

N° affaire : ER-557-140041-557-2AA  
Réf. 26054802

## Constructibilité dans les bassins salifères Meurthe-et-Mosellan et Mosellan

### Étape 2 : Avis d'expert sur les constructions neuves dites alternatives ou hors typologie sur le site de Varangéville (54), zone d'affaissement progressif

#### Demandeur de l'étude :

DDT 54  
Place des Ducs de Bar  
CO n° 60025  
54035 NANCY Cedex

Rédacteurs	Approbateur	Vérificateur(s)	Version	Date
Duc Toan PHAM	Stéphane HAMEURY	Ménad CHENAF	V1.0	20/04/2016
Hong Hai NGUYEN				

La reproduction de ce rapport d'étude n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral, sauf accord particulier du CSTB.

Ce rapport d'étude comporte **39** pages dont **10** pages d'annexes.

#### CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT

Siège social > 84 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée cedex 2

Tél. : +33 (0)1 64 68 82 82 – www.cstb.fr

MARNE-LA-VALLÉE / PARIS / GRENOBLE / NANTES / SOPHIA ANTIPOLIS

## SOMMAIRE

1.	Contexte et périmètre de l'étude .....	3
2.	Intensité de l'aléa affaissement progressif .....	3
3.	Échelle d'endommagement .....	5
4.	Applicabilité des études préalablement réalisées par le CSTB pour les constructions neuves dites alternatives .....	6
4.1.	Sollicitations sur le bâti en cas d'affaissement minier .....	6
4.2.	Constructions neuves dites alternatives .....	7
4.3.	Maisons d'habitation à ossature bois ou métal limitées à R+2 .....	7
4.4.	Bâtiment à ossature bois ou métal pour les usages secondaires .....	10
5.	Maisons d'habitation par assemblage de containers réemployés .....	10
5.1.	Description d'un container standard .....	10
5.2.	Problématique des containers d'habitation en cas d'affaissement minier .....	11
5.2.1.	Un modèle simplifié .....	12
5.2.2.	Bâtiment réalisé par assemblage de containers .....	18
5.3.	Problématique des containers réemployés .....	23
5.4.	Une première estimation du niveau d'endommagement d'une maison container .....	23
5.4.1.	Fondations .....	24
5.4.2.	Ouvertures .....	25
5.4.3.	Liaison .....	25
6.	Conclusion .....	26
7.	Liste des documents de référence .....	27

## 1. CONTEXTE ET PERIMETRE DE L'ETUDE

À l'issue de l'étude initiale relative à l'examen des conditions d'applicabilité des guides de constructibilité existants du CSTB (établis pour les zones ferrifères – CSTB, 2004 [1]) aux constructions nouvelles des zones salifères de la commune de Varangéville (voir CSTB, 2015 [2]), il a été décidé entre la DDT 54 et le CSTB de poursuivre la réalisation d'études complémentaires spécifiques traitant du bâti neuf sur la commune de Varangéville.

En effet, les travaux réalisés par Geoderis ont permis d'établir une carte des aléas des mouvements de terrain au droit des 13 anciens quartiers en cas d'*ennoyage par de l'eau ou de la saumure*. L'aléa en condition de *mine sèche* n'a pas été retenu (Geoderis, 2014 [3]). L'arrivée d'eau dans les vieux quartiers de la mine de sel pourrait provoquer un effondrement brutal en surface du sol. Il s'agit là de phénomènes imprévisibles sans surveillance, et dont la manifestation est la disparition du sol supportant la construction. Dans ces conditions, il est très difficile, voire impossible avec les techniques utilisées dans le bâtiment, de limiter les désordres. Un tel niveau de sévérité, ajouté au caractère soudain, ne permet à aucune disposition constructive connue ni de prémunir une construction quelconque contre l'effondrement brutal, ni de garantir la sécurité des occupants.

Néanmoins, il a été conclu par ailleurs dans le rapport de Geoderis que le phénomène d'effondrement brutal et généralisé du terrain concerne l'ensemble des quartiers 1 à 13, à l'exception de la zone d'affaissement progressif liée à l'effondrement partiel du quartier 8. Dans ce contexte, la mission confiée par la DDT 54 au CSTB, et faisant l'objet du présent rapport, se limite à cette zone d'affaissement progressif et consiste à analyser :

- la possibilité d'adapter les résultats des études déjà réalisées par le CSTB (CSTB, 2004 [1] et CSTB, 2006 [4]) aux constructions neuves dites alternatives et les étendre à des maisons d'habitation à ossature bois ou métal limitées à R+2 ;
- la possibilité de construire des bâtiments en ossature bois ou métal pour les usages secondaires de type annexe, garage, piscine, abri, à simple rez-de-chaussée sans sous-sol ;
- la possibilité de construire des maisons d'habitation par assemblage de containers réemployés.

On note que les études précédentes du CSTB reposent sur l'analyse de bâtiments types. Pour les projets de constructions neuves hors typologies sur la commune, un modèle de cahier des charges permettra aux pétitionnaires de solliciter des bureaux d'études spécialisés en conception de structures des bâtiments.

## 2. INTENSITE DE L'ALEA AFFAISSEMENT PROGRESSIF

La connaissance préalable de l'intensité des mouvements de terrain est une condition indispensable à la compréhension des phénomènes physiques pouvant être à l'origine des désordres de la structure durant l'affaissement du sol. La carte (figure 1) des aléas mouvements de terrain liés aux vieux quartiers de la mine de sel de Varangéville indique 13 zones d'affaissement potentiel comprenant pour rappel la zone d'affaissement progressif liée à l'effondrement partiel du quartier 8 (figure 2). Les paramètres relatifs à l'aléa mouvements de terrain de cette dernière zone en cas d'*ennoyage par de l'eau ou de la saumure*, sont rappelés comme suit :

- Profondeur d'exploitation : 162,5 m.
- Affaissement maximal :  $A_m=1$  m.
- Pente maximale :  $p_{max}=4$  %.
- Déformation horizontale maximale :  $\varepsilon_{max}=10$  mm/m.

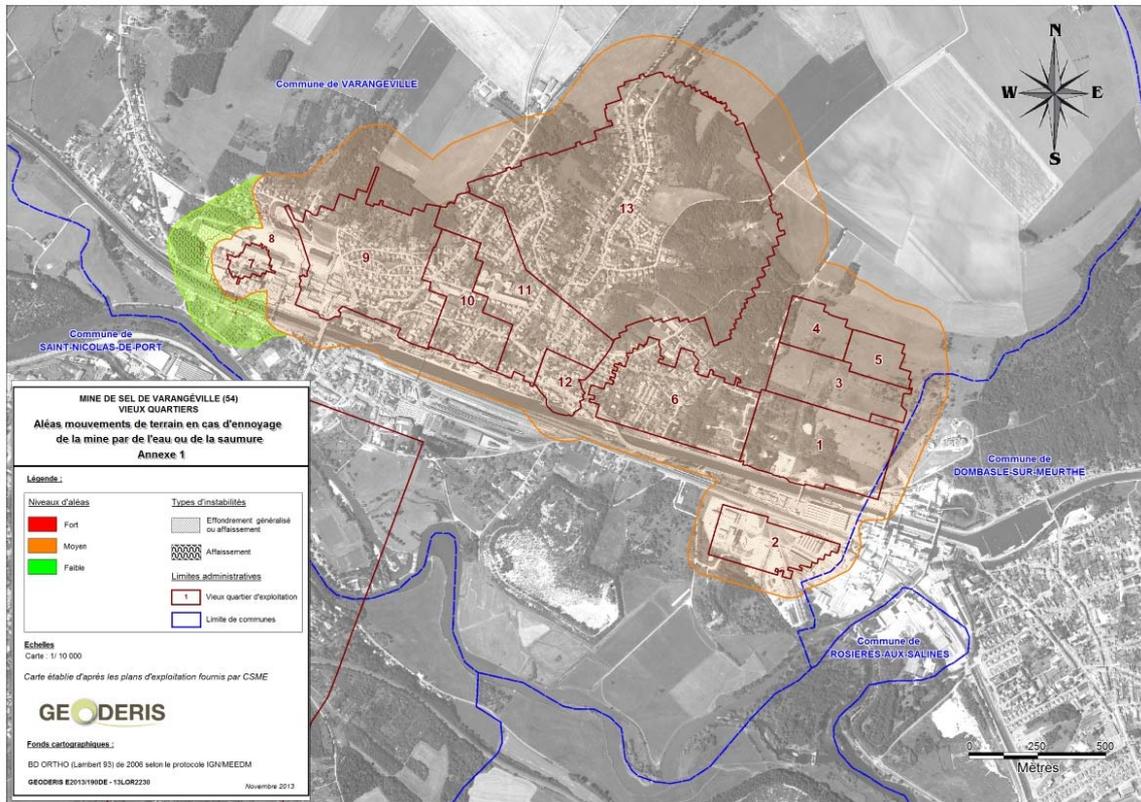


Figure 1: carte d'aléas mouvements de terrains associés aux vieux quartiers de Varangéville en cas d'ennoyage par de l'eau douce ou de la saumure [3]<sup>1</sup>

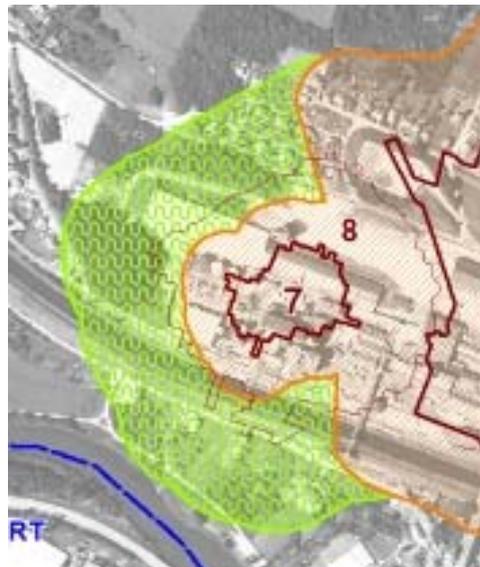


Figure 2: zoom de la zone d'affaissement progressif (zone verte) liée à l'effondrement partiel du quartier 8

<sup>1</sup> Les quartiers sont identifiés de la même manière en cas de mine sèche ou en cas d'ennoyage par de l'eau douce ou de la saumure. On adopte la dernière carte pour faciliter la localisation des quartiers, l'étude restant toujours dans les conditions de mine ennoyée sur le quartier 8.

### 3. ÉCHELLE D'ENDOMMAGEMENT

L'échelle d'endommagement du National Coal Board (1975) [5] a été adoptée de manière à hiérarchiser les désordres attendus dans la structure d'un bâtiment donné dans les études précédentes du CSTB [1,4]. Cette échelle comprend cinq niveaux de N1 à N5 correspondant aux désordres prévisibles énumérés comme suit :

Pour le niveau N1 (dommages négligeables ou très légers) :

1. fissures très légères dans les plâtres,
2. légères fissures isolées dans le bâtiment, non visibles de l'extérieur.

Pour le niveau N2 (dommages légers) :

1. plusieurs fissures légères visibles à l'intérieur du bâtiment,
2. les portes et fenêtres peuvent se coincer,
3. des réparations aux murs et plafonds peuvent être nécessaires.

