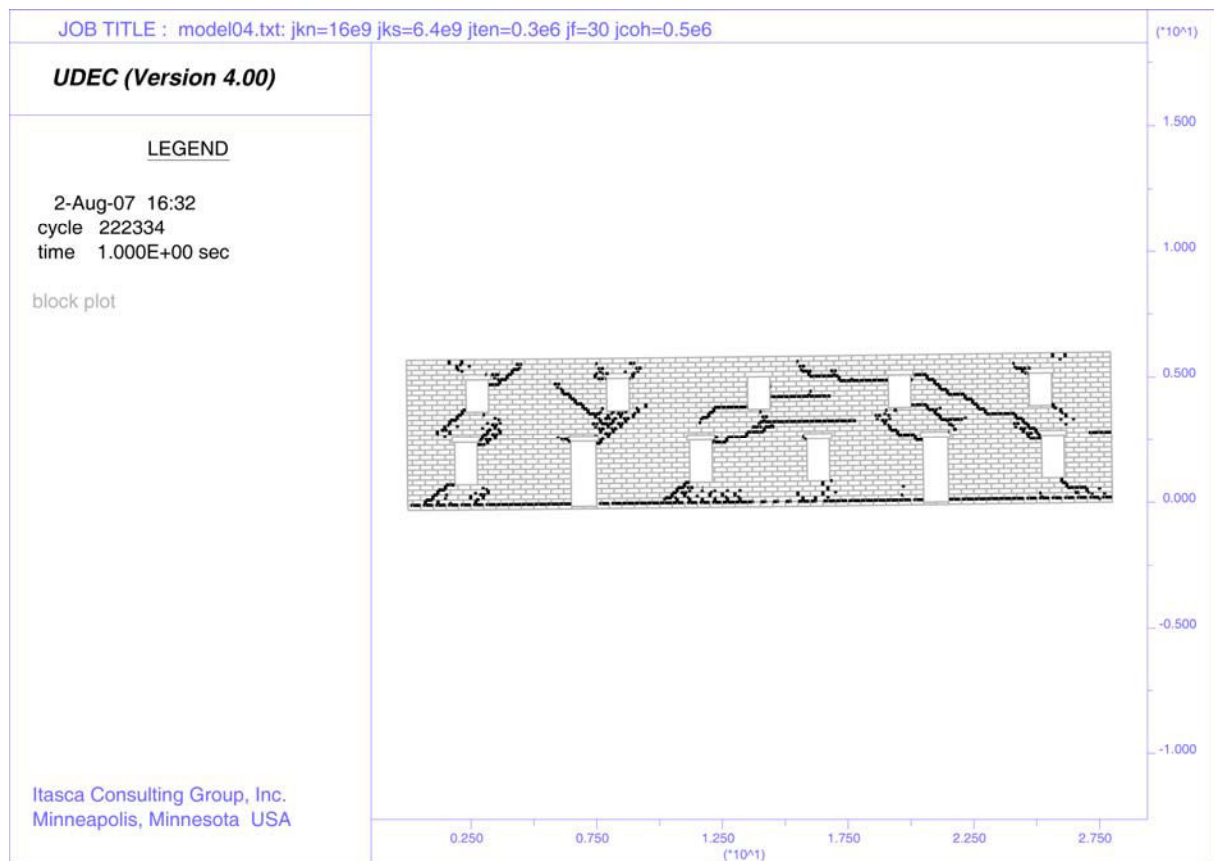
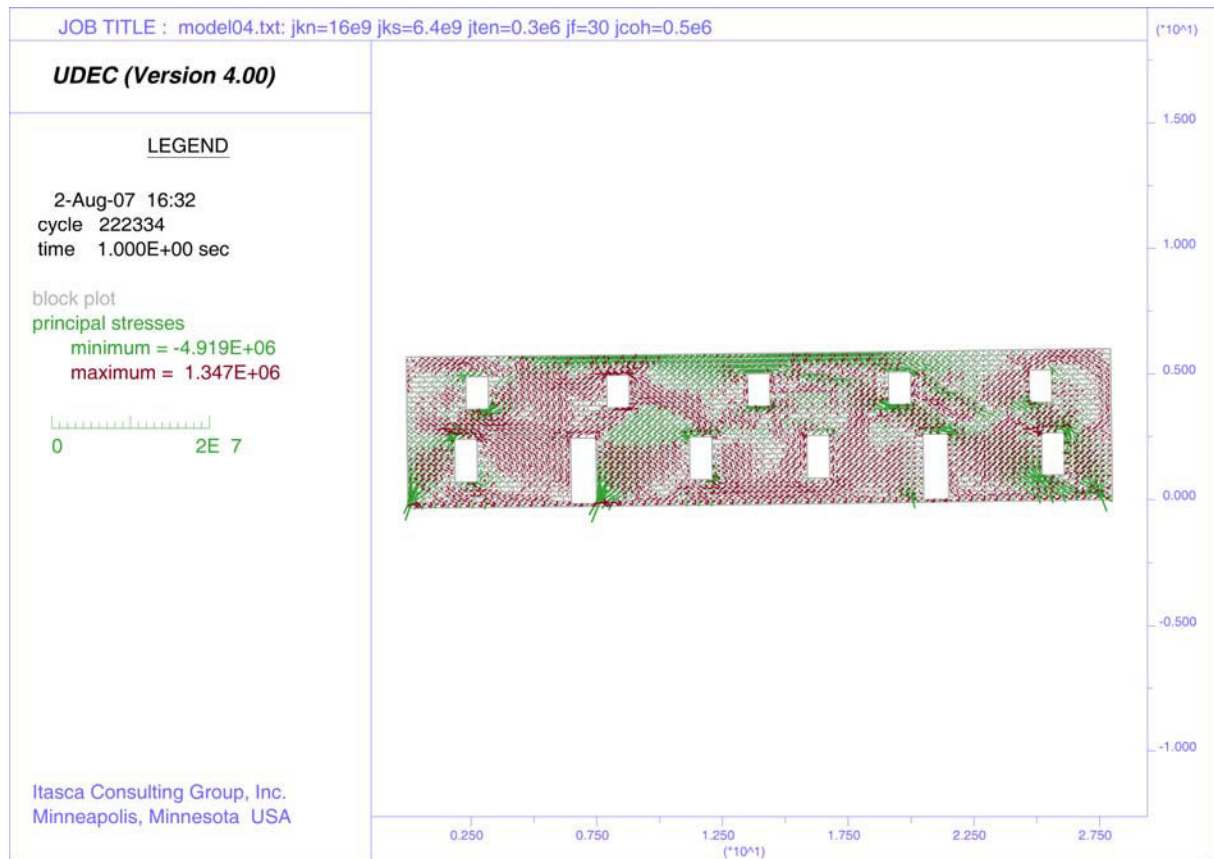


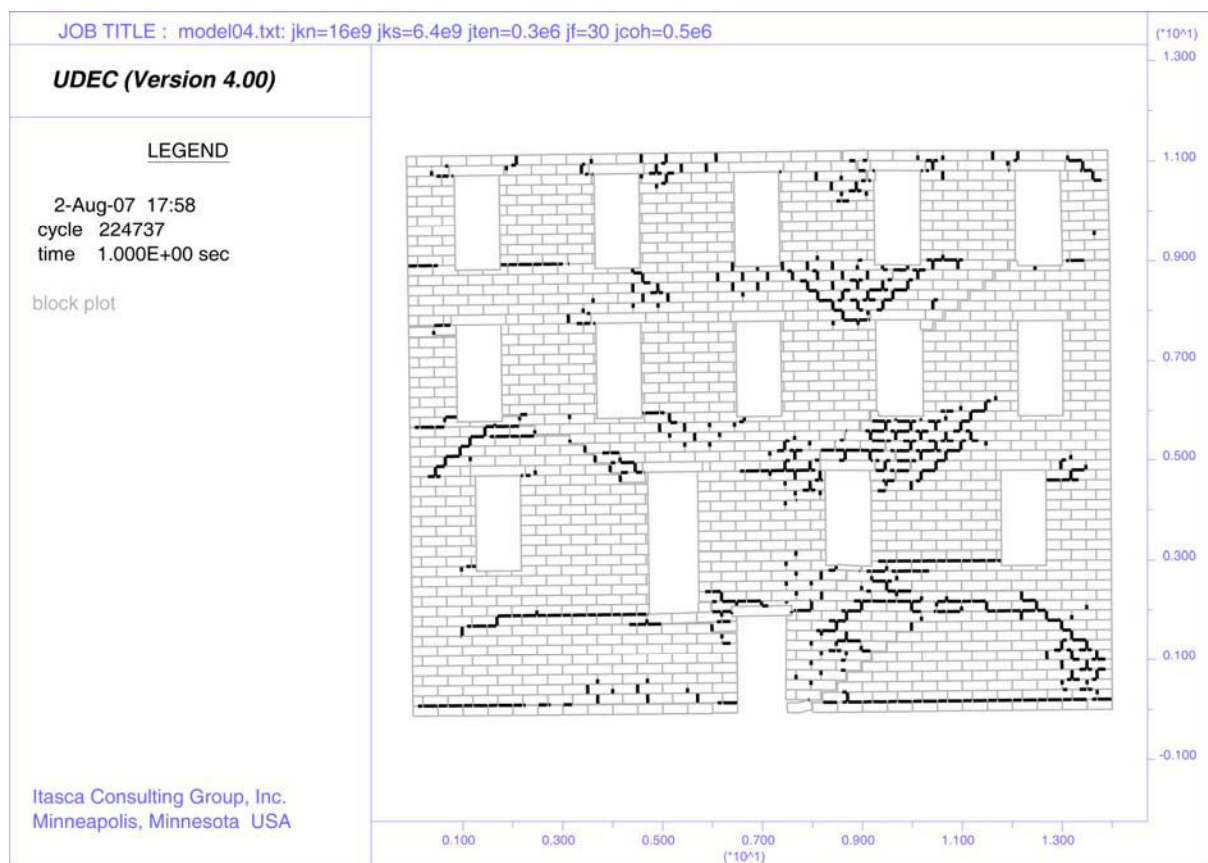
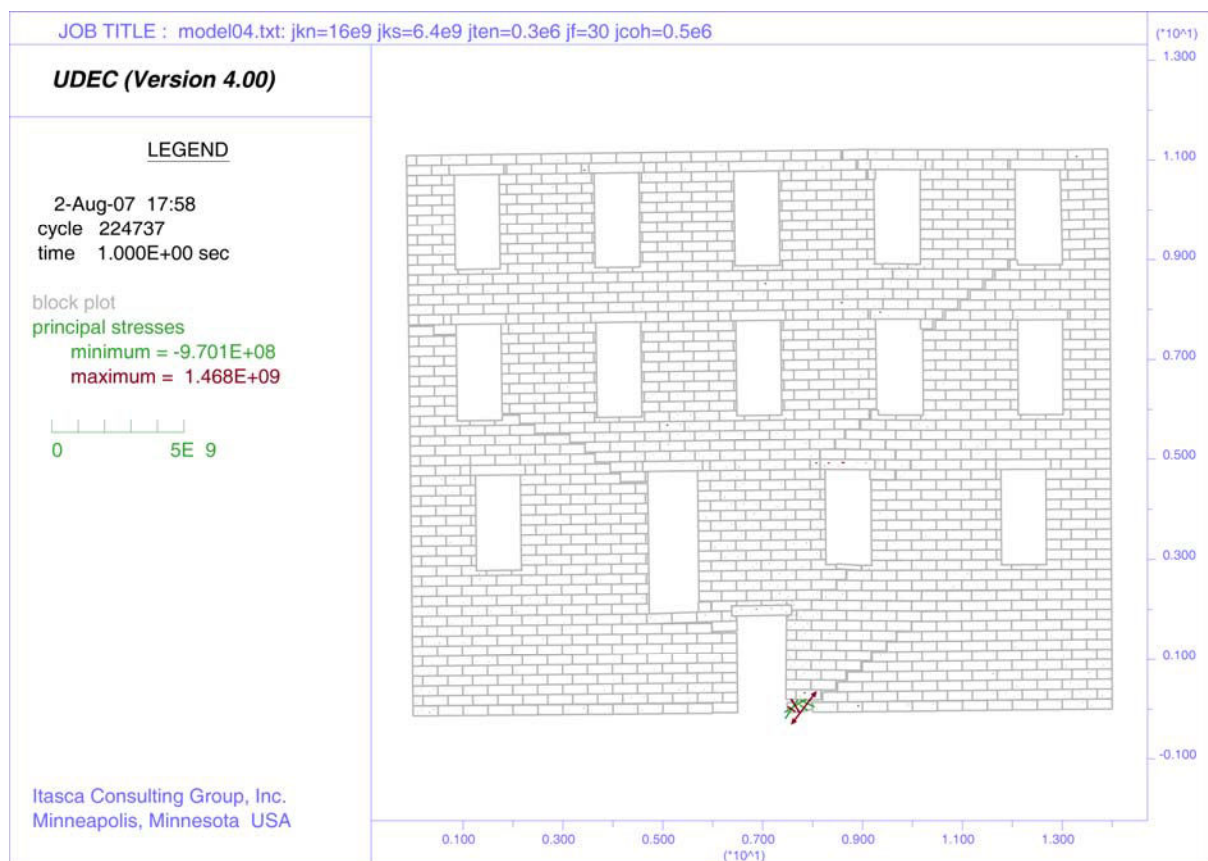