Pour le niveau N3 (dommages appréciables) :

1. fissures légères visibles de l'extérieur,
2. les portes et fenêtres sont coincées,
3. les canalisations sont rompues.

Le niveau N4 correspond aux dommages subis de niveau sévère dont les désordres peuvent être :

1. des canalisations rompues ou dégradées,
2. des fractures ouvertes dans les murs,
3. des châssis de portes et fenêtres tordus,
4. des sols en pente,
5. murs hors d'aplomb ou bombés, localement étayés,
6. quelques déchaussements des poutres,
7. en cas de compression, un chevauchement des joints dans les toits et soulèvement des murs en briques, avec fissures horizontales.

Le dernier niveau N5, correspondant aux dommages très sévères, représente l'effondrement partiel ou total quasi-certain :

1. le bâtiment doit être reconstruit partiellement ou complètement,
2. les poutres des planchers et de la toiture sont déchaussées et nécessitent d'être étayées,
3. l'inclinaison des planchers et des murs est très importante,
4. en cas de compression, gauchissement et bombement sévères des murs et du toit.

Les trois premiers niveaux d'endommagement (N1 à N3) correspondent aux dommages architecturaux. Les deux derniers niveaux de désordres (N4 et N5), correspondant respectivement aux dommages fonctionnels (état limite de service (ELS)) et structurels (état limite ultime (ELU)), ne permettent plus d'assurer la « viabilité » du bâtiment du fait de désordres trop importants, et avec risque d'effondrement partiel ou total pour le dernier niveau.

Plus précisément, on constate que les deux désordres prévisibles du premier niveau d'endommagement (niveau N1) de la construction sont des désordres visuels engendrés par de faibles déformations. Ces désordres n'occasionnent pas de modification de géométrie des éléments du bâtiment, susceptible de compromettre la sécurité des occupants.

Les trois désordres prévisibles du niveau N2, engendrés par les déformations, restent faibles mais peuvent néanmoins entraîner le coincement des fenêtres et des portes. Pour ces derniers, statistiquement à l'échelle d'un ensemble de bâtiments, les déformations observées sont suffisamment faibles pour que l'on puisse admettre qu'une faible proportion des bâtiments sera sujette à ce problème. De plus, les

mouvements d'affaissement se produisent sur des durées relativement étalées, selon les connaissances qu'on en a aujourd'hui. Il n'y a pas de risque intrinsèquement lié à la chute brutale d'objets ou d'éléments d'équipement, en raison de la faible amplitude des mouvements de ce niveau d'endommagement et donc, il n'y a pas de risque pour l'occupant. Le seul risque que l'on pourrait envisager pour ces désordres serait une panique des occupants ne pouvant pas sortir du fait du coincement des portes et fenêtres, et tentant par là des évacuations risquées (défenestration, par exemple). Mais ce risque reste extrêmement limité en raison du caractère progressif des déformations d'une part, et de la faible proportion de bâtiments touchés, d'autre part. Toutefois, il pourrait être utile de diffuser un message clair aux occupants des bâtiments concernés, pour les engager au calme, en cas de premiers mouvements ressentis.

Les sept désordres prévisibles dont trois du niveau N3 et quatre désordres 1 à 4 du niveau N4, plus sévères que les précédents, présentent un risque de panique accentué par rapport à ce qui est décrit ci-dessus pour les trois désordres du niveau N2. Mais ces désordres sont réputés pouvant également conduire à des ruptures de canalisations par de faibles changements de géométrie. En conséquence, la présence de canalisations de gaz représente ici le risque majeur pouvant être appréhendé, risque très largement pondéré par le caractère progressif de l'affaissement. Dans ces conditions, **il convient de proscrire les installations au gaz.**

Les trois désordres 5, 6, 7 du niveau d'endommagement N4 et ceux du niveau N5, sont définis en lien avec des changements importants de géométrie (murs hors d'aplomb, etc...) et avec des risques de chutes d'éléments de structure ou d'équipement. Ces deux niveaux d'endommagement présentent des risques certains pour la sécurité des occupants qui ne peuvent pas être pondérés par le délai d'évacuation car il s'agit là d'une situation d'effondrement ou d'impraticabilité des ouvrages, ce qui n'était pas le cas pour les niveaux de N1 à N3 et une partie de N4, pour lequel il s'agissait d'une situation d'amorce de désordres.

Pour se placer du côté de la sécurité et en vue de la simplification de la démarche, il est raisonnable de considérer que, pour les niveaux d'endommagement de N1 à N3, la sécurité des occupants ne peut pas être directement menacée, du fait de l'absence de risque de chutes d'éléments porteurs ou d'équipement et du caractère progressif de l'affaissement tandis que pour les niveaux N4 et N5, la sécurité des occupants est menacée en l'absence de dispositifs de surveillance adaptés.

## 4. APPLICABILITE DES ETUDES PREALABLEMENT REALISEES PAR LE CSTB POUR LES CONSTRUCTIONS NEUVES DITES ALTERNATIVES

### 4.1. Sollicitations sur le bâti en cas d'affaissement minier

En cas d'affaissement minier, différents effets plus ou moins prévisibles peuvent se produire. Du point de vue des mouvements en surface au voisinage d'une structure, l'impact des exploitations souterraines est comparable qu'il s'agisse des mines de fer en Lorraine ou de sel à Varangéville. Lors d'un affaissement progressif, le mouvement d'un bâtiment peut être décomposé selon deux mouvements de corps rigides de *translation* et de *rotation*, et *deux déformations*, une engendrée par la déformation horizontale du sol et l'autre due à la courbure du terrain (voir par exemple la figure 3 présentée par Geddes, 1984 [6], citée par Deck *et al.*, 2002 [7]).

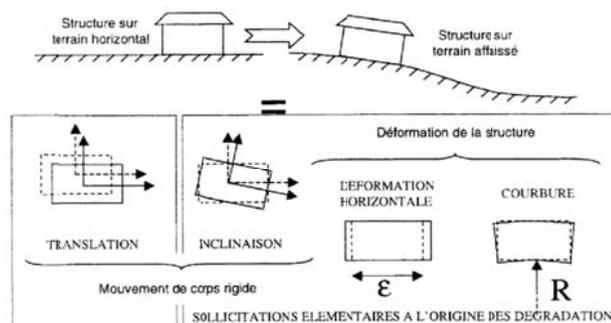


Figure 3: décomposition des sollicitations sur le bâti en cas d'affaissement minier [6]

Il est essentiel de noter que chaque type d'exploitation minière génère un type d'affaissement particulier. Néanmoins, dans l'hypothèse où cet affaissement est caractérisé par les quatre mouvements élémentaires de la figure 3, les conséquences sur le bâti ne dépendent donc pas fondamentalement de la nature des travaux souterrains. Deux types d'exploitations différentes, telles que les mines de fer ou de sel, influencent uniquement l'amplitude des mouvements en surface du terrain en cas d'affaissement progressif. Au contraire, un comportement différent de l'interaction sol-structure peut être engendré par la différence de lithologie des terrains superficiels (Deck *et al.*, 2002 [7]).

#### 4.2. Constructions neuves dites alternatives

Le choix des matériaux et celui des systèmes constructifs jouent un rôle déterminant dans la résistance des constructions vis-à-vis des effets de l'affaissement minier. De ce point de vue, l'aptitude des systèmes à se déformer plastiquement avec de grandes déformations, sans pour autant voir leurs capacités résistantes réduites, constitue une solution préférable à celle de certains procédés constructifs traditionnels plus fragiles.

Les études précédentes du CSTB [1,4] ont mis en évidence des avantages non négligeables des procédés de construction alternatifs par rapport aux procédés traditionnels. Il s'agit ici de deux procédés constructifs particulièrement adaptés pour résister à des affaissements du terrain (procédé à comportement ductile notamment) :

- les constructions à ossature bois visées au NF DTU 31.2,
- les constructions à ossature métallique ;

qui ont la particularité de présenter :

- un rapport résistance/poids élevé ;
- une capacité à accepter des déformations relativement importantes du fait de la ductilité de leurs assemblages mécaniques.

Compte tenu des paramètres relatifs aux mouvements de terrain de la zone d'affaissement progressif liée à l'effondrement partiel du quartier 8 [3] dont l'intensité reste dans la plage des valeurs étudiées, et de ce que les conséquences sur le bâti ne dépendent pas fondamentalement de la nature des travaux souterrains, il est possible d'appliquer les études préalablement réalisées par le CSTB [1,4] aux constructions neuves dites alternatives sur cette zone.

#### 4.3. Maisons d'habitation à ossature bois ou métal limitées à R+2

Les maisons d'habitation à ossature bois ou métal, visées par les études précédentes du CSTB [1,4] pour le bassin ferrifère nord-lorrain, sont de type R+1 dont les caractéristiques sont :

visées par l'étude du CSTB en 2004 [1] :

- bâtiment de forme compacte, sans sous-sol et sur deux niveaux (rez-de-chaussée et combles),
- ossature sans éléments fragiles tels que grandes trémies, grands balcons, éléments très élancés,
- hauteur d'étage inférieure à 3 m, hauteur totale maximale de 6 m,
- surface au sol de forme rectangulaire de largeur maximale de 9 m, de longueur maximale de 14 m et de rapport largeur/longueur supérieur ou égal à 1/2,
- petites ouvertures (largeur inférieure à 1,5 m).

visées par l'étude du CSTB en 2006 [4] :

- bâtiment de forme compacte, sans sous-sol et sur deux niveaux (un étage sans combles aménageables ou rez-de-chaussée avec combles aménageables),

- ossature bois ou métallique de type :
  - soit structure poteaux-poutres en bois,
  - soit structure en panneaux de bois,
  - soit structure poteaux-poutres en profilés minces métalliques,
  - soit structure poteaux-poutres métalliques en profilés standards,
- hauteur d'étage inférieure à 3 m, hauteur totale maximale de 6 m,
- surface au sol de forme rectangulaire de largeur maximale de 10 m, de longueur maximale de 17 m et de rapport largeur/longueur supérieur ou égal à 1/2.

Lorsqu'une maison sort des limites de dimensions de ces types, R+2 par exemple, on est conduit à modifier son niveau d'endommagement. En conséquence, la hauteur devient un facteur aggravant si la construction considérée contient un niveau de plus que la référence du type, ce qui conduit finalement à un niveau d'endommagement plus important.

Le tableau 1 ci-dessous montre les niveaux d'endommagement pour une maison d'habitation à ossature bois ou métal limitée respectivement à R+1 (hauteur totale maximale de 6 m) et R+2 (hauteur totale maximale de 9 m) pour la pente prévisible maximale de la zone d'affaissement progressif liée à l'effondrement partiel du quartier 8, cette pente étant de 4 %.