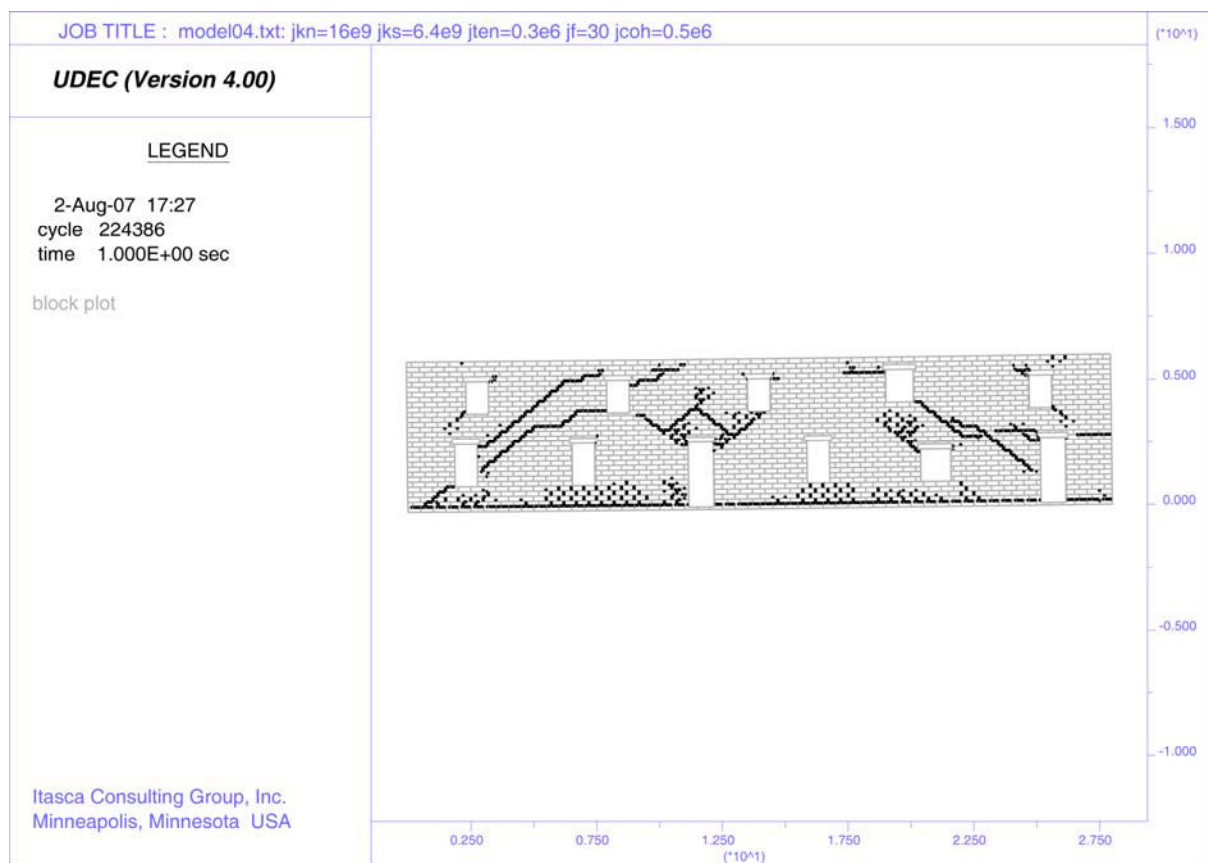


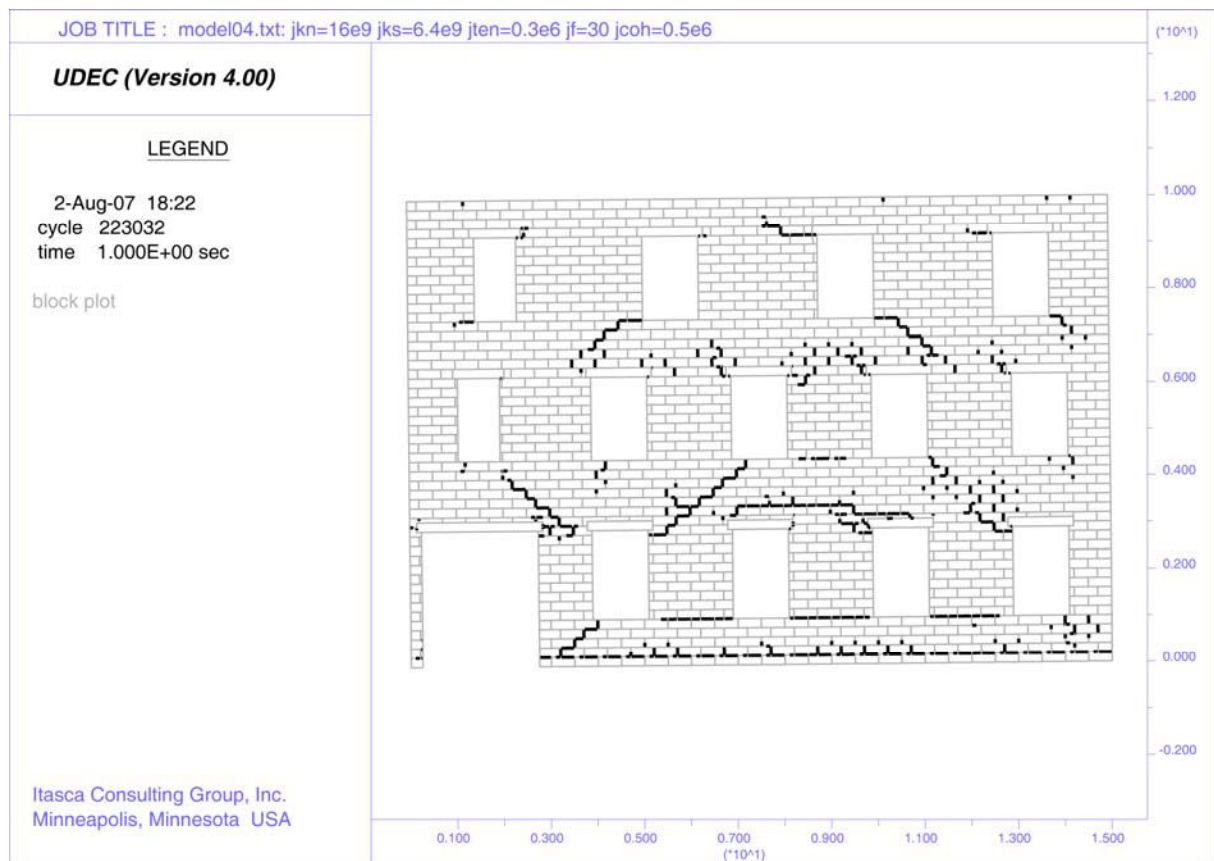
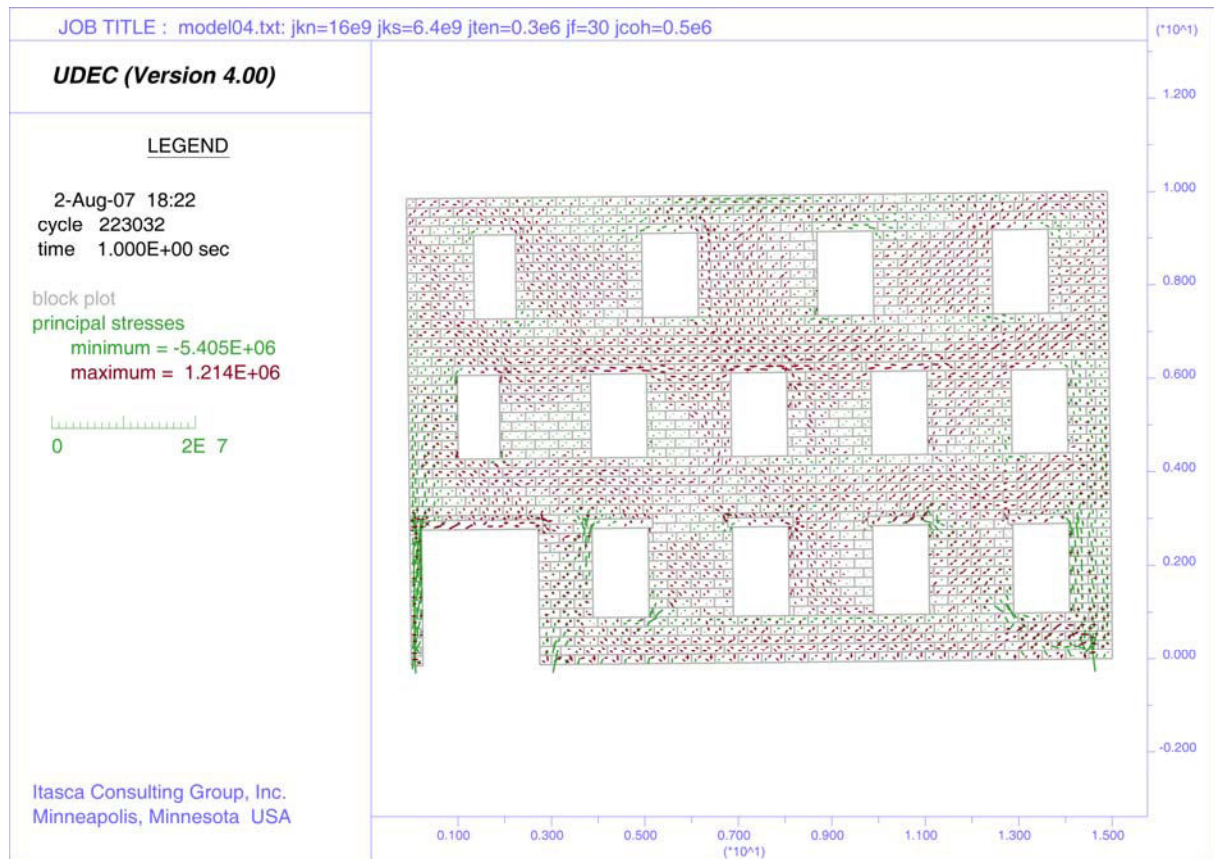
ANNEXE 6

La présente annexe montre quelques exemples de résultats obtenus avec Udec pour plusieurs types de maisons en position concave (en zone de compression des terrains, dans la couronne intérieure, de la cuvette entre le centre et le point d'inflexion telle qu'indiqué sur la Figure 40). Les valeurs des paramètres mécaniques sont celles du Tableau 19. On montre à chaque fois la répartition des contraintes principales puis la distribution des joints ouverts (fissures) correspondante.



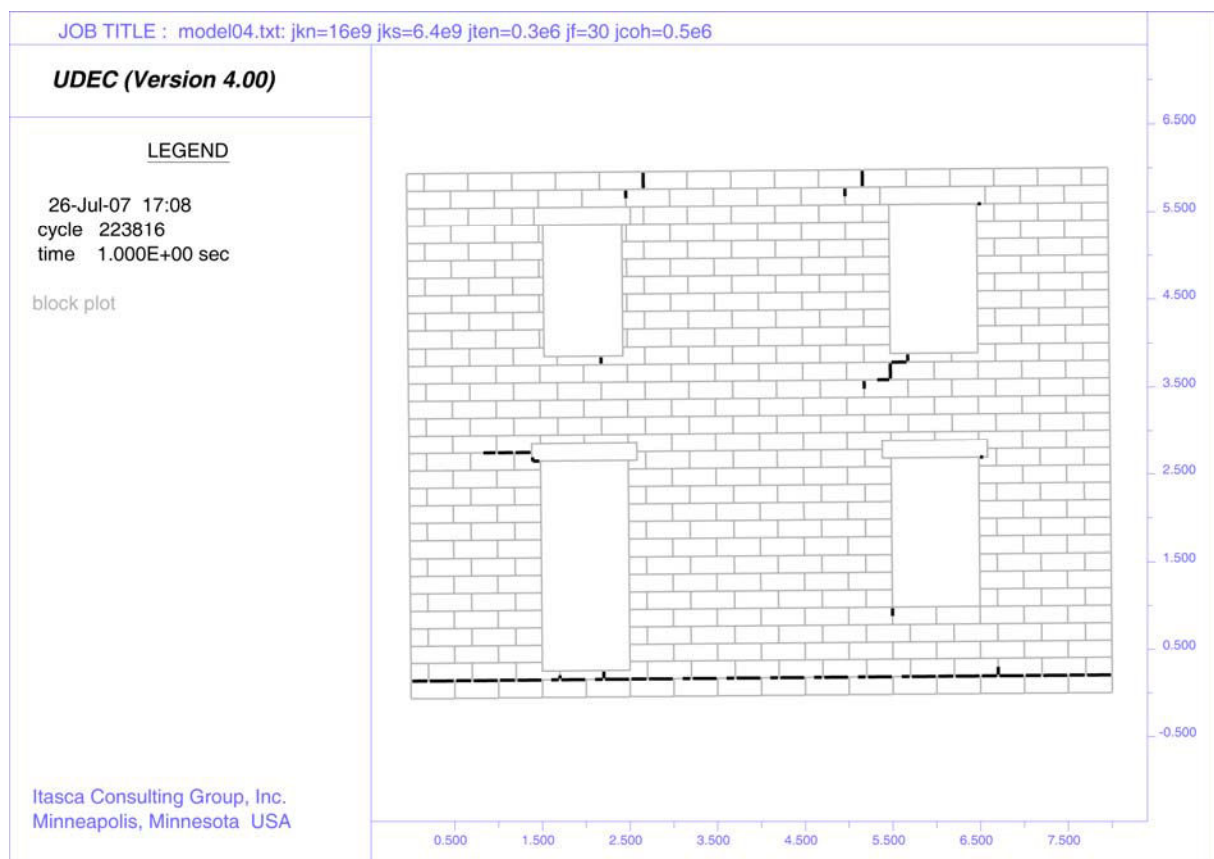
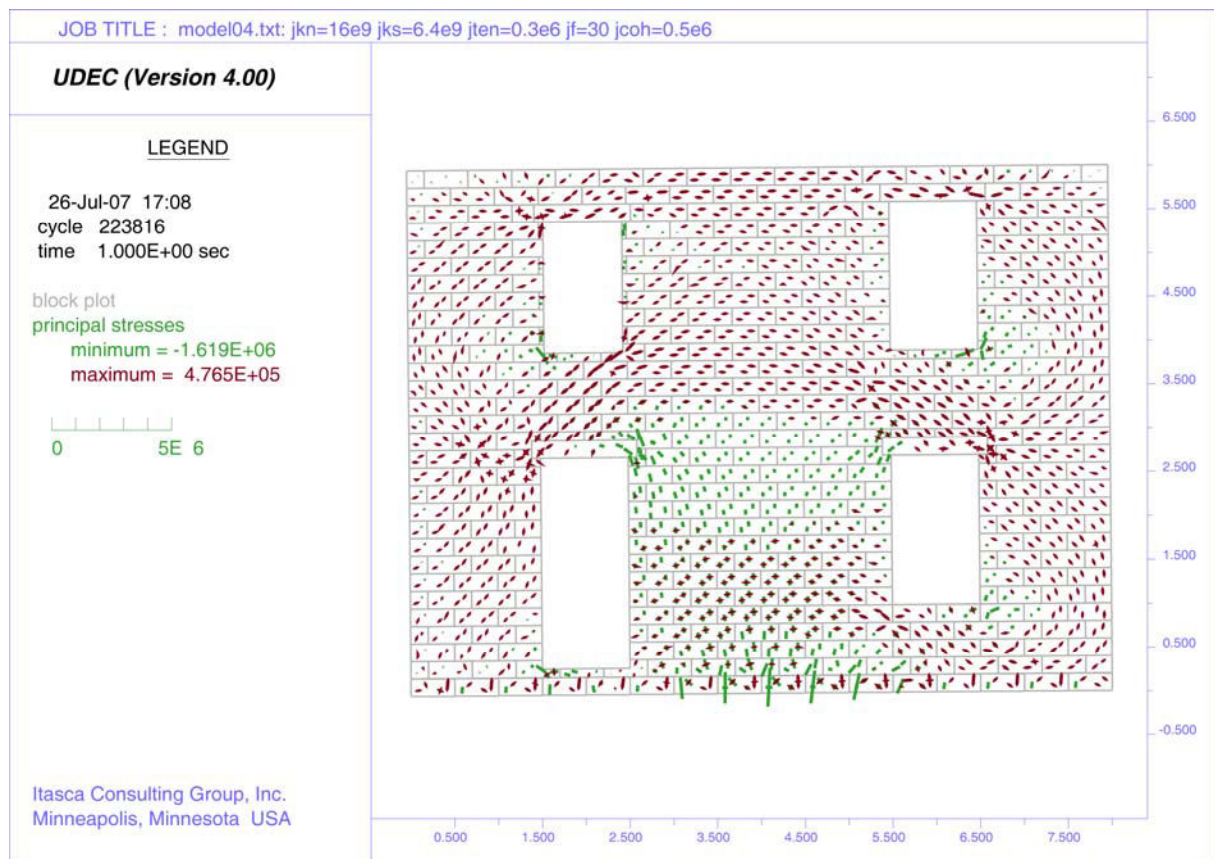


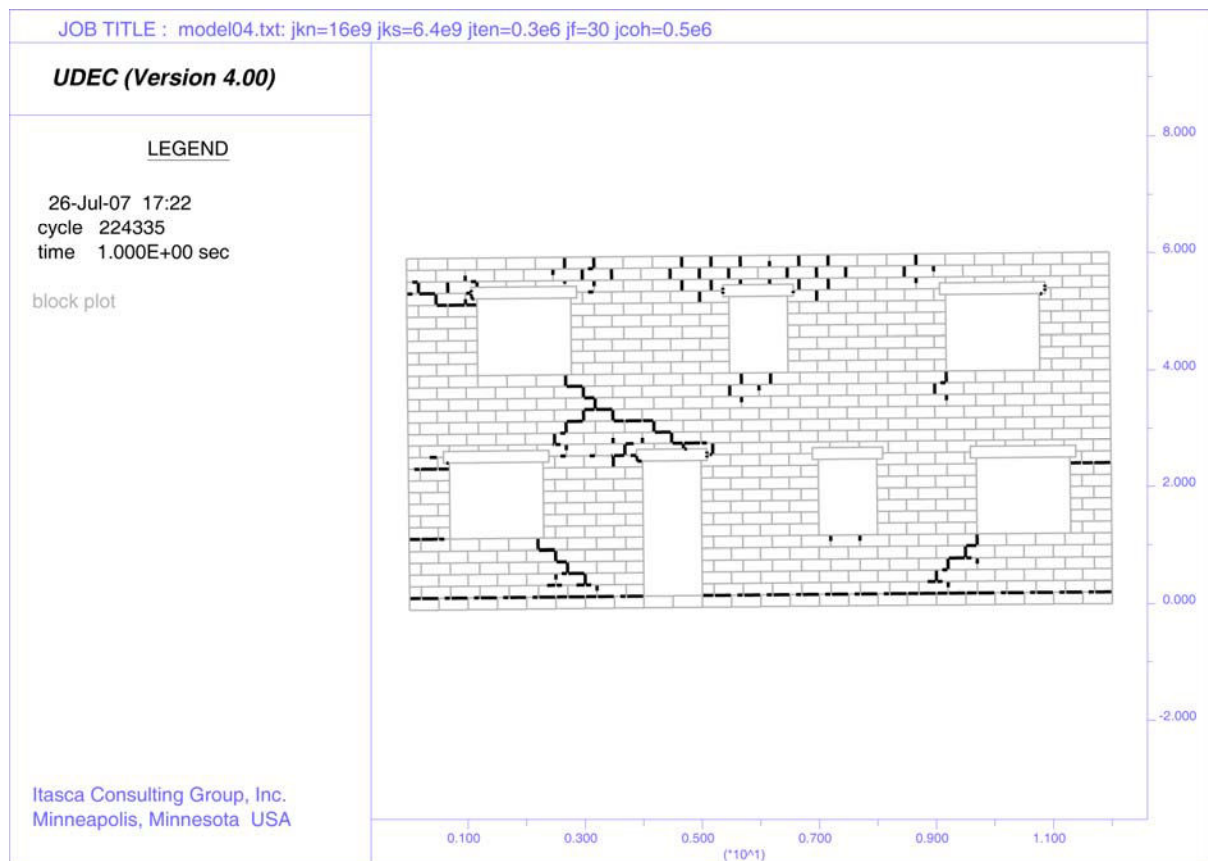


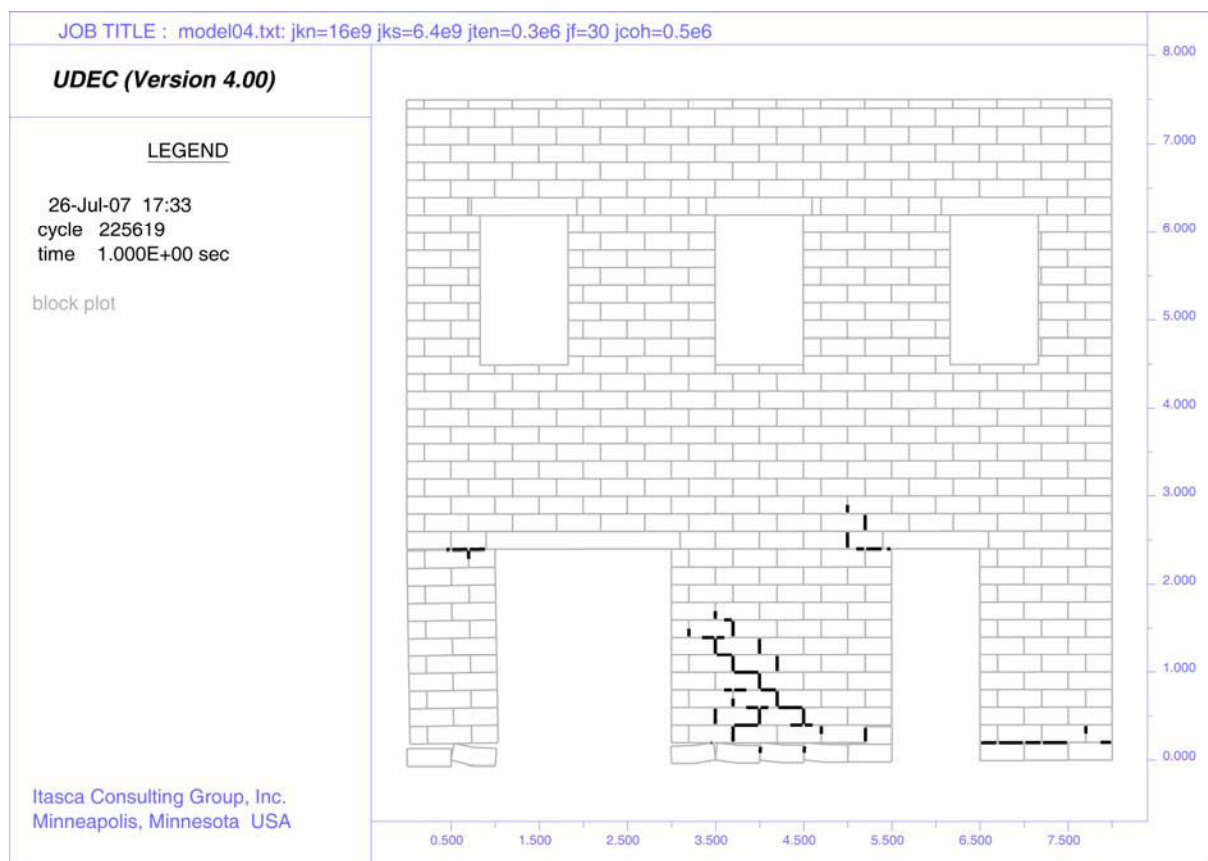
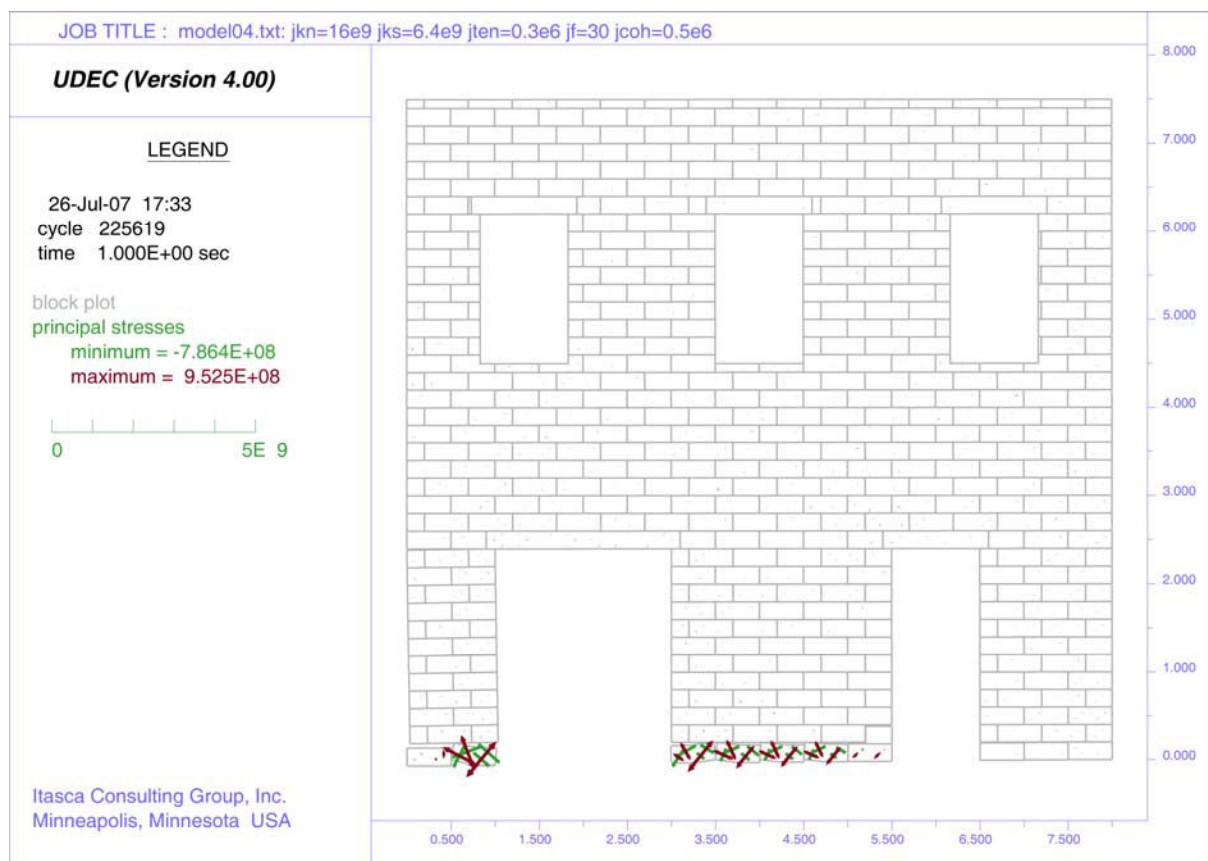


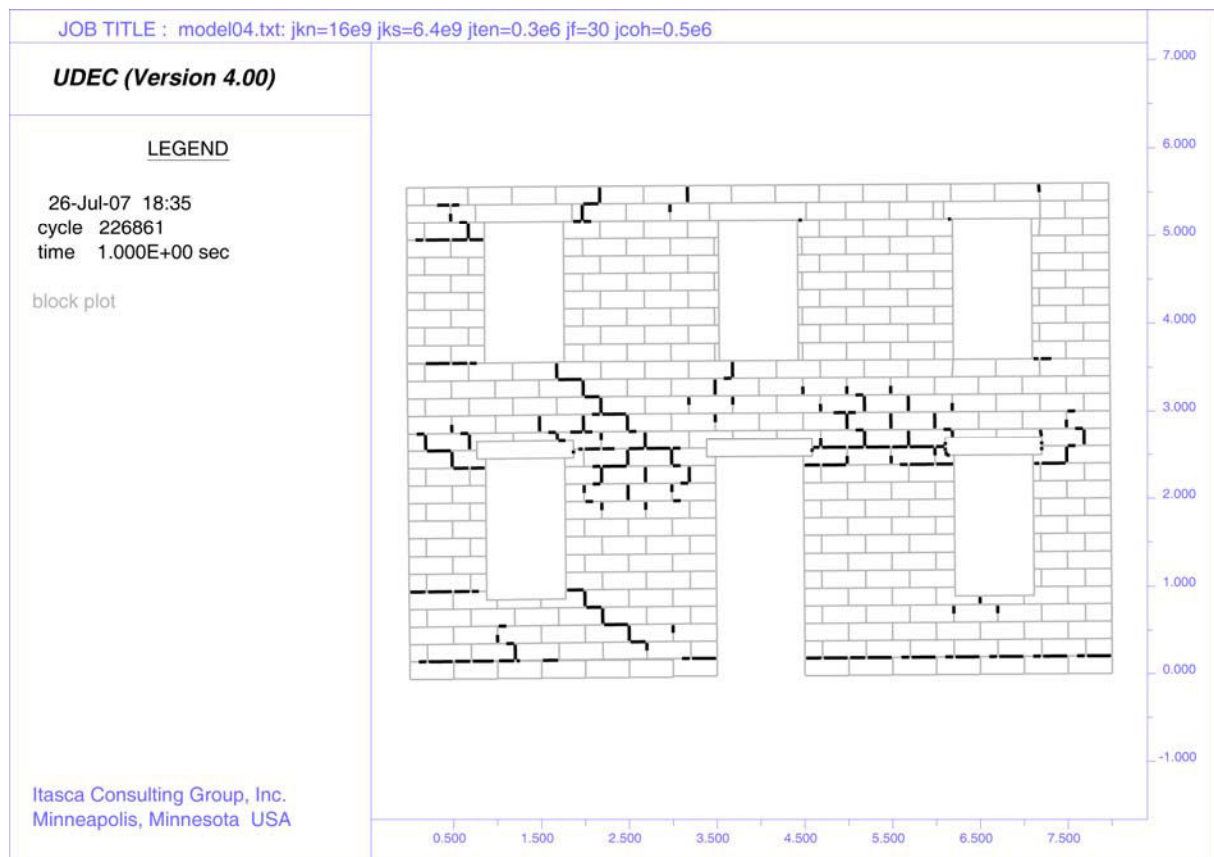
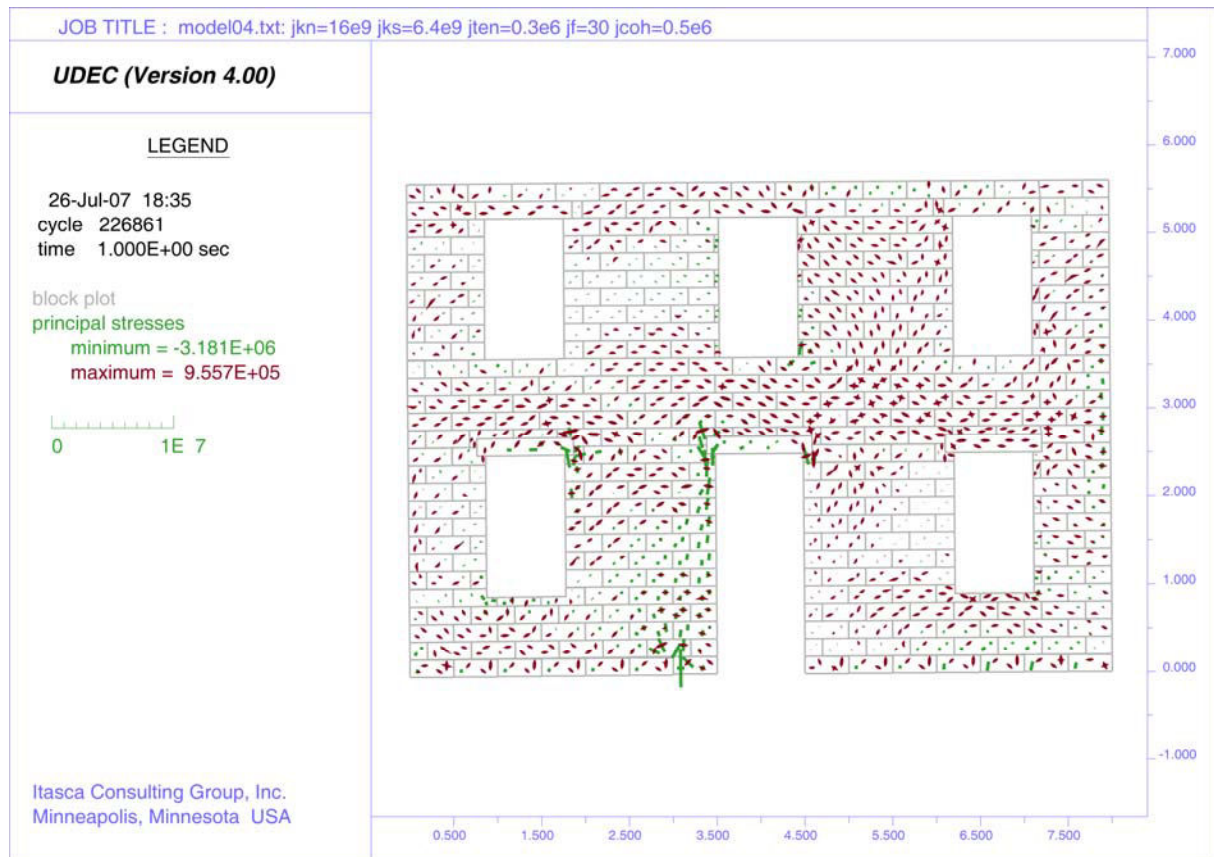
ANNEXE 7