*Tableau 1: Estimation du niveau d'endommagement correspondant à une pente prévisible maximale de 4 % de la zone d'affaissement progressif liée à l'effondrement partiel du quartier 8 pour des maisons d'habitation à ossature bois et métal*

		Niveau d'endommagement	
		R+1	R+2
Maison d'habitation visée par l'étude du CSTB en 2004 [1]	ossature bois	N2	N3
	ossature métallique	N1	N2
Maison d'habitation visée par l'étude du CSTB en 2006 [4]	ossature bois structure poteaux-poutres	N3	N4
	ossature bois structure en panneaux de bois	N2	N3
	ossature métallique structure poteaux-poutres en profilés minces métalliques	N3	N4
	ossature métallique structure poteaux-poutres métalliques en profilés standards	N2	N3

*Remarque :*

Il est important de noter qu'**on ne cherche pas à faire une étude de cas**. Les résultats indiqués dans le dernier tableau s'appliquent d'une manière générale à un groupe de bâtiments types à l'échelle d'une commune et ne présentent pas un ouvrage isolé. Ils ne sont utilisables que dans le cadre de cette étude. Ils sont strictement liés aux typologies définies dans les rapports précédents du CSTB [1,4] ainsi qu'à toutes les hypothèses qui y sont mentionnées. Il serait par conséquent erroné et dangereux d'utiliser directement ce tableau dans un cadre différent de celui de cette étude, qui revêt un caractère global et est totalement inadaptée à un examen localisé.

On note également que les niveaux d'endommagement ci-dessus ont été étudiés sur les maisons d'habitation, à ossature bois ou métal, renforcées structurellement à hauteur d'un surcoût à la construction évalué à 10%. Ce surcoût ne comprend pas les dispositions constructives permettant le relevage du bâtiment à moindre coût.

Dans l'hypothèse où la sécurité des occupants ne pourrait pas être directement menacée pour un niveau d'endommagement ne dépassant pas N3, il est possible de construire, sur la zone d'affaissement progressif liée à l'effondrement partiel du quartier 8 de la commune de Varangéville, des maisons d'habitation à ossature bois ou métal R+2 dont les caractéristiques sont les suivantes :

- bâtiment de forme compacte, sans sous-sol et sur trois niveaux (rez-de-chaussée, un étage et combles),
- ossature sans éléments fragiles tels que grandes trémies, grands balcons, éléments très élancés,
- hauteur d'étage inférieure à 3 m, hauteur totale maximale de 9 m,
- surface au sol de forme rectangulaire de largeur maximale de 9 m, de longueur maximale de 14 m et de rapport largeur/longueur supérieur ou égal à 1/2,
- petites ouvertures (largeur inférieure à 1,5 m),

sous réserve de proscrire les installations de gaz et d'appliquer les dispositions constructives de l'étude du CSTB en 2004 [1] en modifiant la largeur des joints verticaux d'affaissement ;

- bâtiment de forme compacte, sans sous-sol et sur trois niveaux (rez-de-chaussée, un étage et combles),
- ossature bois de type structure en panneaux de bois ou ossature métallique de type structure poteaux-poutres métalliques en profilés standards,
- hauteur d'étage inférieure à 3 m, hauteur totale maximale de 9 m,
- surface au sol de forme rectangulaire de largeur maximale de 10 m, de longueur maximale de 17 m et de rapport largeur/longueur supérieur ou égal à 1/2,

sous réserve de proscrire les installations de gaz et d'appliquer les dispositions constructives de l'étude du CSTB en 2006 [4] en modifiant la largeur des joints verticaux d'affaissement.

En effet, l'augmentation de la hauteur de la maison (1 niveau de plus) conduit à une augmentation de la largeur du joint vertical d'affaissement. Ces joints doivent être maintenus libres et dégagés de tous objets ou matériaux susceptibles de l'obstruer et de le rendre impropre à sa destination première. Ils doivent être protégés sur toutes leurs faces.

Lors de la formation en cuvette, c'est-à-dire sous l'effet de la courbure du terrain, la distance d'isolement entre les maisons peut être raccourcie (voir figure 4). Dans cette configuration, la largeur du joint vertical d'affaissement entre deux maisons s'écrit :

$$j_{1,2} = j_{1,2/0} - (\rho_1 H_1 + \rho_2 H_2)$$

où  $j_{1,2/0}$  est la largeur du joint vertical initial entre deux maisons de hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  avant l'apparition de la courbure du terrain, tandis que :

$$\rho_1 = L_1 / 2R_{\min} ; \rho_2 = L_2 / 2R_{\min}$$

sont respectivement les inclinaisons des murs de chaque maison par rapport à leur plans verticaux initiaux,  $L_1$  et  $L_2$  étant leur longueur et  $R_{\min}$  étant le rayon de courbure minimal de la cuvette d'affaissement.

Tenant compte du fait que la courbure du terrain n'est pas connue à ce jour, et que dans tous les cas  $\rho_1 \leq \rho_{\max}$  et  $\rho_2 \leq \rho_{\max}$ , pour se placer du côté de la sécurité, la condition de désolidarisation entre deux constructions voisines vérifiant :

$$j_{1,2} \geq 0$$

conduit à la condition de la largeur initiale du joint d'affaissement :

$$j_{1,2/0} \geq \rho_{\max} (H_1 + H_2)$$

dans laquelle  $\rho_{\max} = 4\%$  est la pente prévisible maximale de l'affaissement progressif lié à l'effondrement partiel du quartier 8. Cette dernière expression peut être traduite de la manière suivante : « **l'épaisseur du joint entre deux constructions doit être supérieure ou égale à 4% de la somme totale de la hauteur de chacune des constructions** ».

À titre d'exemple illustratif, un joint vertical d'affaissement de largeur d'environ 50 cm est nécessaire entre une nouvelle maison d'habitation R+2 de hauteur 9 m qui viendrait s'accoler à une maison existante d'un seul niveau d'une hauteur de 3 m.

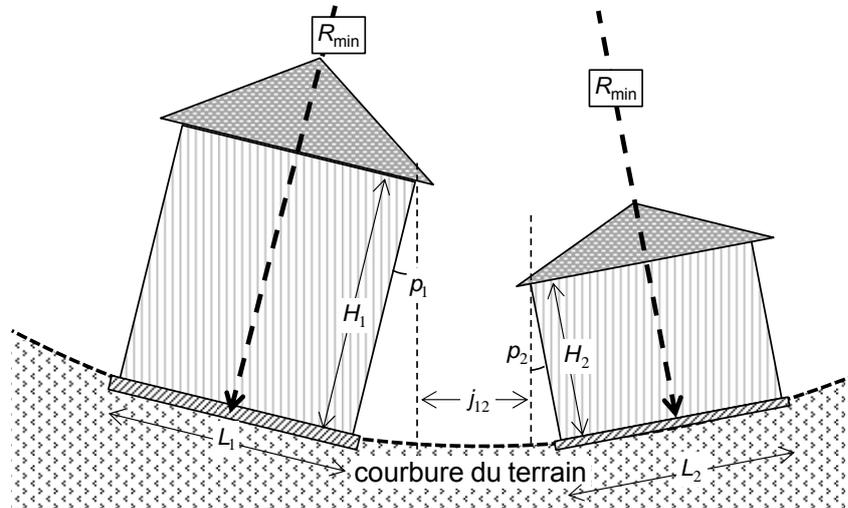


Figure 4: largeur du joint vertical d'affaissement entre deux maisons voisines

#### 4.4. Bâtiment à ossature bois ou métal pour les usages secondaires

Les bâtiments pour les usages secondaires (de type annexe, garage, piscine ou abri) visés par l'étude précédente du CSTB pour le bassin ferrifère nord-lorrain, sont à simple rez-de-chaussée sans sous-sol (voir rapport du CSTB, 2004 [1] pour plus de détails) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- bâtiment de forme compacte sur un seul niveau (rez-de-chaussée),
- ossature en béton avec façade ouverte,
- murs en blocs de béton et charpente traditionnelle,
- hauteur de mur inférieure ou égale à 3 m,
- surface au sol de forme rectangulaire de largeur maximale de 8 m, de longueur maximale de 4 m et de rapport largeur/longueur supérieur ou égal à 1/2,

Dans le cas où ces bâtiments sont à ossature bois ou métal, ce choix des matériaux devient un facteur favorable conduisant à un niveau d'endommagement moins important que celui des bâtiments à ossature en béton. Il en résulte que le niveau d'endommagement de ces bâtiments ne dépasse pas le niveau N3 pour la pente prévisible maximale égale à 4 % de la zone d'affaissement progressif liée à l'effondrement partiel du quartier 8, cette limite du niveau d'endommagement assurant la sécurité des occupants. Ces bâtiments conviennent en zone d'affaissement à condition de disposer des mesures constructives répondant aux principes disponibles dans le rapport du CSTB en 2004 [1].

## 5. MAISONS D'HABITATION PAR ASSEMBLAGE DE CONTAINERS REEMPLOYES

### 5.1. Description d'un container standard

Il s'agit d'un caisson en tôle métallique raidie de forme parallélépipédique et destiné à la manutention et le transport de marchandises. En général, les dimensions d'un container de base (figure 5 par exemple) sont normalisées au niveau international pour un transbordement d'un véhicule à l'autre : la longueur est de 6,058 m pour le modèle de 20 pieds et de 12,192 m pour le modèle de 40 pieds, la largeur est fixée à 2,438 m (8 pieds) tandis que la hauteur est fixée à 2,591 m (8,5 pieds). Le poids d'un container varie de 1,8 tonne (modèle 20 pieds) à 4,2 tonnes (modèle 40 pieds).

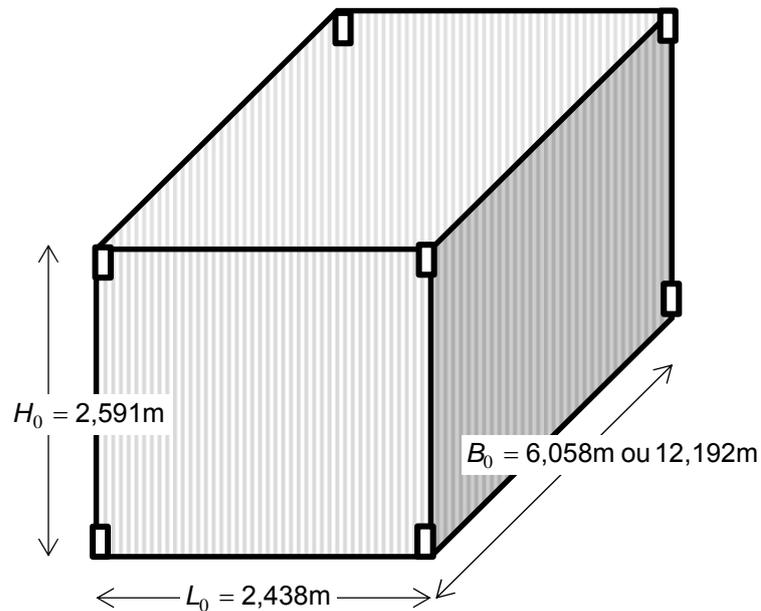


Figure 5: géométrie et dimensions d'un conteneur standard

## 5.2. Problématique des containers d'habitation en cas d'affaissement minier

Historiquement, l'idée d'utiliser des containers d'habitation vient des artistes hollandais. En France, la ville du Havre et le CROUS sont à l'initiative de la construction d'une résidence universitaire par assemblage de containers (voir figure 6 par exemple).



Figure 6: résidence à docks sur la ville du Havre (source internet)

En cas d'affaissement minier, les bâtiments se composant de containers présentent des caractéristiques rendant la vérification des exigences de sécurité structurale difficile. Dans ce contexte, cette présente section vise à enrichir les connaissances sur le comportement en cas d'affaissement minier de ce type de structure. Il permettra d'identifier, par exemple, d'éventuels phénomènes que les impératifs de la simplification pourraient conduire à négliger.