La présente annexe montre quelques exemples de résultats obtenus avec Udec pour plusieurs types de maisons en position convexe (en zone d'extension des terrains, dans la couronne externe, de la cuvette au-delà du point d'inflexion telle qu'indiqué sur la Figure 40). Les valeurs des paramètres mécaniques sont celles du Tableau 19. On montre à chaque fois la répartition des contraintes principales puis la distribution des joints ouverts (fissures) correspondantes.



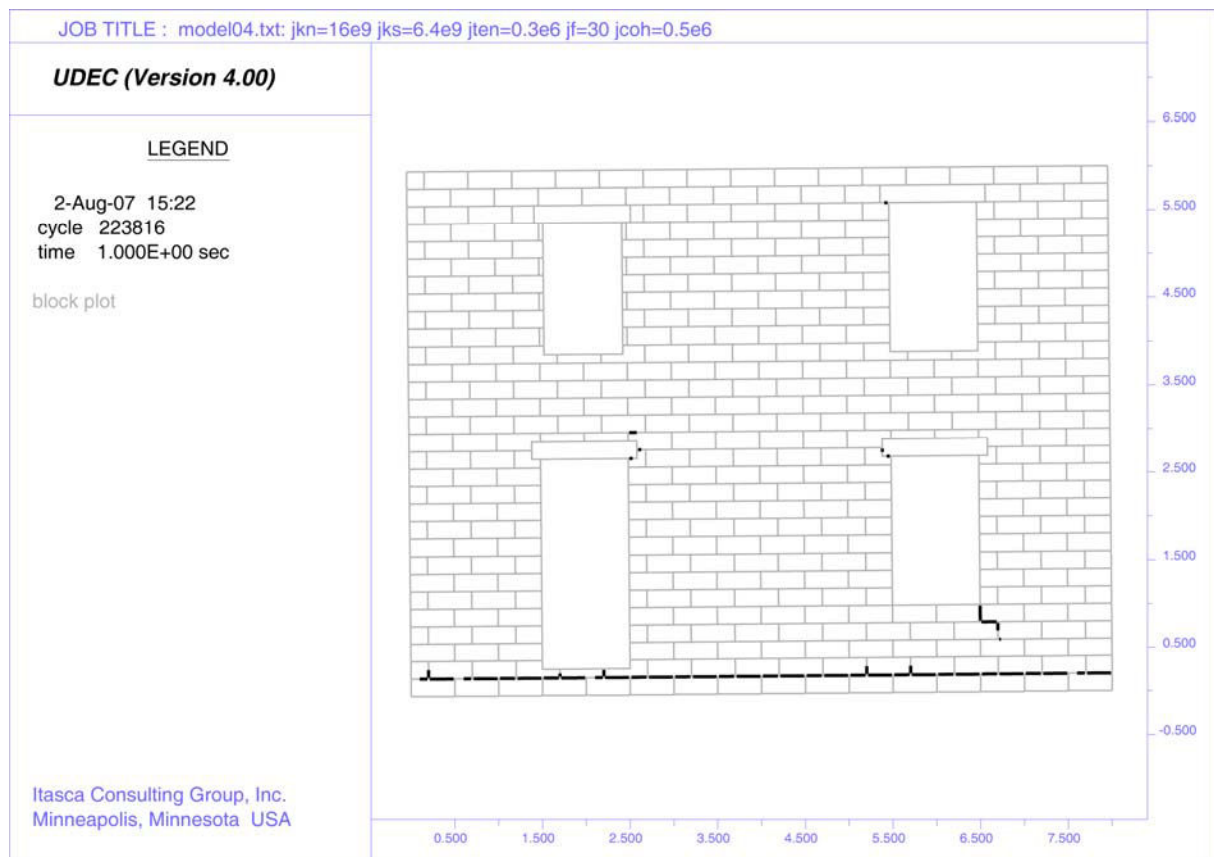
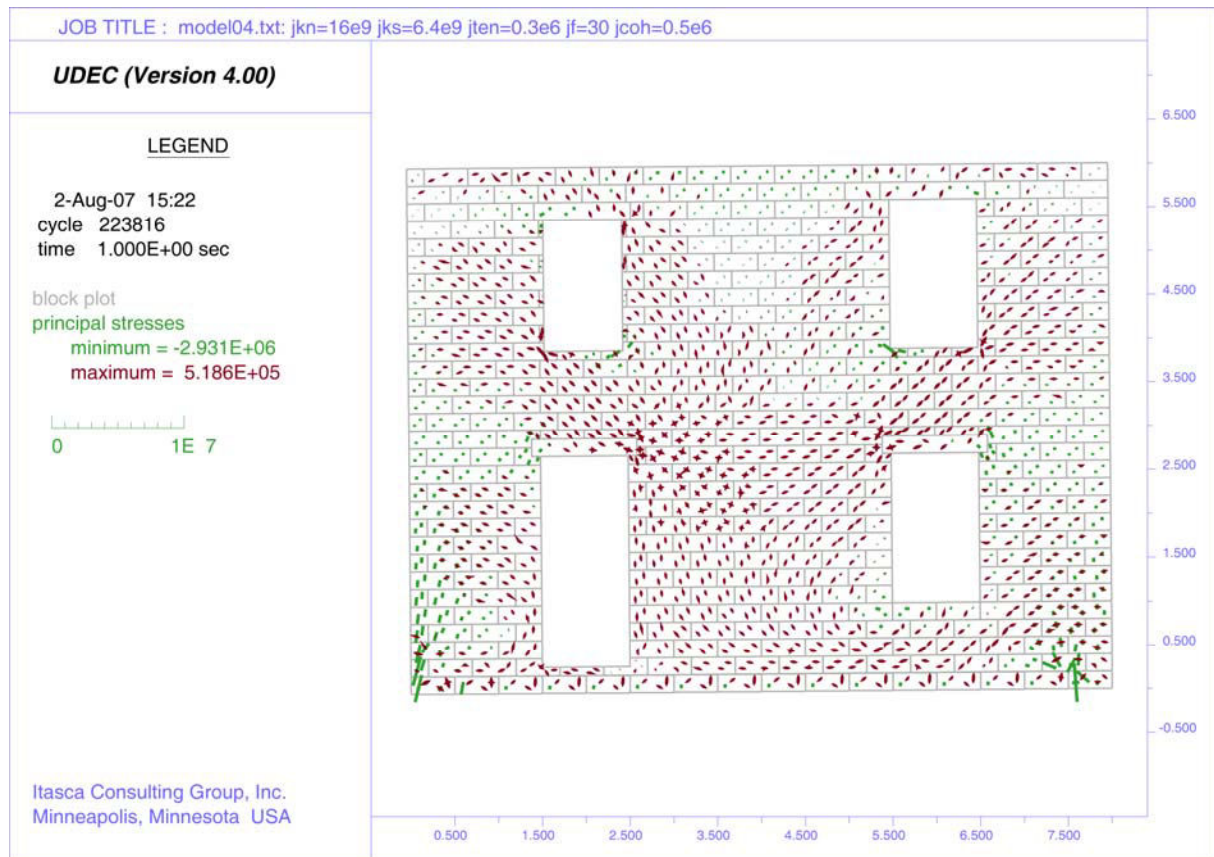