### 5.2.1. Un modèle simplifié

Le problème de stabilité d'un bâtiment, en cas d'affaissement minier, repose en tout premier lieu sur la connaissance de la géométrie du système. Du point de vue structurel, un container est autoportant et se présente d'un seul bloc dont les poteaux et les traverses en métal constituent l'ossature de la future maison.

Afin d'alléger l'exposé, on se limite dans un premier temps à la présentation d'un modèle simplifié, c'est-à-dire, au cas où l'effet favorable des parois de remplissage peut être négligé, le rez-de-chaussée du bâtiment peut être schématisé par un portique de hauteur  $H_0$  et de longueur  $L_0$  (figure 6). Les données relatives au chargement sont de type force gravitaire verticale  $F$ , les forces du vent pouvant être négligées, du fait du caractère accidentel de l'affaissement.

On s'intéresse dans cette section au problème de l'instabilité potentielle du rez-de-chaussée soumis à la charge gravitaire venant des étages supérieurs d'une part et à un affaissement du sol au niveau des fondations d'autre part.

Partant d'un état initial, c'est-à-dire avant l'apparition de l'affaissement minier, chaque poteau du bâtiment est soumis à une force axiale de compression  $N=F$  sur toute la hauteur du poteau. Cet effort est dû aux chargements gravitaires des étages supérieurs, classiquement de deux types : charges permanentes et charges d'exploitation.

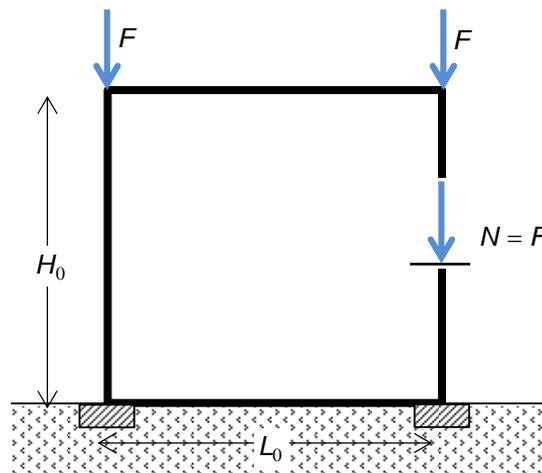


Figure 7: géométrie simplifiée du container

On analyse dans ce qui suit l'effet que peut avoir chaque mouvement élémentaire sur la stabilité d'un container.

#### 5.2.1.1. Sollicitations induites par le mouvement de translation du terrain

Dans l'hypothèse où les affaissements sont progressifs, c'est-à-dire sans effet dynamique notable, les changements de la géométrie de la structure du container peuvent être négligés. La géométrie initiale du container représente à la fois la configuration initiale et la configuration finale (c'est-à-dire après l'affaissement) du système.

La figure 8 représente un container dans sa position initiale et dans sa position actuelle obtenue par une simple translation dans le plan, les conditions de chargement restant inchangées. Dans ces conditions, certains impacts sur les réseaux enterrés sont à appréhender, mais la stabilité globale du container n'est pas menacée.

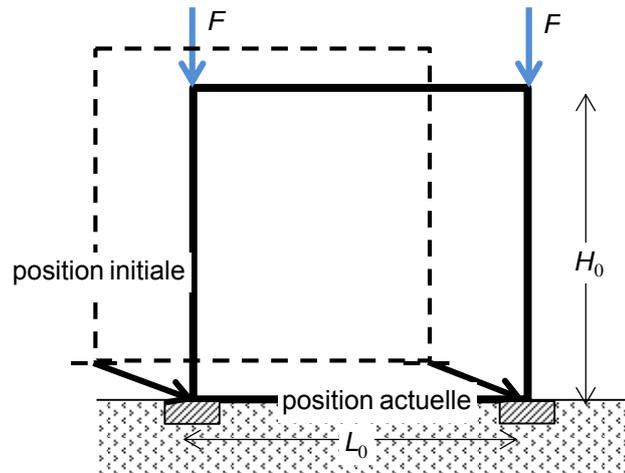


Figure 8: container soumis à un mouvement de translation du terrain

#### 5.2.1.2. Sollicitations induites par le mouvement de rotation du terrain

Le mouvement de rotation du terrain a pour conséquence une inclinaison généralisée du container. Cette inclinaison du container induit un excentrement de la charge gravitaire par rapport à son plan vertical initial. En conséquence, des moments de flexion sont générés dans les deux poteaux verticaux en plus des efforts de compression axiale préexistants (figure 9). À mesure que la pente du terrain augmente, l'excentrement correspondant de la charge gravitaire augmente et donc également les moments de flexion qui amplifient les déplacements transversaux et donc l'excentrement.

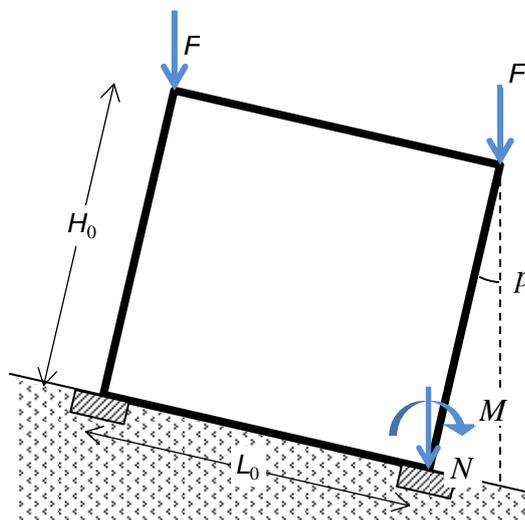


Figure 9: container soumis à une inclinaison du terrain

L'analyse de cette structure conduit à calculer, dans le cas le plus défavorable, les efforts de compression et de flexion en pied du poteau à droite, en tenant compte du fait que  $p$  (exprimé en radians)  $\approx \sin(p)$ , du fait de la faible valeur de  $p$  :

$$N_p = F ; M_p = FH_0 p$$

où  $p$  est la pente de l'affaissement (exprimée en radians) tandis que  $N_p$  et  $M_p$  sont respectivement l'effort normal et le moment de flexion engendrés par cette pente.

Dans l'hypothèse classiquement admise où les sections planes restent planes après déformation, la déformation est affine dans l'épaisseur du poteau. En supposant que le matériau qui constitue le poteau obéit à un comportement élastique linéaire, les contraintes maximales en équilibre avec l'effort normal de compression (figure 10(a)) et le moment de flexion (figure 10(b)) engendré par l'excentricité du poteau, sont respectivement :

$$\sigma_{c,p} = \frac{F}{hb} \quad \text{et} \quad \sigma_{f,p} = \frac{6FH_0\rho}{h^2b}$$

où  $h$  et  $b$  sont respectivement l'épaisseur et la largeur du poteau. Il en résulte que l'augmentation de la contrainte maximale initiale du poteau en cas d'affaissement minier peut s'écrire :

$$f_{\sigma,p} = \frac{\sigma_{c,p} + \sigma_{f,p}}{\sigma_{c,p}} = 1 + \frac{6H_0\rho}{h}$$

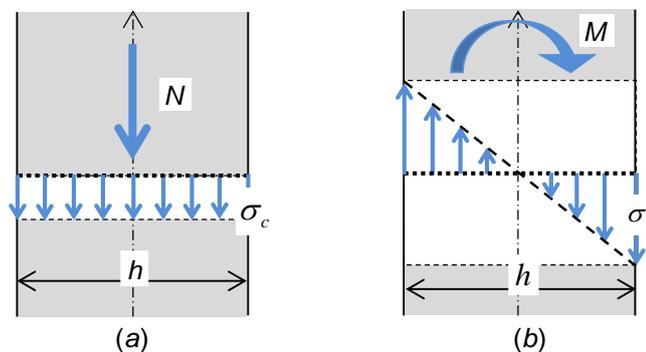


Figure 10: distribution des contraintes dans l'épaisseur du poteau sous sollicitations (a) d'un effort normal et (b) d'un moment fléchissant

À titre d'illustration, un calcul mené sur un poteau d'épaisseur  $h=10\text{cm}$  et de hauteur  $H_0=2,6\text{ m}$ , montre une augmentation d'environ 2,5 fois la contrainte initiale pour une pente de 1 %, d'environ 4 fois pour une pente de 2 % (voir figure 11), ce qui explique pourquoi la pente est aussi importante.

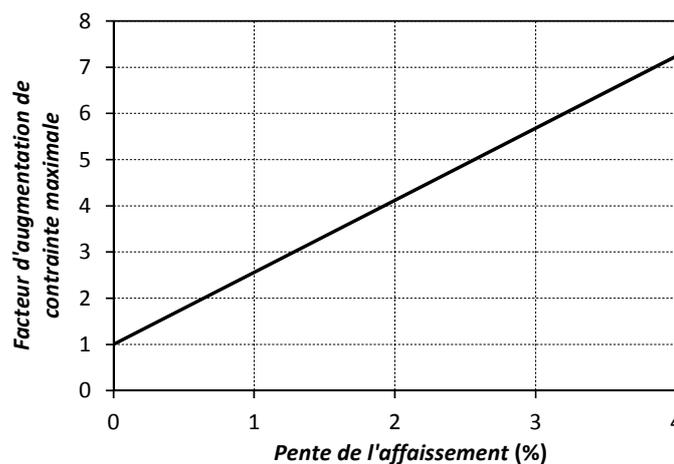


Figure 11: évolution du facteur d'augmentation de contraintes en fonction de la pente

On note que le calcul simplifié exposé ci-dessus, néglige tous les effets favorables des conditions aux limites telles que les hyperstaticités qui existent entre les poteaux et les poutres ainsi que la plasticité des matériaux constitutifs.

### 5.2.1.3. Sollicitations induites par la courbure du terrain

La figure 12 représente un container sur un terrain courbe, concave ou convexe, les modifications des conditions de chargement étant négligeables.

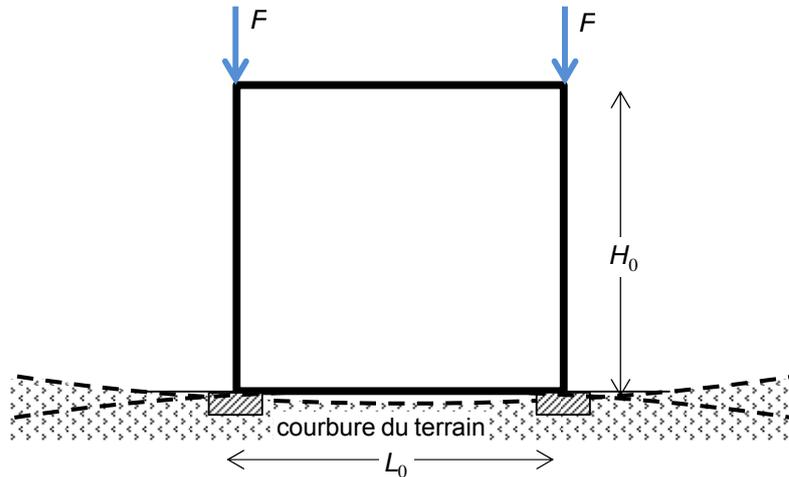


Figure 12: container soumis à une courbure du terrain

Pour le cas de la zone d'affaissement progressif liée à l'effondrement partiel du quartier 8, l'exploitation de la mine de sel est effectuée à une profondeur importante, cette dernière étant de 162,5 m (voir rapport de Geoderis, 2014 [3]), ce qui induit donc une faible courbure du terrain. Dans les conditions où les courbures du terrain sont très faibles, c'est-à-dire les rayons de courbure sont très grands par rapport aux dimensions du container, ces courbures peuvent avoir certains impacts sur les réseaux enterrés et la fondation.