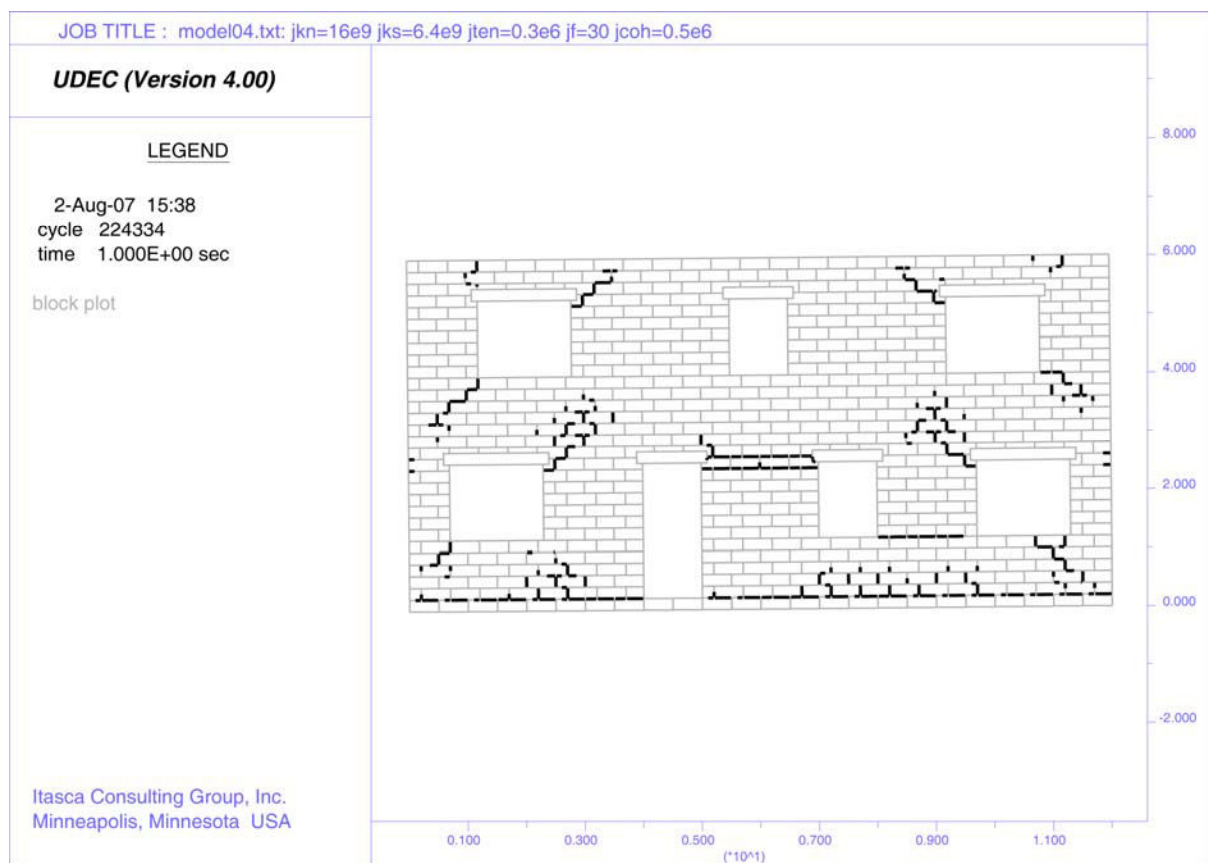


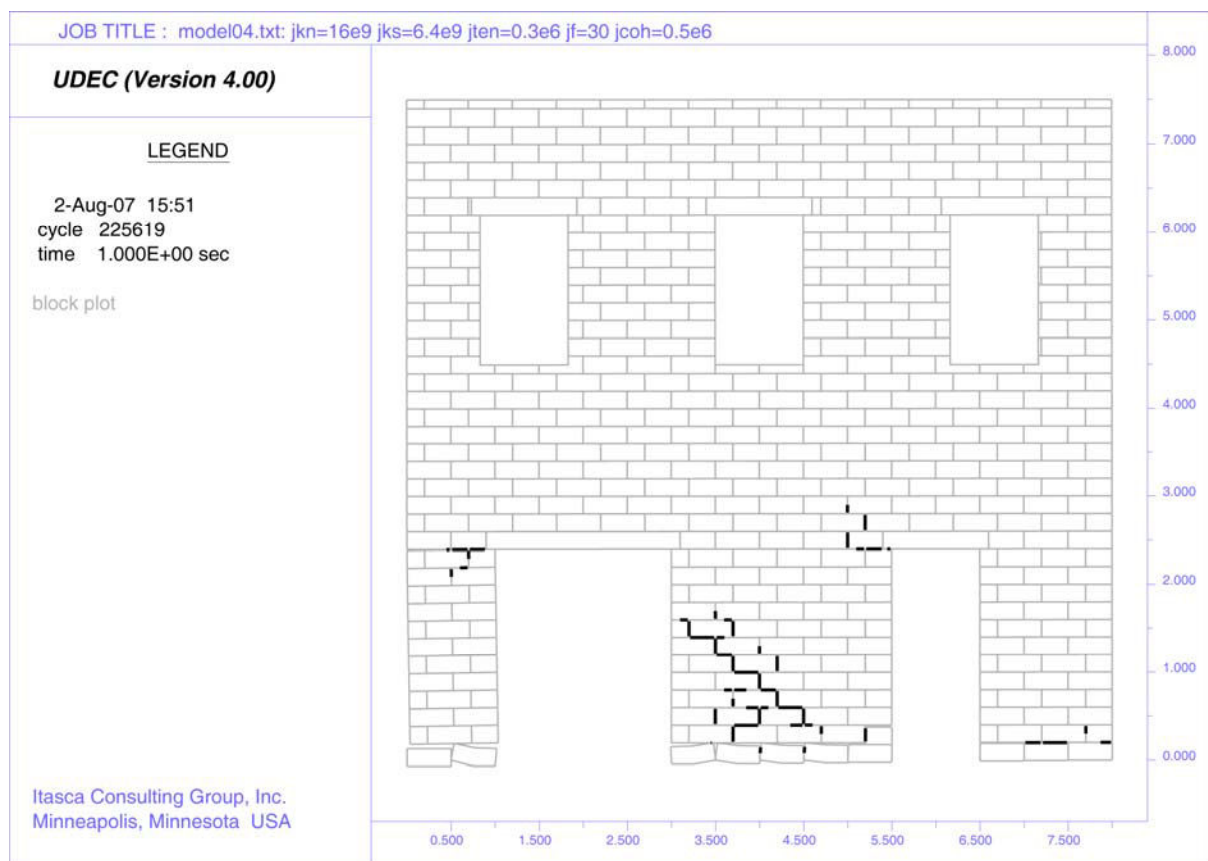
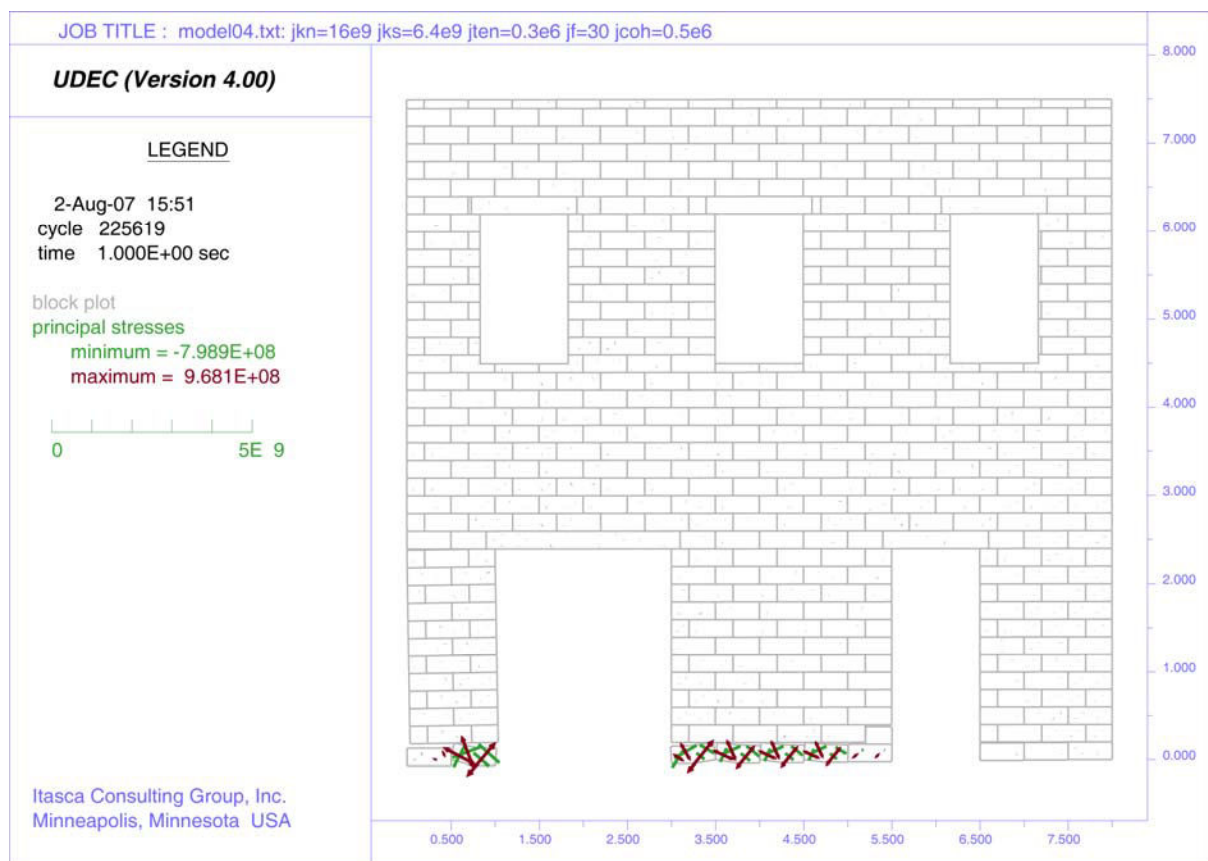


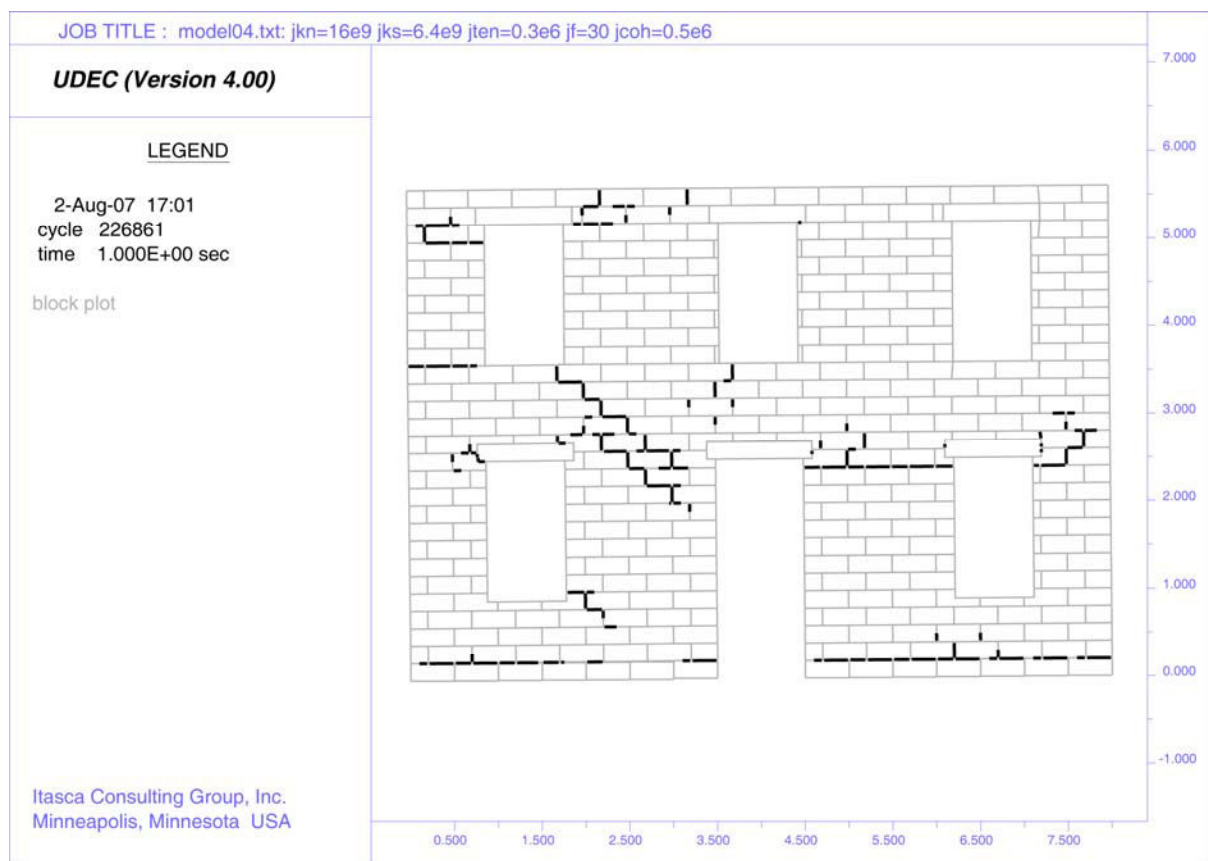
ANNEXE 8

La présente annexe montre quelques exemples de résultats obtenus avec Udec pour plusieurs types de maisons en position concave (en zone de compression des terrains, dans la couronne intérieure, de la cuvette entre le centre et le point d'inflexion telle qu'indiqué sur la Figure 40). Les valeurs des paramètres mécaniques sont celles du Tableau 19. On montre à chaque fois la répartition des contraintes principales puis la distribution des joints ouverts (fissures) correspondante.



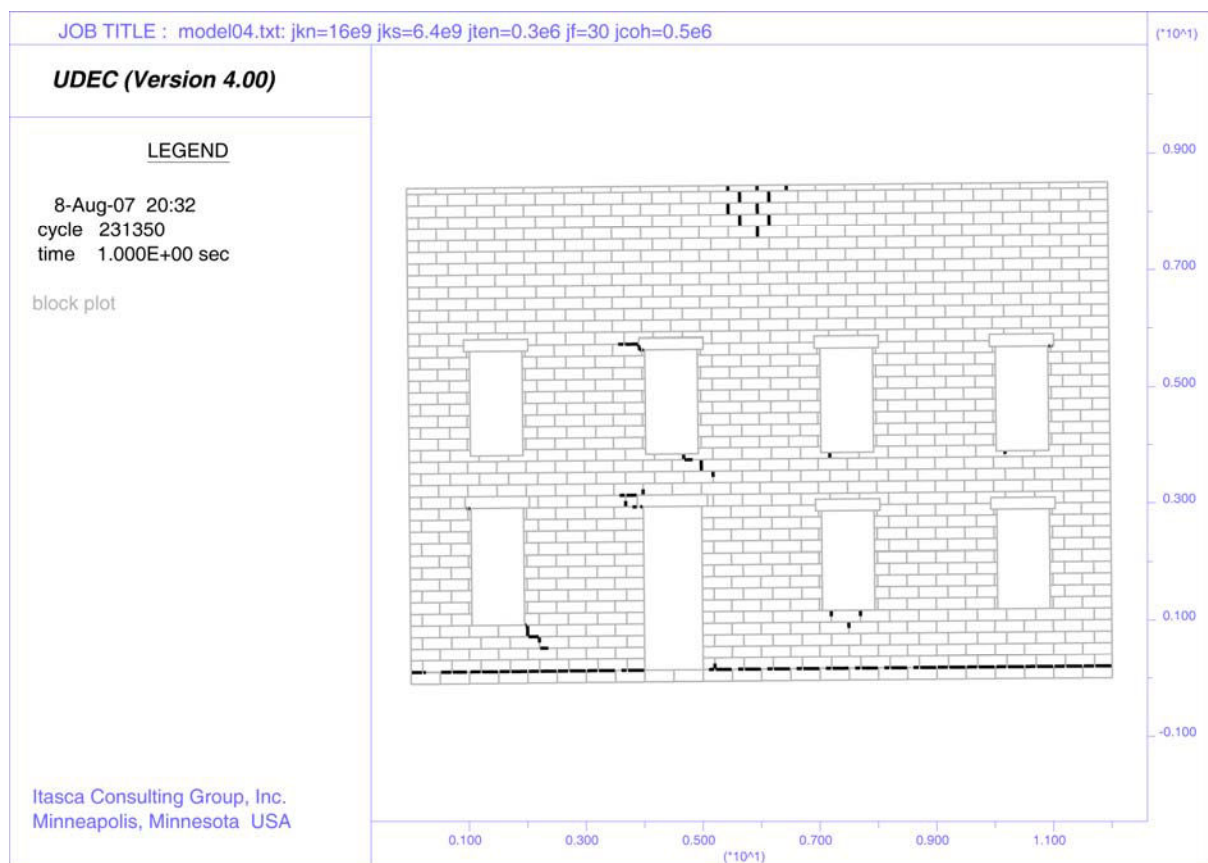
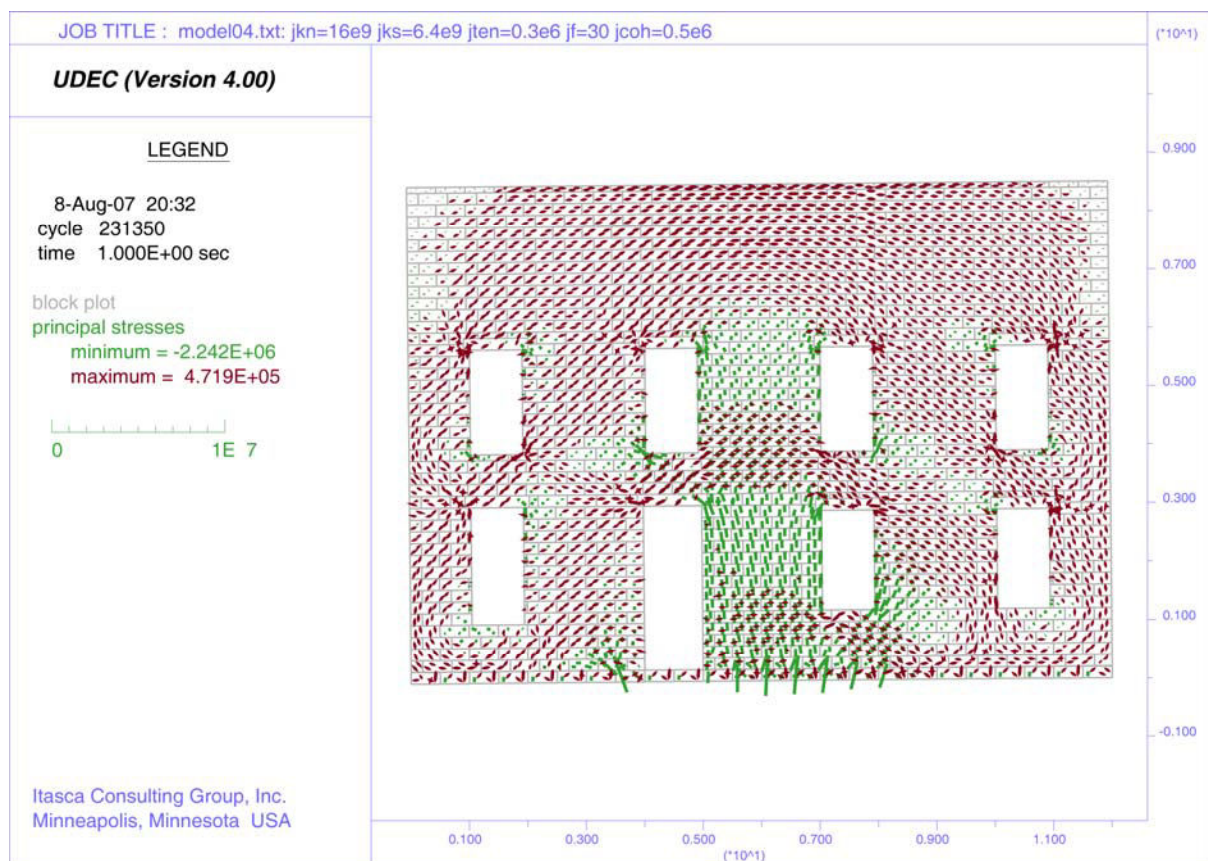