### 5.2.1.4. Sollicitations induites par la déformation horizontale du terrain

Il convient tout d'abord de noter que les translations et rotations du terrain se transmettent intégralement au bâti alors que les déformations horizontales et les courbures du terrain peuvent être gênées par la présence de l'ouvrage. La proportion des déformations se transmettant à la structure dépend donc de la rigidité relative du bâti par rapport à celle du terrain. Ce phénomène est connu sous le nom « d'interaction sol-structure ». En conséquence, la déformation horizontale et la courbure de la structure engendrées par l'affaissement sont en général plus petites que celles du terrain.

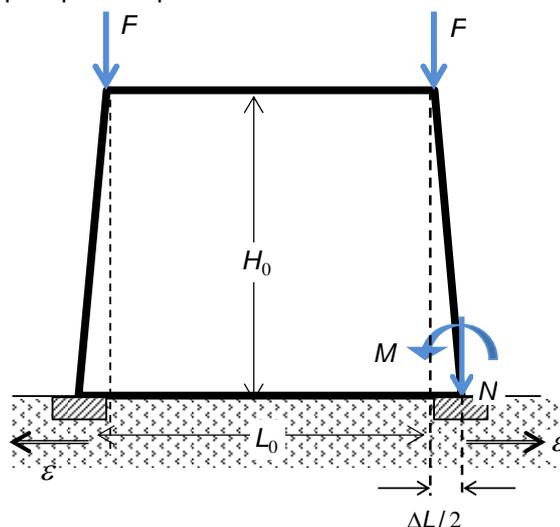


Figure 13: container soumis à une déformation horizontale du terrain

Tenant compte du fait que la déformation horizontale du sol ne peut se transmettre entièrement à la structure, et que la structure est symétrique par rapport à son plan médian, le déplacement horizontal du pied de chaque poteau par rapport à son plan initial vertical s'écrit :

$$\Delta L = c_\varepsilon L_0 \varepsilon / 2$$

où  $\varepsilon$  est la déformation horizontale du sol et  $c_\varepsilon \leq 1$ , est le coefficient de transmission de la déformation horizontale du sol au container.

Le déplacement horizontal de la fondation du container induit un excentrement de la charge gravitaire par rapport à son plan initial. En conséquence, des moments de flexion sont générés dans les deux poteaux verticaux en plus des efforts de compression axiale préexistants (voir figure 13). À mesure que la déformation horizontale du sol augmente, l'excentrement correspondant de la charge gravitaire augmente et donc également les moments de flexion qui amplifient les déplacements transversaux et donc l'excentrement.

L'analyse de cette structure conduit à calculer les efforts de compression et de flexion en pied de chaque poteau :

$$N_\varepsilon = F ; M_\varepsilon = F\varepsilon = c_\varepsilon FL_0 \varepsilon / 2$$

où  $N_\varepsilon$  et  $M_\varepsilon$  sont respectivement l'effort normal et le moment de flexion engendrés par la déformation horizontale du sol.

Dans le cadre du comportement élastique linéaire du matériau constitutif, les contraintes maximales en équilibre avec l'effort normal de compression et le moment de flexion engendré par l'excentricité de ce dernier s'écrivent :

$$\sigma_{c,\varepsilon} = \frac{F}{hb} \text{ et } \sigma_{f,\varepsilon} = \frac{3c_\varepsilon FL_0 \varepsilon}{h^2 b}$$

ce qui conduit au facteur de l'augmentation de la contrainte maximale initiale du poteau en cas d'affaissement du terrain :

$$f_{\sigma,\varepsilon} = \frac{\sigma_{c,\varepsilon} + \sigma_{f,\varepsilon}}{\sigma_{c,\varepsilon}} = 1 + \frac{3L_0 c_\varepsilon \varepsilon}{h}$$

À titre d'exemple illustratif, la figure 14 ci-dessous représente l'évolution du facteur d'augmentation de contraintes en fonction de la déformation horizontale du sol, du même poteau d'épaisseur  $h=10$  cm ci-dessus, le coefficient de transmission de la déformation horizontale du sol au bâti étant  $c_\varepsilon=1$  et la longueur du portique étant  $L_0=12$  m.

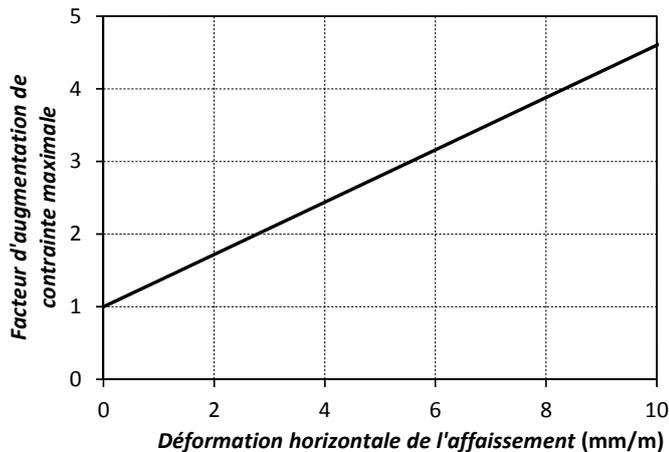


Figure 14: évolution du facteur d'augmentation de contraintes en fonction de la déformation horizontale du sol en cas d'affaissement du terrain

On observe sur la dernière figure une augmentation d'environ 2 fois la contrainte initiale pour une déformation horizontale du sol de 3 mm/m, d'environ 3 fois pour une déformation horizontale de 6 mm/m et d'environ 4,5 fois pour une déformation horizontale de 10 mm/m.

#### 5.2.1.5. Comportement des parois de remplissage

La pente, la déformation horizontale et la courbure de l'affaissement du terrain engendrent des sollicitations supplémentaires sur le portique ainsi que sur le mur de remplissage. Elles modifient de façon importante l'état initial de la paroi de remplissage, induisant par exemple, du fait de l'incompatibilité géométrique, des déformations. Les figures 15 à 17 ci-dessous illustrent les désordres potentiels sur la paroi de remplissage dans de telles conditions.

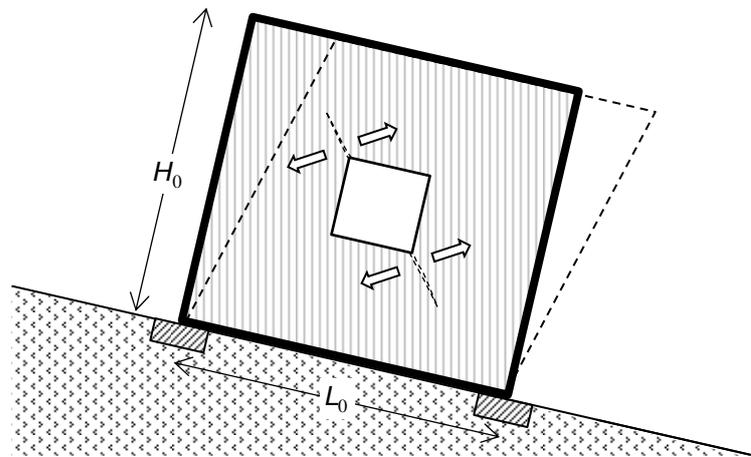


Figure 15: exemple de fissures diagonales induites par la mise en parallélogramme de la paroi de remplissage en cas de mise en pente du terrain

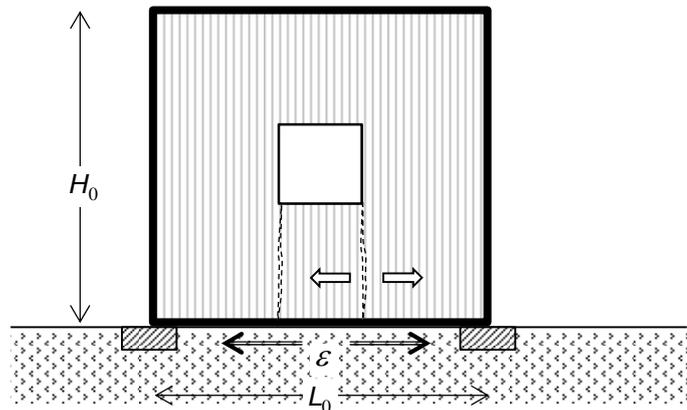


Figure 16: exemple de fissures verticales induites par la déformation horizontale du terrain

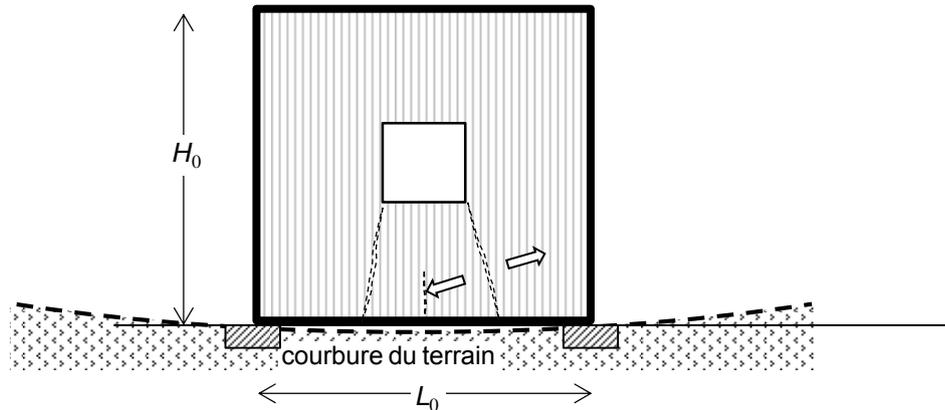


Figure 17: exemple de fissures verticales et diagonales induites par la courbure du terrain

### 5.2.2. Bâtiment réalisé par assemblage de containers

La situation est plus délicate lorsque le cas des containers assemblés est envisagé, ce qui augmente en premier lieu la difficulté de mise en œuvre sur un terrain plat. Dans ces conditions, la complexité augmente rapidement avec les configurations architecturales imaginables. La forme de l'assemblage, l'éventualité d'une interaction avec une autre construction accolée ou proche, l'éventualité d'une interaction sol-structure des parties enterrées de l'ouvrage ainsi que la nature du terrain (pente, type de sol,...), font apparaître des sollicitations supplémentaires auxquelles conduisent les mouvements d'affaissement du terrain.

Pour aller au-delà des difficultés principalement liées à la réalisation des bâtiments par assemblage des containers, il était nécessaire de développer des méthodes d'analyse mettant en jeu des paramètres intervenant dans l'analyse de la stabilité de ce type de structure, notamment pour des éléments d'assemblage. De ce point de vue, nous recensons, dans la suite, les différentes configurations simples dont les principes de constructibilité ne peuvent relever que d'une étude spécifique.

#### 5.2.2.1. Sollicitations supplémentaires induites par le mouvement de rotation du terrain

Dans le cas où les containers sont superposés les uns sur les autres, le mouvement de rotation du terrain peut induire des efforts de cisaillement sur des éléments d'assemblage (voir figure 18 par exemple).