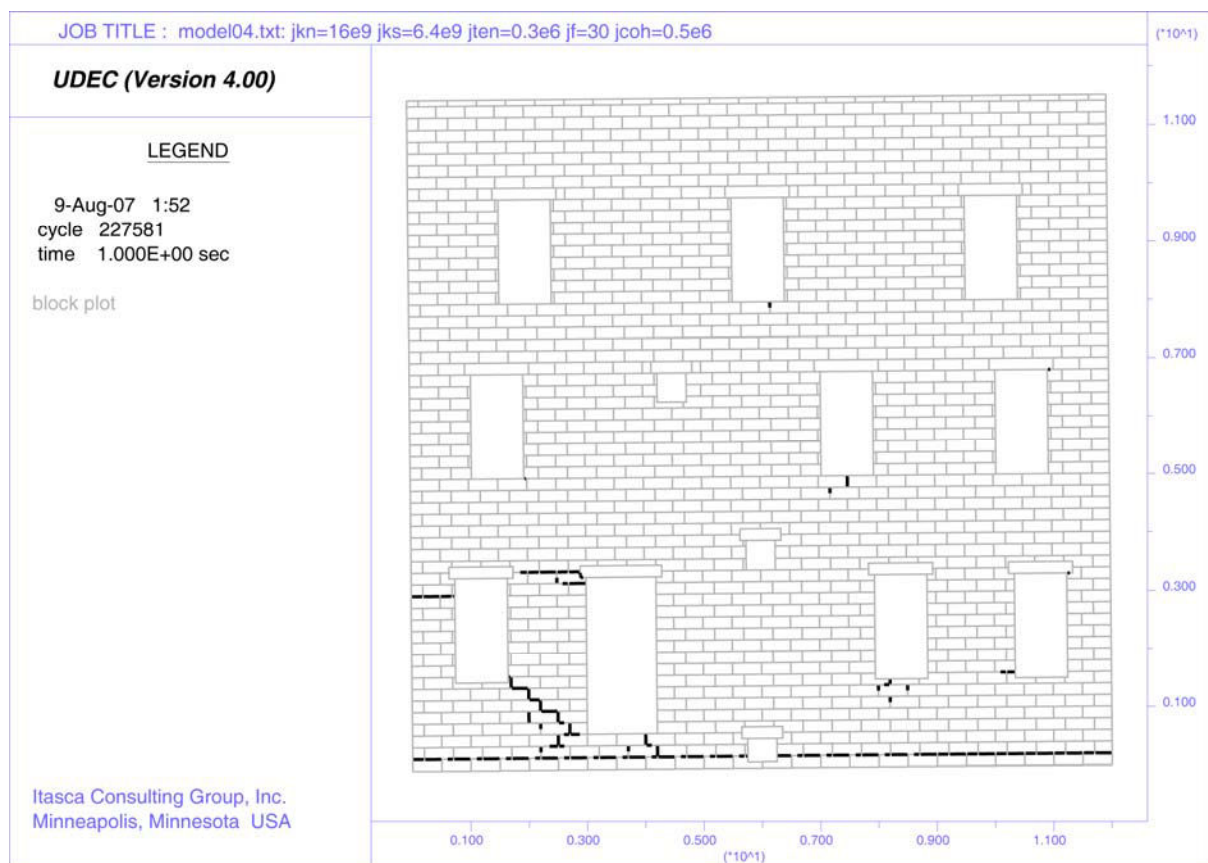


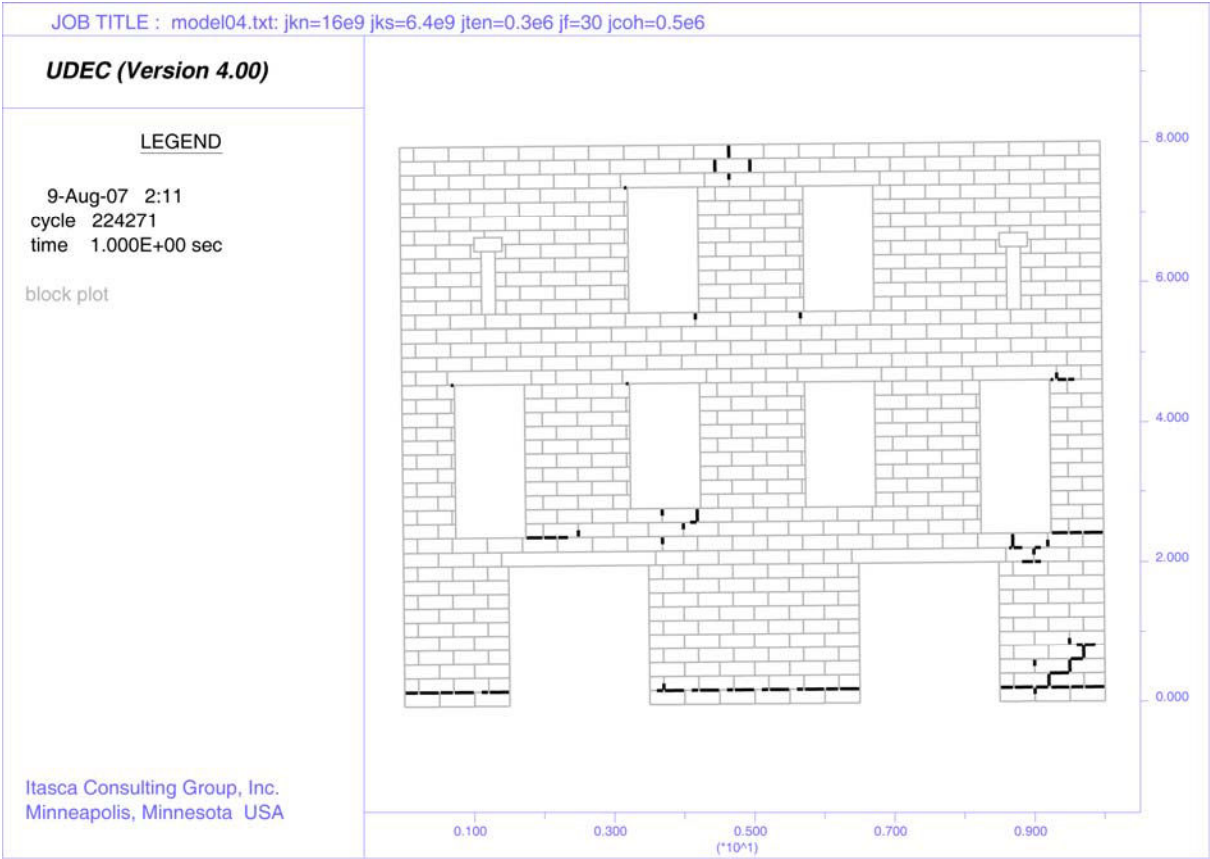
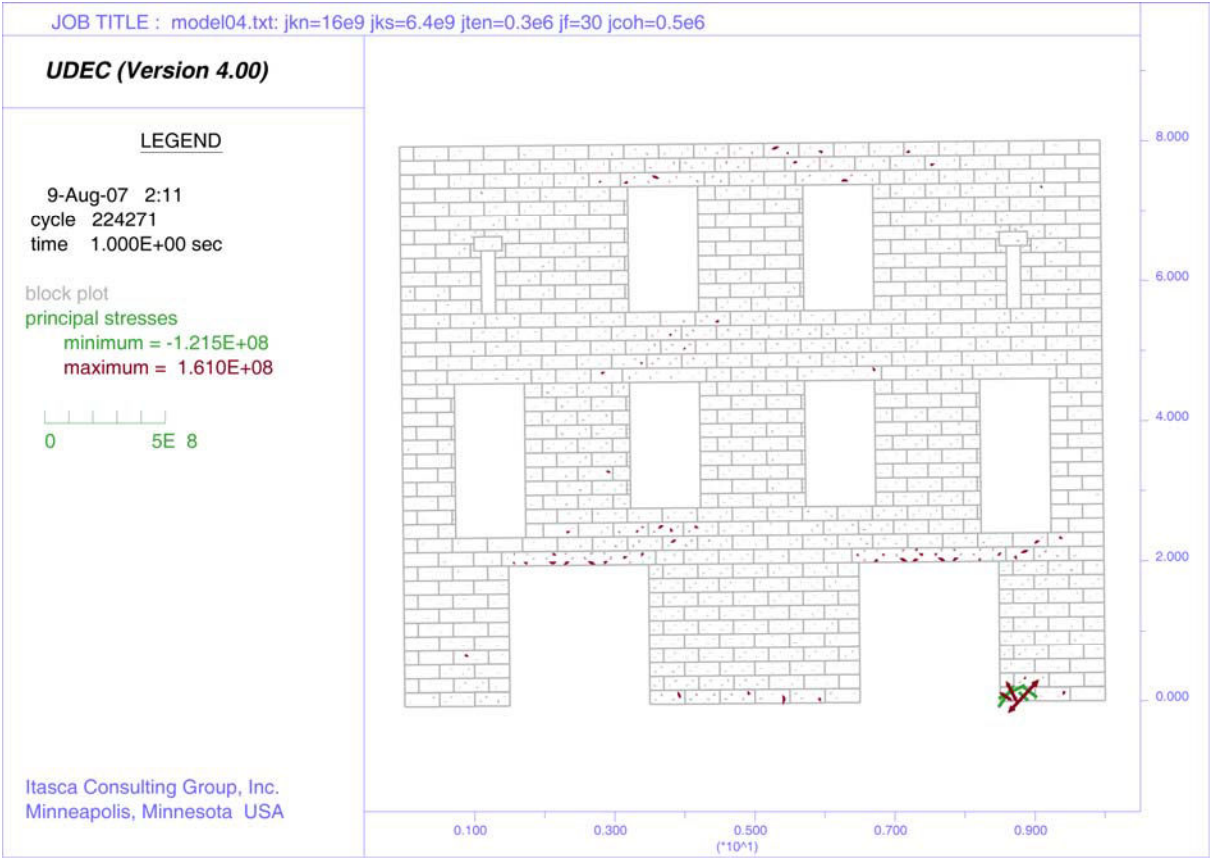


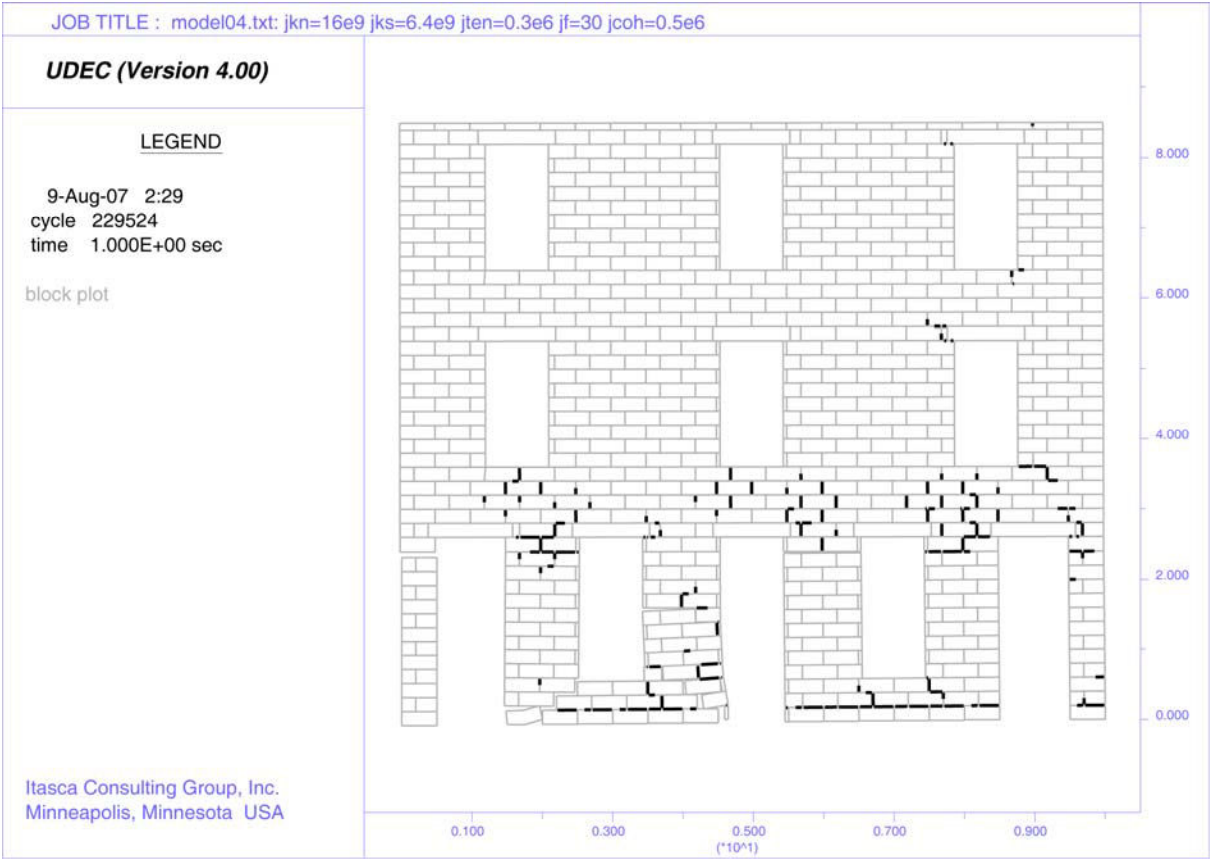
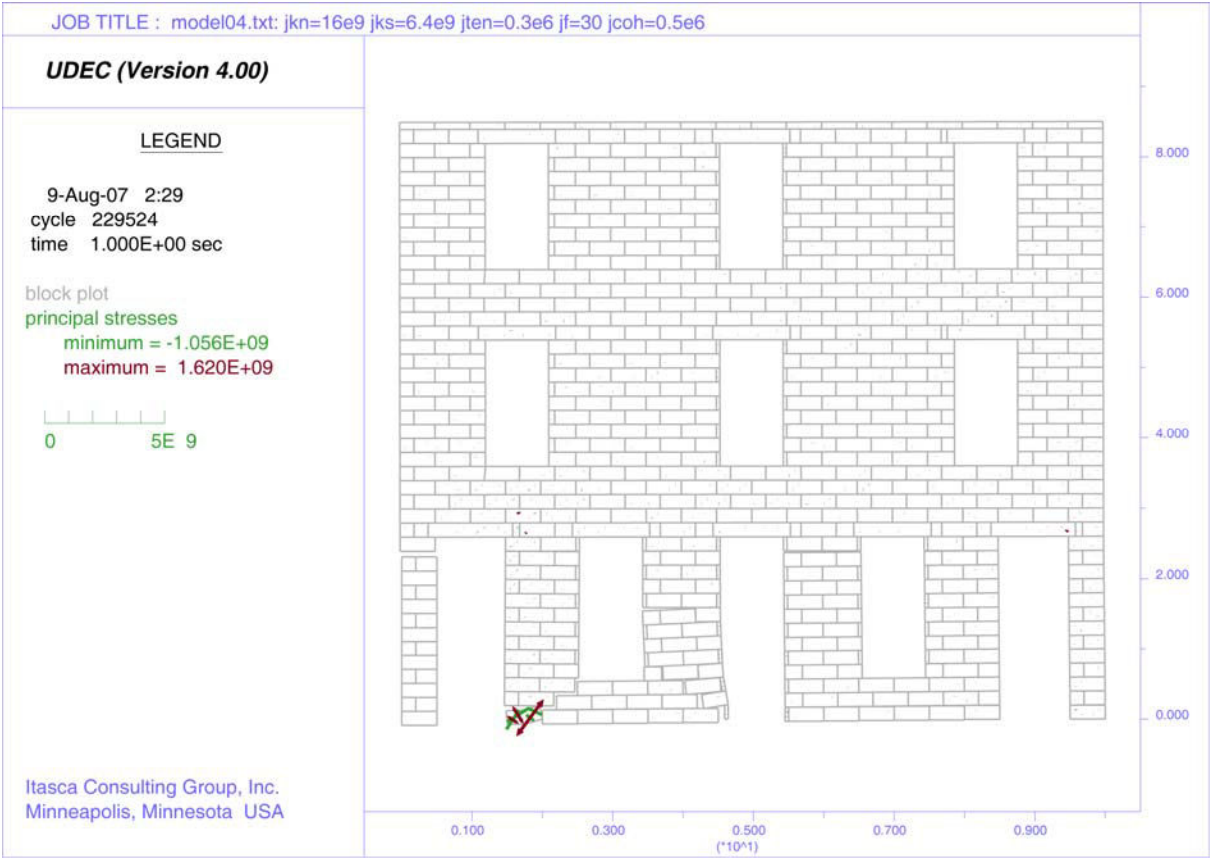
ANNEXE 9

La présente annexe montre quelques exemples de résultats obtenus avec Udec pour plusieurs types de maisons en position convexe (en zone d'extension des terrains, dans la couronne externe, de la cuvette au-delà du point d'inflexion telle qu'indiqué sur la Figure 40). Les valeurs des paramètres mécaniques sont celles du Figure 19. On montre à chaque fois la répartition des contraintes principales puis la distribution des joints ouverts (fissures) correspondantes.



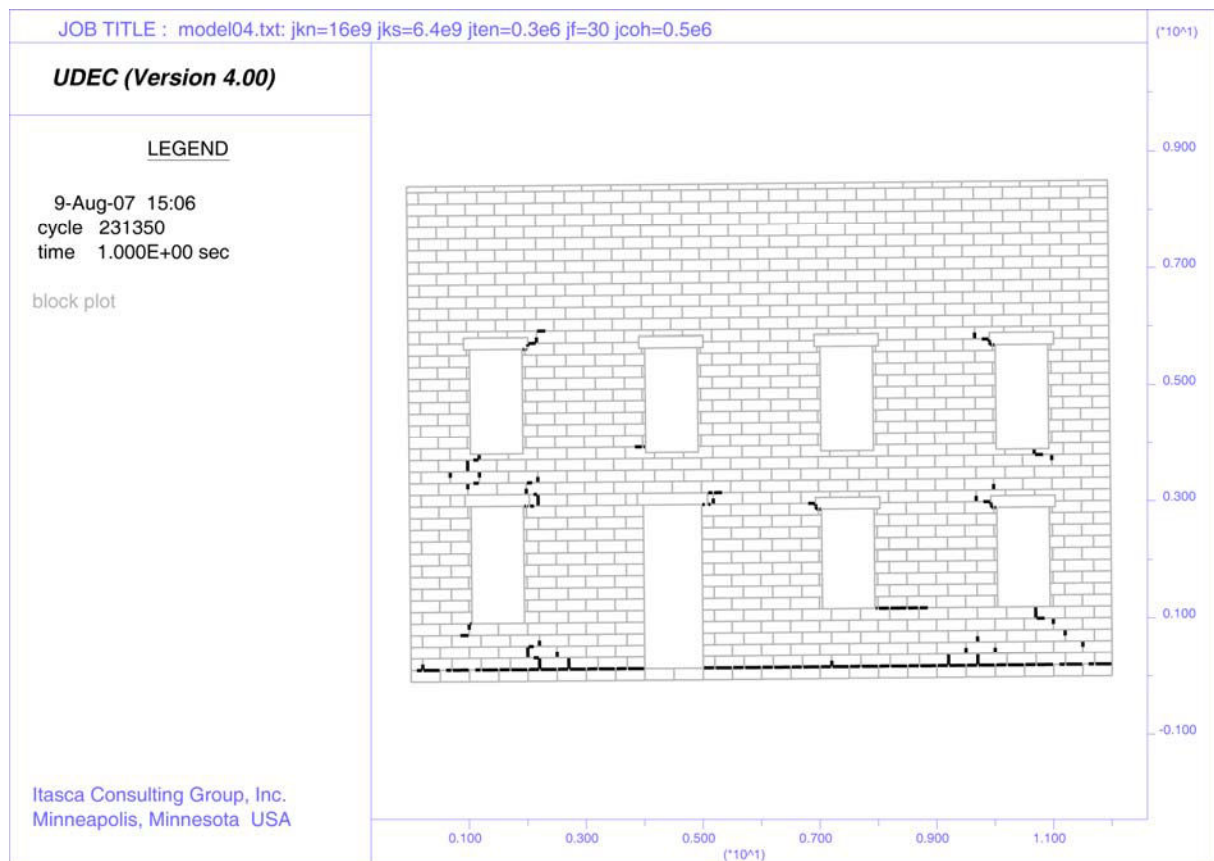
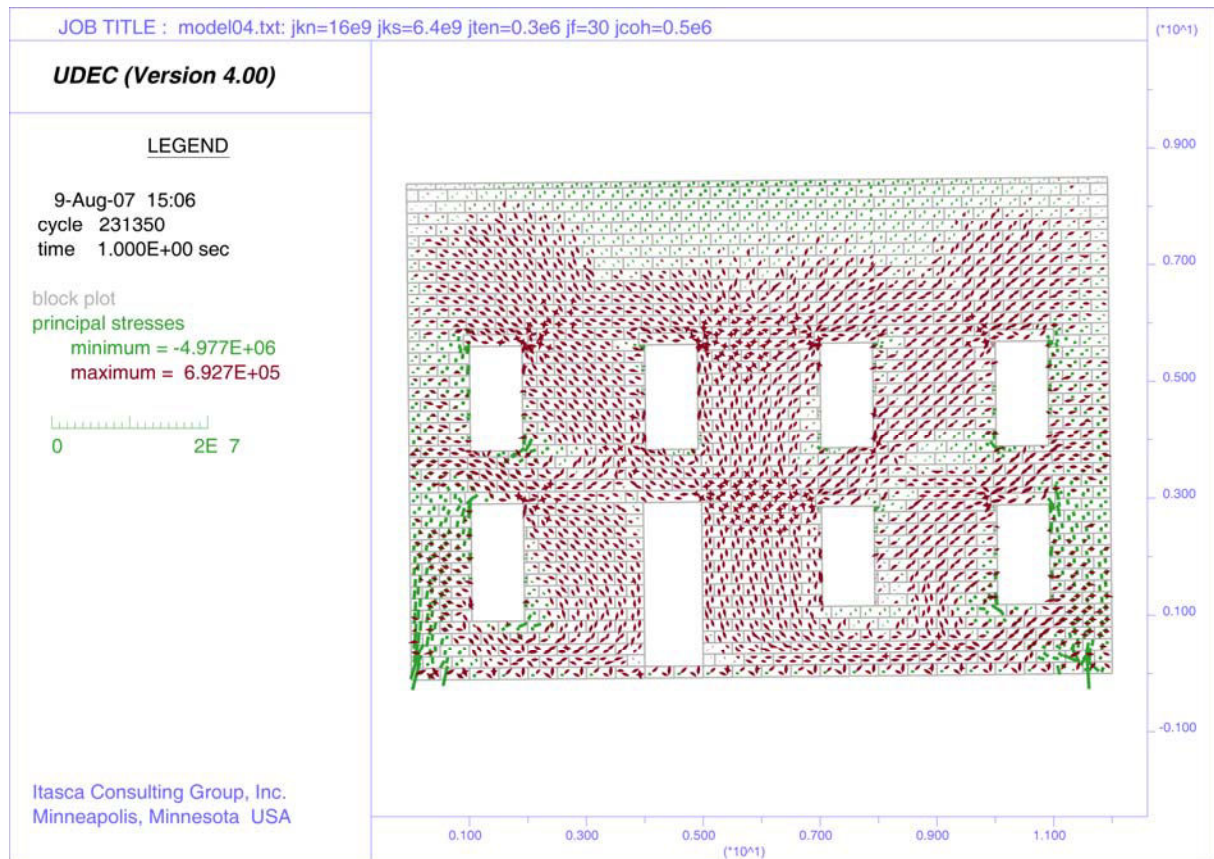