Lorsque le bâtiment est constitué de plusieurs containers, la résultante des efforts verticaux peut provoquer un basculement de l'ensemble (figure 19).

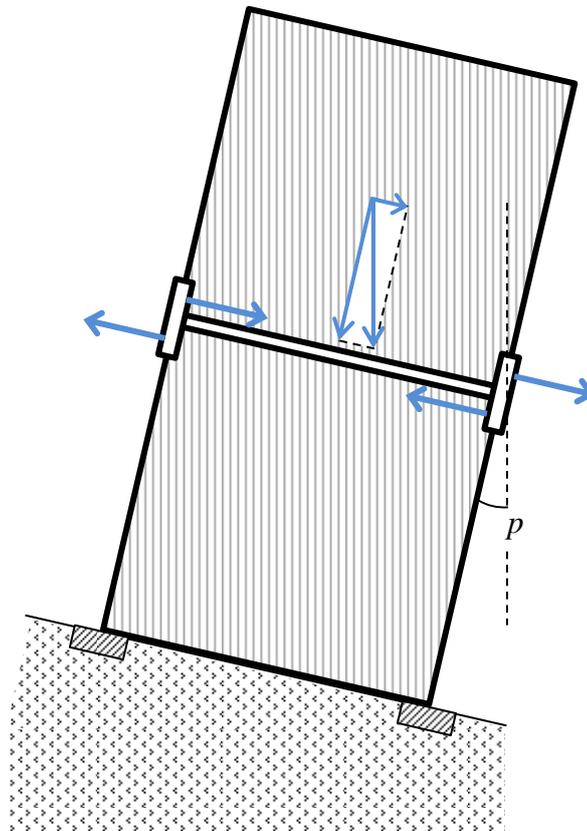
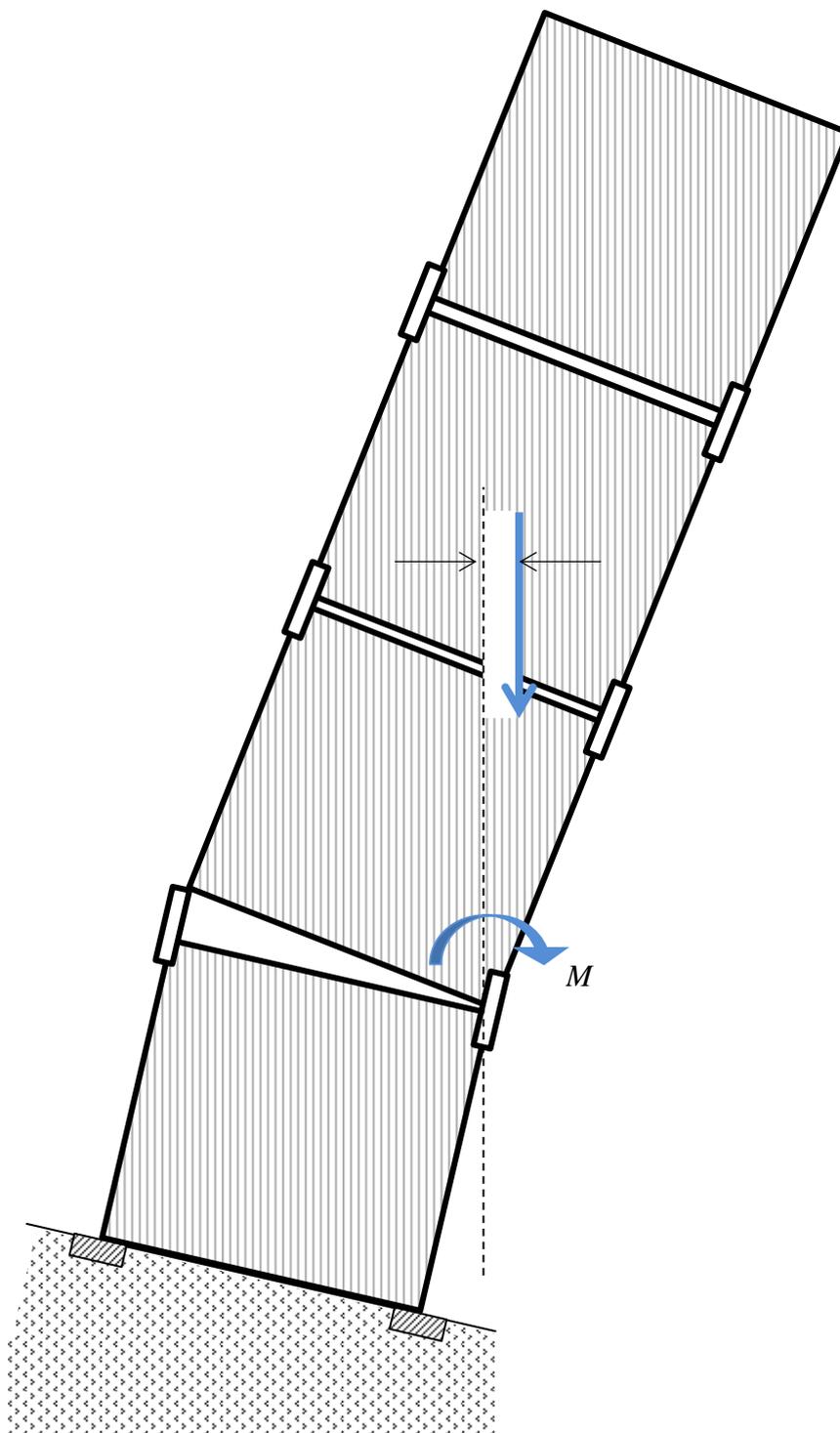


Figure 18: exemple de sollicitations supplémentaires induites par la pente du sol sur des éléments d'assemblage de deux containers superposés



*Figure 19: exemple de risque d'instabilité d'un bâtiment se composant de plusieurs containers superposés*

Lorsque des containers sont de hauteurs différentes, ceux de hauteur plus faible représentent des points d'appui pour ceux de hauteur plus importante (figure 20 par exemple). Dans ce cas, la paroi des containers de plus grande hauteur risque d'être littéralement découpée.

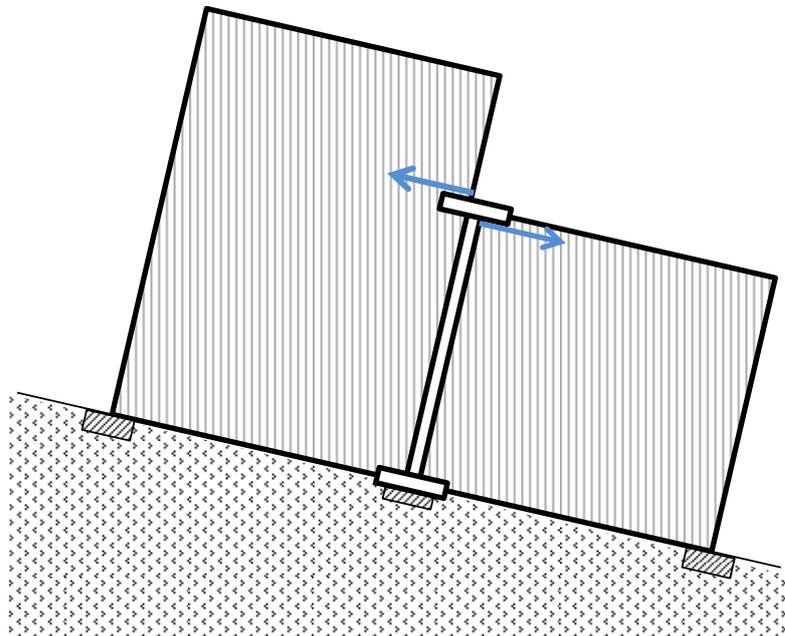


Figure 20: exemple de sollicitations supplémentaires induites par la pente du sol sur des éléments d'assemblage de deux containers de hauteurs différentes

#### 5.2.2.2. Sollicitations supplémentaires induites par la courbure du terrain

Les figures 21 et 22 ci-dessous représentent des sollicitations supplémentaires induites par la courbure concave et convexe du terrain sur deux containers accolés. Cette disposition de containers mitoyens ou accolés présente une forte longueur face à la courbure en début et en fin d'affaissement, ce qui induit donc une perte de contact entre la fondation et le sol d'assise. Il en résulte que les moments de flexion supplémentaires sont générés lorsque la fondation se trouve en position « porte-à faux ».

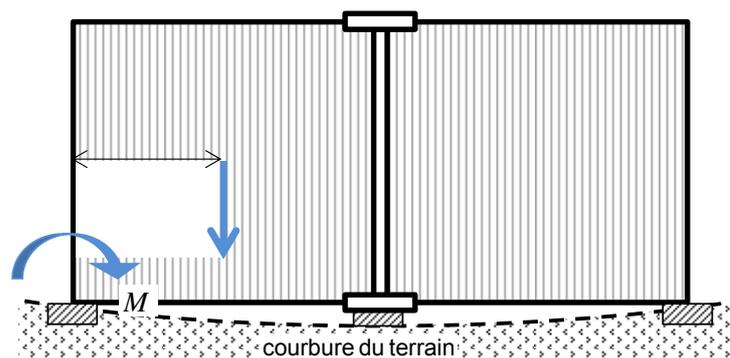


Figure 21: exemple de sollicitations supplémentaires induites par la courbure concave du sol sur des éléments d'assemblage

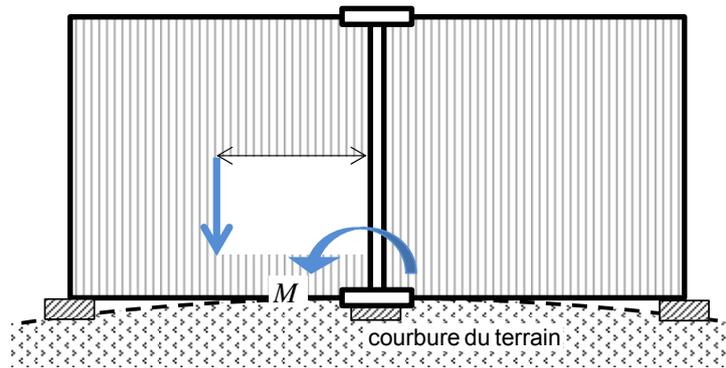


Figure 22: exemple de sollicitations supplémentaires induites par la courbure convexe du sol sur des éléments d'assemblage

### 5.2.2.3. Sollicitations supplémentaires induites par la déformation horizontale du terrain

La fondation représente la partie en contact avec le sol où les efforts sont transmis à la structure. Cet effort peut se transmettre aux éléments d'assemblage entre deux containers accolés soumis à une déformation horizontale du sol (figure 23).

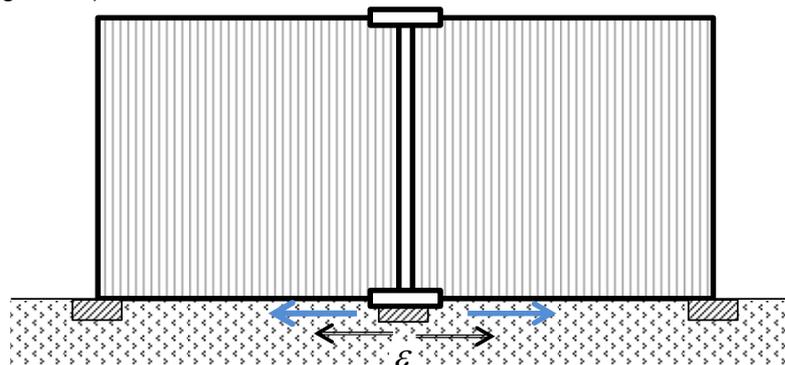


Figure 23: exemple de sollicitations supplémentaires induites par la déformation horizontale du sol sur des éléments d'assemblage

Dans le cas où le bâtiment possède un décrochement au niveau du sous-sol (figure 24 par exemple), la déformation horizontale du sol engendre une poussée de terre supplémentaire sur la partie enterrée, ce qui induit ensuite une combinaison d'effort tranchant-moment fléchissant sur cette partie.

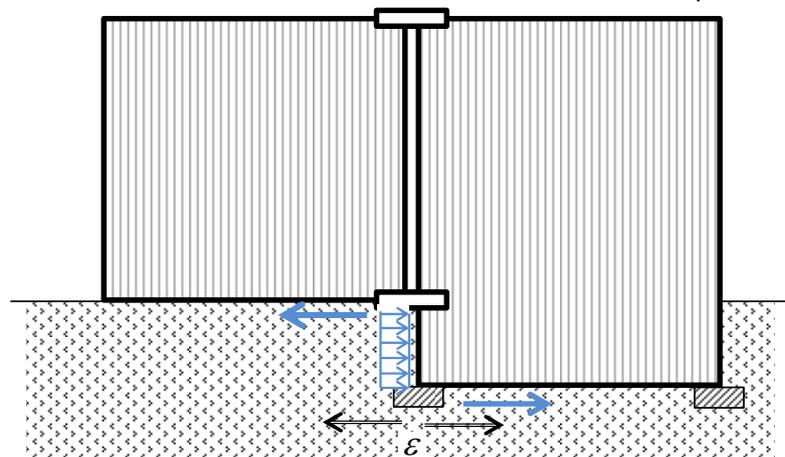


Figure 24: exemple de sollicitations supplémentaires induites par la déformation horizontale du sol sur la partie enterrée

### 5.3. Problématique des containers réemployés

Une maison construite de containers réemployés présente un faible coût et un faible impact écologique du fait que les containers sont recyclés et leur mise en place relativement rapide. En pratique, les containers utilisés pour la construction de maisons sont les containers « Dry » car ce type de containers est spécialement conçu pour transporter des marchandises non polluantes et surtout, non liquides.

Du point de vue réglementaire, la mise en œuvre des containers formant un bâtiment d'habitation doit répondre à des exigences consistant à préserver les vies humaines dans les meilleures conditions, en facilitant l'évacuation des personnes en cas de sinistre. Les modèles de calcul et de dimensionnement existants sont adaptés aux constructions de bâtiments dont le comportement diffère très sensiblement de celui des containers. Les bâtiments doivent respecter, au moins, les règles de l'art de la construction : les Normes Françaises – Documents Techniques Unifiés (et les Avis Techniques) régissant notamment les modes de mise en œuvre de techniques de construction et les règles usuelles de conception et de calculs (Eurocode 2 pour les structures en béton armé, Eurocode 3 pour les structures métalliques, Eurocode 4 pour les structures mixtes acier-béton, et Eurocode 6 pour les ouvrages en maçonnerie), tandis que les containers doivent être conformes aux normes ISO 1496-1 (1990) et ISO 668 (1995).

Nous avons vu ainsi que les configurations architecturales d'une maison d'habitation par assemblage de containers sont sources de nombreuses difficultés. Lorsqu'il s'agit des containers réemployés, les problèmes spécifiques les plus courants concernent :

- les caractéristiques résiduelles du matériau (les tôles sont souvent attaquées par la corrosion),
- les changements de géométrie dont l'effet ne peut plus être négligé (les parois sont déformées ou pliées),
- les modifications par découpe ou soudure, voire réparations, au cours d'utilisation dans le transport de marchandises.

Bien que la perte des caractéristiques mécaniques soit susceptible d'accroître le risque de ruine de la structure, il reste encore très difficile d'évaluer les caractéristiques résiduelles vis-à-vis des conditions d'utilisation. De ce point de vue, les schémas de vérification ci-dessus sont d'utilisation simple et permettent une compréhension de premier niveau, par simple identification de l'ouvrage depuis sa géométrie, mais pour vérifier la stabilité des containers réemployés d'habitation, il faut effectuer un niveau de reconnaissance de ces éléments qui n'est pas toujours possible.

### 5.4. Une première estimation du niveau d'endommagement d'une maison container

La réalisation d'une maison à partir des containers consiste en premier lieu à construire des fondations, puis à découper des ouvertures sur chaque container et enfin à liaisonner ces containers ensemble. Dans ce cas, la vérification de plusieurs containers formant un bâtiment de grandes dimensions se révèle délicate, et on se restreint en pratique à des vérifications partielles d'un tel bâtiment sous la forme d'interaction entre containers.

Dans un souci de simplification de la démarche, et pour une application plus opérationnelle de la démarche en vue de pouvoir facilement réaliser des études spécifiques ultérieures, nous avons choisi dans cette sous-section d'analyser une petite maison container à deux niveaux (R+1) de forme compacte et simple (figure 25).

Nous partirons ici de l'hypothèse que les parois, les pièces de coin et les points de fixation des containers réemployés sont en bon état, ce qui conduit donc aux dommages ne dépassant pas ceux du niveau N3, limite avec laquelle la sécurité des occupants n'est pas directement menacée en cas d'affaissement progressif lié à l'effondrement partiel du quartier 8 de la commune de Varangéville. Ce niveau est estimé par des calculs exploratoires de sollicitations induites par l'affaissement de terrain, ainsi que sur avis

d'expert, en supposant que les mesures constructives que nous avons pu relever dans ce qui suit sont respectées.

Il convient par ailleurs de souligner que l'objectif de la présente étude ne vise que la possibilité de réutiliser des containers réemployés pour l'usage d'habitation. Une autre étude spécifique reposant sur l'analyse des bâtiments type se révèle nécessaire pour permettre de réduire la vulnérabilité de ces bâtiments à l'aide des techniques et outils disponibles.

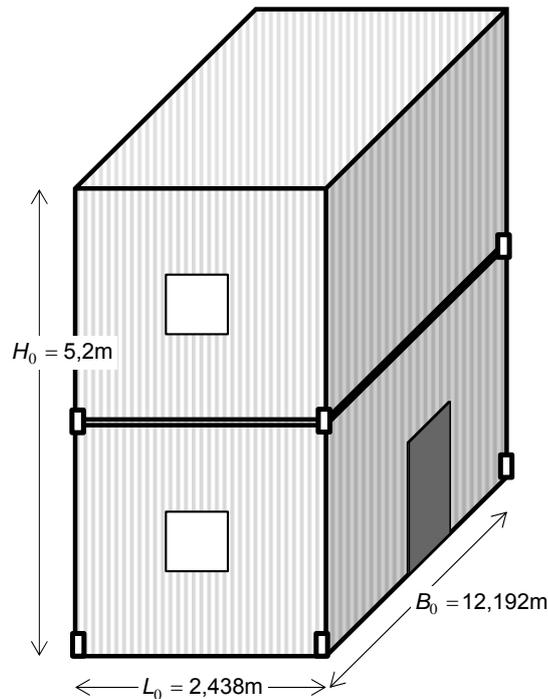


Figure 25: petite maison d'habitation R+1

#### 5.4.1. Fondations

Les fondations représentent la partie en contact avec le sol où les efforts sont transmis à la structure. De ce point de vue, l'ensemble des fondations doit être ferrillé conformément à l'Eurocode 2 sous combinaisons accidentelles pour résister à l'effort horizontal engendré par la déformation horizontale du sol et des réactions verticales.

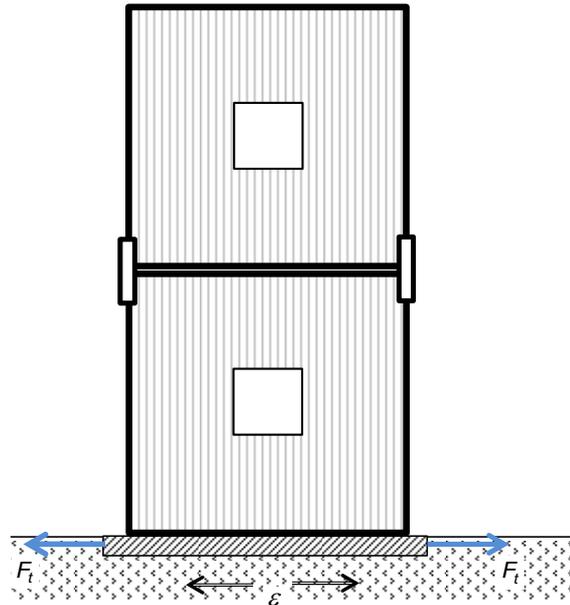


Figure 26: effort de traction-compression engendré par la déformation horizontale du sol

À titre de simplification, l'effort horizontal sur les fondations engendré par la déformation horizontale du sol (voir figure 26) s'écrit :

$$F_t = \frac{1}{2} P \mu$$

où  $P$  et  $\mu$  sont respectivement le poids du bâtiment et le coefficient de frottement à l'interface sol/fondation, ce coefficient pouvant prendre la valeur 2/3 (Neuhaus, 1965 [8]; Yokel *et al.*, 1981 [9] et Deck, 2002 [10]).

Compte tenu du faible poids de cette maison container, les fondations ne conduisent pas à de gros travaux. Elles ont en principe des dimensions plus faibles que celles des procédés traditionnels en béton armé ou maçonnerie chaînée.

#### 5.4.2. Ouvertures

À la base, un container est une structure autoportante et compacte. Lorsque des ouvertures, portes et fenêtres, sont créées sur des parois verticales, la structure du container a tendance à être fragilisée car ces ouvertures conduiront à des concentrations de contraintes sur le bâtiment en cas d'affaissement du terrain. En conséquence, il est conseillé de limiter le nombre d'ouvertures dans les parois. Ces ouvertures doivent être aussi petites que possible et placées au centre de chaque paroi afin de conserver une symétrie du système. Dans le cas d'une maison d'habitation constituée de deux niveaux ou plus, il faut, si possible, concevoir l'ouverture qui servira à placer des escaliers, au centre de l'ouvrage.

#### 5.4.3. Liaison

La liaison entre deux containers superposés ou entre le container situé en bas et les fondations, se fait sur les huit sommets du parallélépipède. A titre de simplification, ces éléments de liaison doivent être dimensionnés pour résister aux efforts de cisaillement (figure 27) :

$$V_1 = \frac{1}{4} (P_{c1} + P_{c2}) \rho_{\max} \quad \text{et} \quad V_2 = \frac{1}{4} P_{c2} \rho_{\max}$$

où  $P_{c1}$  et  $P_{c2}$  sont respectivement les poids propres de deux containers en bas et en haut, tandis que  $\rho_{\max}$ , prise égale à 4 %, est la pente prévisible maximale de l'affaissement progressif lié à l'effondrement partiel du quartier 8.