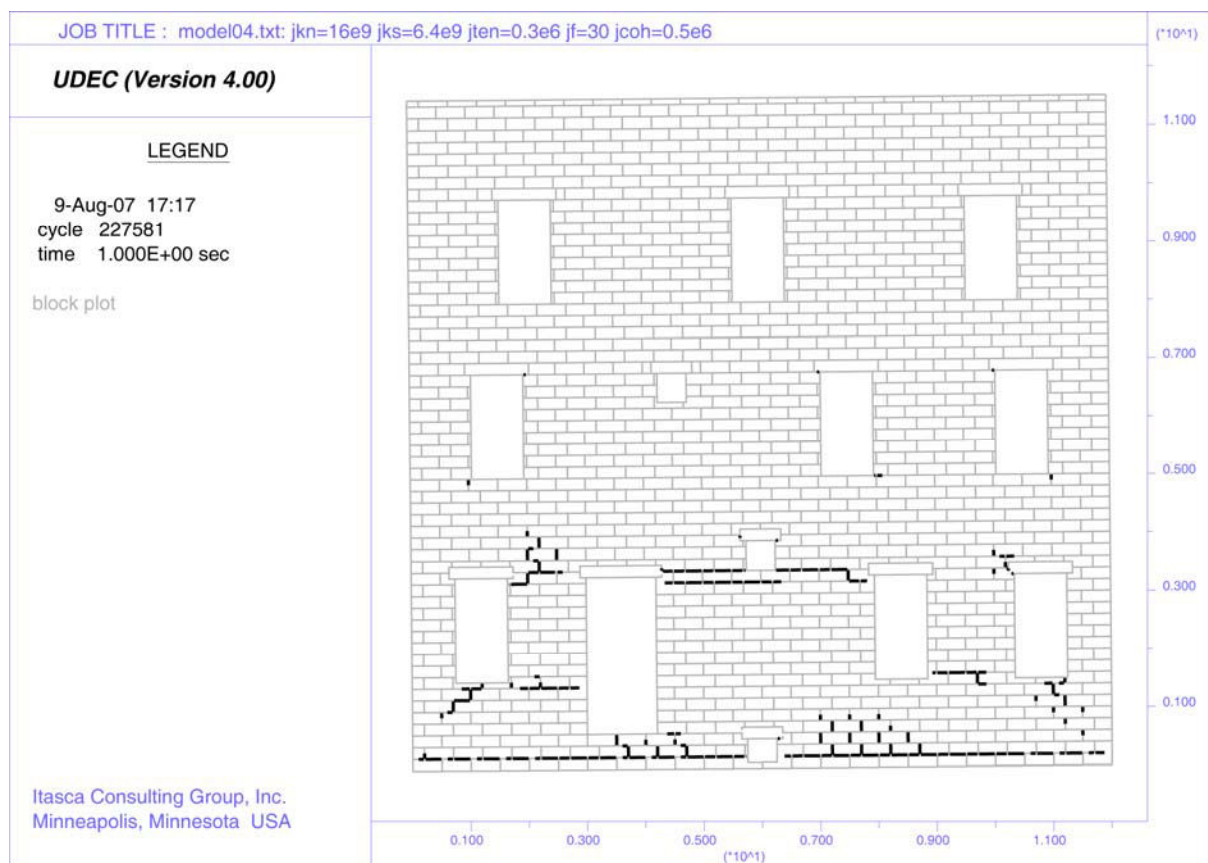


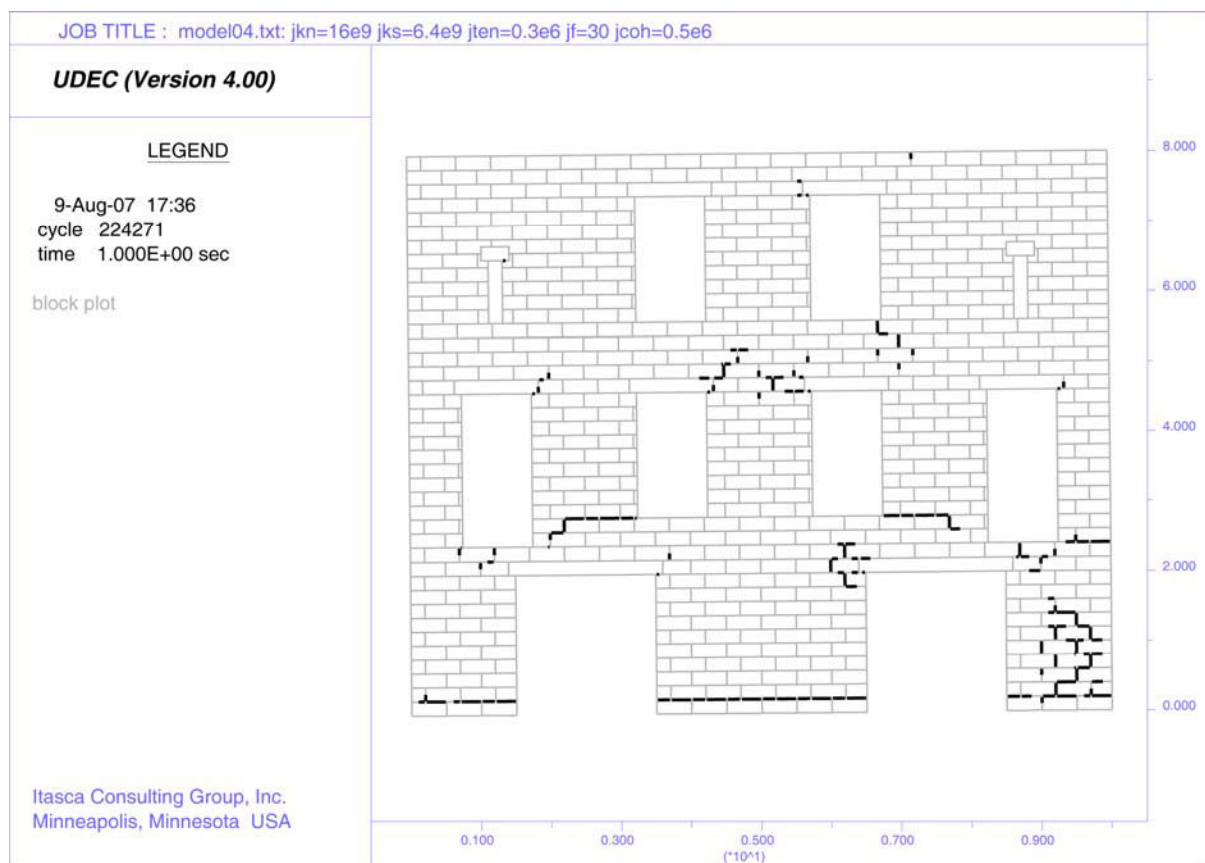
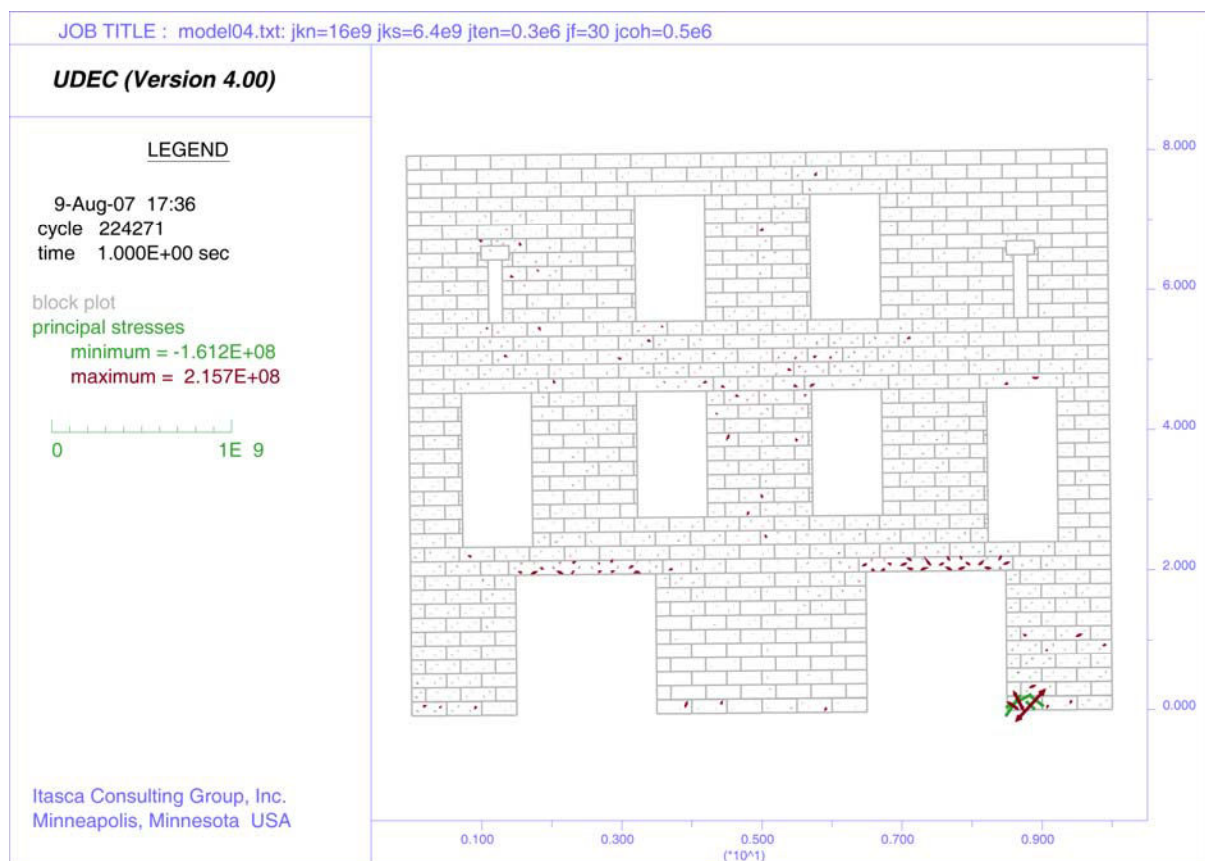


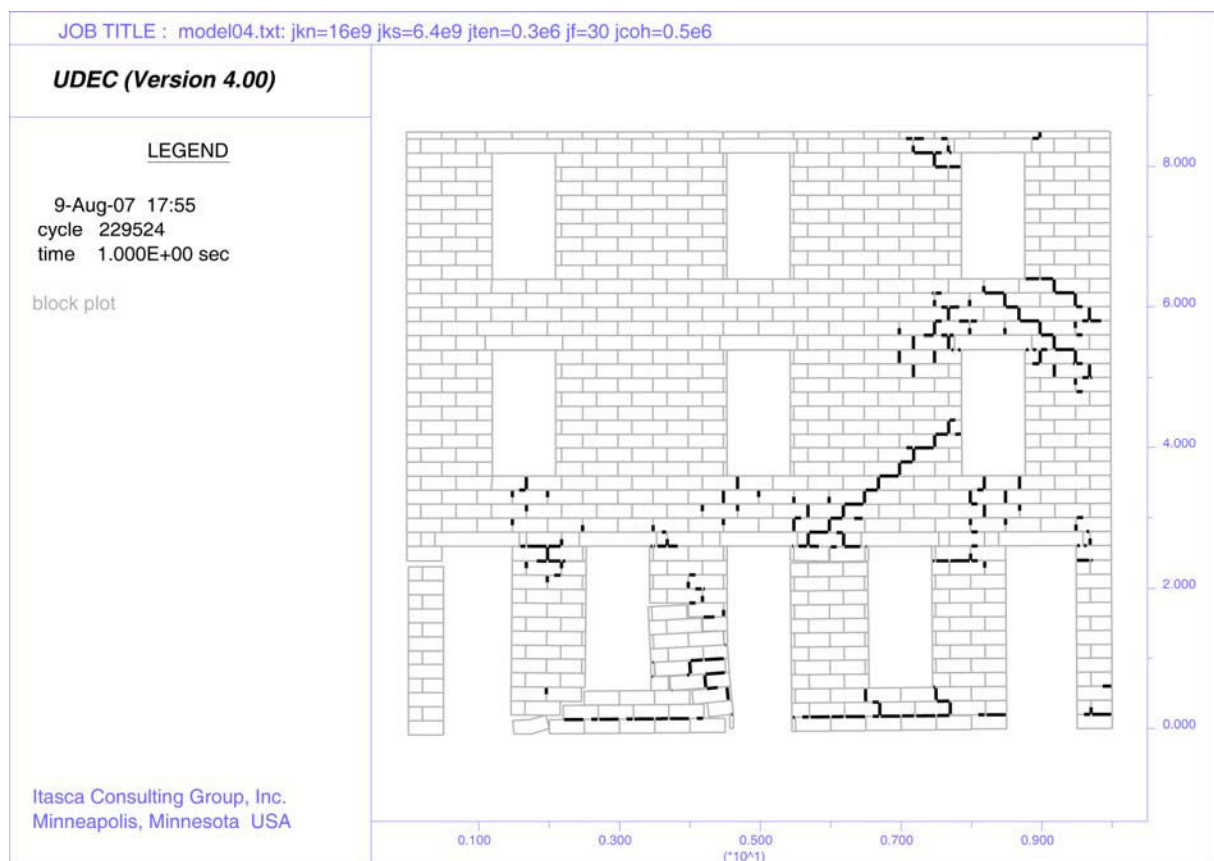
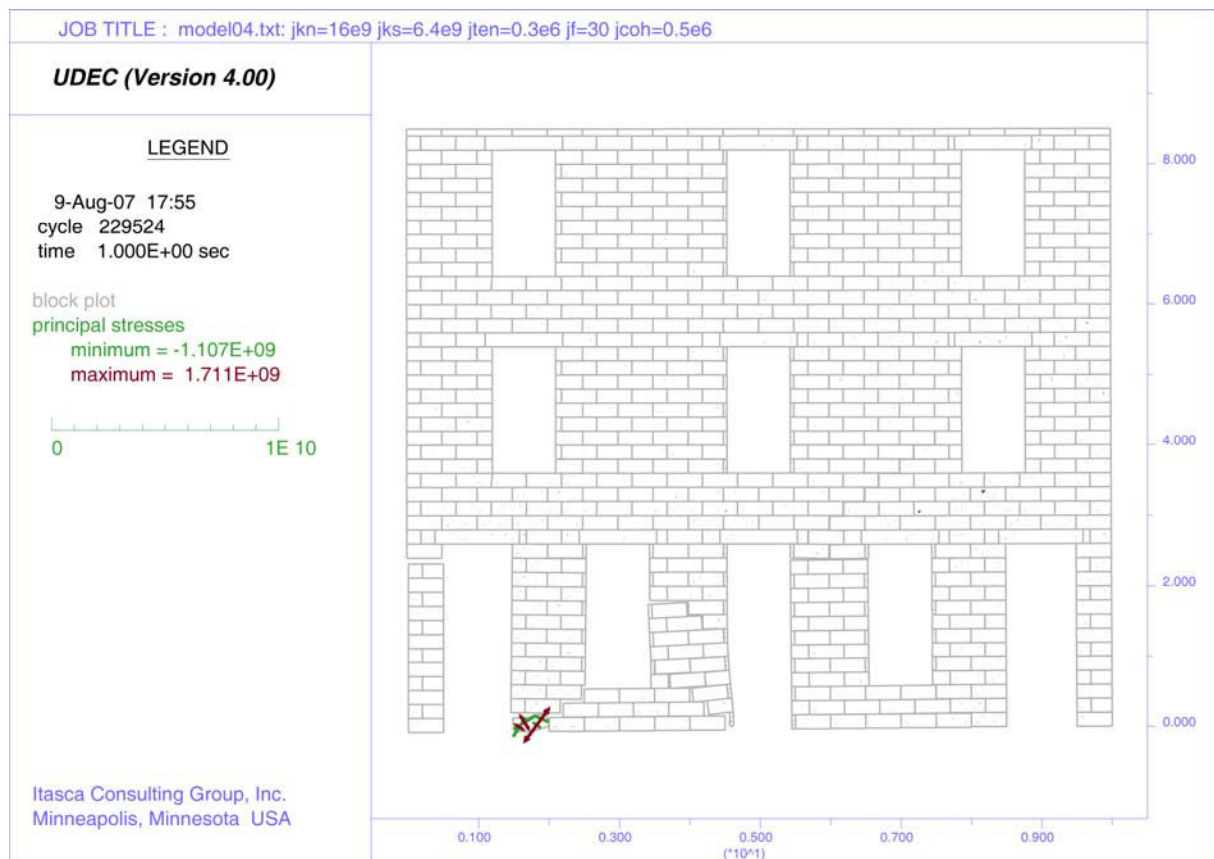
ANNEXE 10

La présente annexe montre quelques exemples de résultats obtenus avec Udec pour plusieurs types de maisons en position concave (en zone de compression des terrains, dans la couronne intérieure, de la cuvette entre le centre et le point d'inflexion telle qu'indiqué sur la Figure 40). Les valeurs des paramètres mécaniques sont celles du Tableau 19. On montre à chaque fois la répartition des contraintes principales puis la distribution des joints ouverts (fissures) correspondante.









INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE
DE LORRAINE

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur Isam SHAHROUR, Professeur, Université des Sciences et Technologies de Lille,
Villeneuve d'Ascq

Monsieur Fabrice EMERIAULT, Maître de Conférences, INSA, LGCIE, Villeurbanne

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur ABDALLAH Mouhammed

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

**"Vulnérabilité des ouvrages en maçonnerie à des mouvements de terrain : méthodologie
d'analyse par les méthodes statistiques et par plans d'expériences numériques sur les
données de la ville de Joeuf"**

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « **Génie civil - Hydrosystèmes - Géotechnique** »

Fait à Vandoeuvre, le 17 avril 2009

Le Président de l'I.N.P.L.,

F. LAURENT



NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 5 4 5 0 1
VANDŒUVRE CEDEX

TEL. 33/03.83.59.59.59
FAX. 33/03.83.59.59.55

Résumé :

Le contexte de l'étude est celui des mouvements de terrain susceptibles de se produire à la suite d'un affaissement minier caractéristique de Lorraine et de leurs conséquences sur les habitations en maçonnerie traditionnelle. Quand de tels affaissements se produisent, ces habitations subissent en effet des désordres qui résultent des efforts engendrés dans la structure par les mouvements du terrain. La réponse qui caractérise alors l'état global de la structure dépend des caractéristiques géométriques, physiques et mécaniques. Or, la nature discontinue des maçonneries et la complexité des interactions entre blocs dans ces maçonneries rend complexe et difficile la détermination de cette réponse. Il en est de même de l'interaction sol-structure.

L'objectif de la recherche consiste donc à étudier, par modélisation numérique avec la méthode des éléments distincts et par la technique des plans d'expérience et des surfaces de réponse, le comportement d'ouvrages en maçonnerie soumis à un affaissement minier caractéristique et à dégager de cette étude des critères permettant d'estimer, à l'échelle d'une ville entière, la vulnérabilité de tous ses bâtiments en maçonnerie.

Une première analyse simplifiée expose le principe de la démarche mise en œuvre à l'échelle de la ville de Joeuf, utilisée comme site pilote. Elle repose sur l'analyse de la longueur cumulée des joints ouverts, assimilés à la formation de fissures dans la structure.

Ensuite, une analyse typologique permet de distinguer 4 groupes de maisons aux caractéristiques proches. Sur chacun de ces groupes, la démarche est ensuite appliquée de manière systématique. Elle prend en considération des caractéristiques géométriques des façades et aboutit à la formulation de fonctions de vulnérabilité qui font appel à la technique de régression orthogonale.

Mots clés: Risque, Aléa, vulnérabilité, maçonnerie, plans d'expérience, régression multiple, ACP, CAH, régression orthogonale

Abstract:

The context of our study concerns ground movements that may occur in Lorraine as a result of mining subsidence events and their impact on traditional masonry houses. When such an event occurs, houses suffer disorders resulting from efforts in the structure caused by the movement of the ground. The response that characterizes the state of the structure depends on the geometrical, physical and mechanical characteristics. However, the discontinuous nature of the masonry and the interactions complexity between masonry blocks makes it difficult to determine that response. The same is true about the soil-structure interaction.

The purpose of this research is to study, by numerical modelling with the distinct element method, experimental design planning and response surfaces, the behaviour of masonry structures subjected to a typical mining subsidence event and to define from this study some criteria making possible the estimation of the vulnerability of all the buildings of a city.

A first simplified analysis describes the principle of the used methodology which is then applied to the study of all houses of the city of Joeuf, used as a pilot site. This methodology is based on an analysis of the total length of the opened joints, which are considered as similar to cracks in the structure.

Then, a typology analysis helps first to distinguish 4 groups (types) of houses which have similar characteristics. On each of these groups, the methodology is applied consistently, based on the geometrical characteristics of the houses facades and then leads to the formulation of vulnerability functions that use the technique of orthogonal regression.

Key word: risk, hazard, vulnerability, masonry, experimental design, multiple regression, PCA, HCA, orthogonal regression