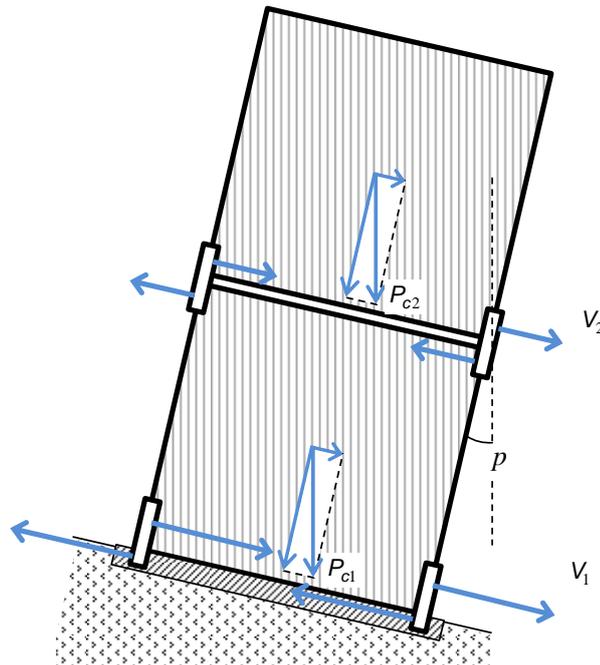


Figure 27: efforts de cisaillement sur les éléments de liaison

## 6. CONCLUSION

En résumé, les conclusions suivantes sont émises :

1. Il est possible d'appliquer les études préalablement réalisées par le CSTB [1,4] aux constructions neuves, dites alternatives, sur la zone d'affaissement progressif liée à l'effondrement partiel du quartier 8 de la commune de Varangéville.
2. Il est possible de construire avec un surcoût évalué à 10%, des maisons d'habitation à ossature bois ou métal limitées à R+2 dont les caractéristiques sont les suivantes :

- bâtiment de forme compacte, sans sous-sol et sur trois niveaux (rez-de-chaussée, un étage et combles),
- ossature sans éléments fragiles tels que grandes trémies, grands balcons, éléments très élancés,
- hauteur d'étage inférieure à 3 m, hauteur totale maximale de 9 m,
- surface au sol de forme rectangulaire de largeur maximale de 9 m, de longueur maximale de 14 m et de rapport largeur/longueur supérieur ou égal à 1/2,
- petites ouvertures (largeur inférieure à 1,5 m).

sous réserve de proscrire les installations de gaz et d'appliquer les dispositions constructives de l'étude du CSTB en 2004 [1], en modifiant la largeur des joints d'affaissement conformément aux résultats du paragraphe 4.3 du présent rapport.

- bâtiment de forme compacte, sans sous-sol et sur trois niveaux (rez-de-chaussée, un étage et combles),
- ossature bois de type structure en panneaux de bois ou ossature métallique de type structure poteaux-poutres métalliques en profilés standards,
- hauteur d'étage inférieure à 3 m, hauteur totale maximale de 9 m,
- surface au sol de forme rectangulaire de largeur maximale de 10 m, de longueur maximale de 17 m et de rapport largeur/longueur supérieur ou égal à 1/2,

sous réserve de proscrire les installations de gaz et d'appliquer les dispositions constructives de l'étude du CSTB en 2006 [4], en modifiant la largeur des joints d'affaissement conformément aux résultats du paragraphe 4.3 du présent rapport.

3. Il est possible de construire des bâtiments à ossature bois ou métal pour les usages secondaires (de type annexe, garage, piscine, abri) à simple rez-de-chaussée sans sous-sol, sous réserve d'appliquer les dispositions constructives de l'étude du CSTB en 2004 [1].
4. Il est possible de construire des maisons d'habitation à partir de containers réemployés. Ceci sous réserve de réaliser une étude spécifique à partir du cahier des charges pour les projets de constructions neuves sur la zone d'affaissement progressif liée à l'effondrement partiel du quartier 8. Ce cahier des charges, présenté à l'annexe 1 du présent rapport, a pour objet de porter à la connaissance des maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre et acteurs de la construction en général, les caractéristiques de l'aléa à considérer lors de projet de construction neuve sur la commune de Varangéville ainsi que le niveau d'endommagement maximum retenu.

*Remarque :*

Il est important de rappeler qu'on ne cherche pas à faire une étude de cas. Le fait d'étudier des configurations, parfois très sécuritaires, donne des situations générales qui pourraient être exploitées à l'échelle d'une commune, et non sur un ouvrage isolé. Les dispositions constructives préconisées dans ce rapport ainsi que celles des études du CSTB en 2004 et 2006 [1,4] reposent sur des solutions types et résultent de dimensionnement forfaitaire. De ce point de vue, des études particulières restent toujours envisageables dans la mesure où elles sont effectuées par des bureaux d'études spécialisés dans le domaine de la construction. Ces études pourront alors reposer sur des hypothèses plus larges que celles retenues dans ces documents et permettre un dimensionnement adapté à un projet architectural particulier.

## 7. LISTE DES DOCUMENTS DE REFERENCE

- [1] CSTB - " Etude des conditions de constructibilité dans le bassin sidérurgique et ferrifère Nord-Lorrain" – Rapport d'étude – 2004
- [2] CSTB - " Examen des conditions d'applicabilité des guides de constructibilité existants du CSTB, établis pour les zones ferrifères, aux constructions nouvelles des zones salifères. Site : Varangéville (54)" – Rapport d'étude – 2015
- [3] Geoderis - " Mine de sel de Varangéville. Évaluation des aléas mouvements de terrain associés aux quartiers anciens " - Rapport E2013/190DE – 13LOR2230 - 27/01/2014.
- [4] CSTB - " Vulnérabilité des modes constructifs alternatifs vis-à-vis des risques d'affaissement miniers" – Rapport d'étude – 2006
- [5] National Coal Board - " Subsidence Engineering's handbook " – National Coal Board London – 1975
- [6] Geddes J.D. - " Structural design and ground movements. Ground movement and their effects on structures" - Surrey University Press – 1984
- [7] Deck O., Al Heib M., Homand F., Gueniffey Y., Wojtkowiak F. - " Méthodes de prévision des dégradations des structures bâties en zone d'affaissement minier " - Revue française de Géotechnique, 15-33. <ineris-00961864>. – 2002
- [8] Neuhaus E. H. - " A.B.C. de la construction des maisons d'habitation en zones d'affaissements miniers" – Editions Eyrolles, traduit par Soots – 1965

[9] Yokel F. Y., Salomone L. A., Gray R. E. - " Housing construction in areas of mine subsidence " - Journal of Geotech. Engineering, 108(GT9) – 1982

[10] Deck O. - " Etude des conséquences des affaissements miniers sur le bâti: proposition pour une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité du bâti " - Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine – 2002

# Annexe

## Annexe 1: Cahier des charges pour la réalisation d'une étude de projet de construction neuve sur la commune de Varangéville

La présente annexe a pour objet de porter à la connaissance des maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre et acteurs de la construction en général les caractéristiques de l'aléa à considérer dans le cadre de l'étude de projet de construction neuve sur la commune de Varangéville ainsi que le niveau d'endommagement maximum retenu.

### Aléas affaissement minier

Les travaux réalisés par Geoderis ont permis d'établir une carte des aléas des mouvements de terrain au droit des 13 anciens quartiers en cas d'*ennoyage par de l'eau ou de la saumure*. L'aléa en condition de *mine sèche* n'a pas été retenu (Geoderis, 2014 [3]). L'arrivée d'eau dans les vieux quartiers de la mine de sel pourrait provoquer un effondrement brutal du sol sur l'ensemble des quartiers 1 à 13, à l'exception de la zone d'affaissement progressif liée à l'effondrement partiel du quartier 8 (figure 28). Les paramètres relatifs aux mouvements de terrain de cette dernière zone du quartier 8 en cas d'ennoyage par de l'eau ou de la saumure, sont rappelés comme suit :

- Profondeur d'exploitation : 162,5 m.
- Affaissement maximal  $A_m$  : 1 m.
- Pente maximale  $p_{max}$  : 4 %.
- Déformation horizontale maximale  $\epsilon_{max}$  : 10 mm/m.

On note que l'apparition d'un effondrement brutal susceptible d'être traduit par des effets dynamiques sur les bâtiments, nous amène à introduire des modèles de type interaction sol-structure. Cependant, lorsque les affaissements sont de grandes amplitudes et soudains, rien de tel n'apparaît dans la littérature. Il est très difficile, voire impossible, avec les techniques utilisées dans le bâtiment, de limiter les désordres dans de telles conditions. Il s'agit là de phénomènes imprévisibles sans surveillance, et dont la manifestation est la disparition du sol supportant la construction. Il en résulte qu'un tel niveau de sévérité, ajouté au caractère soudain, ne permet à aucune disposition constructive connue ni de prémunir une construction quelconque contre l'effondrement brutal, ni de garantir la sécurité des occupants. En conséquence, ce cahier des charges se limite en zone d'affaissement progressif liée à l'effondrement partiel du quartier 8 de la commune.



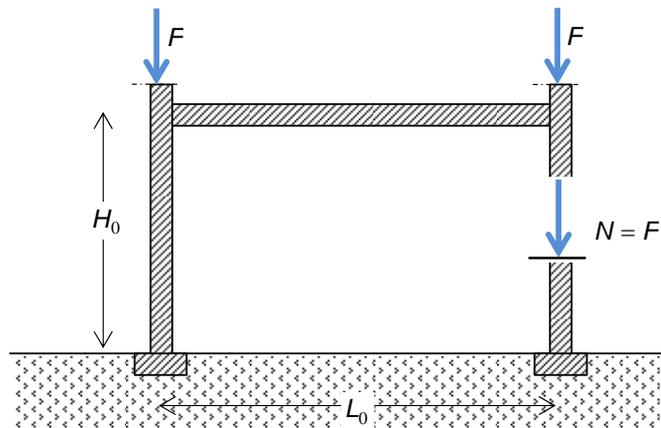


Figure 29: géométrie simplifiée du bâti

En cas d'affaissement minier, différents effets plus ou moins prévisibles peuvent se produire. Du point de vue des mouvements en surface au voisinage d'une structure lors d'un affaissement progressif, le mouvement d'un bâtiment peut être décomposé selon deux mouvements de corps rigides de translation et de rotation, et deux déformations, une engendrée par la déformation horizontale du sol et l'autre due à la courbure du terrain (voir figure 30 présentée par Geddes, 1984 [6], citée par Deck *et al.*, 2002 [7]).

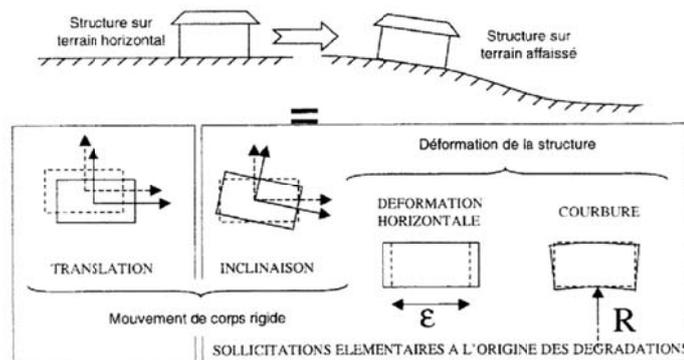


Figure 30: décomposition des sollicitations sur le bâti [6]

On analyse dans ce qui suit l'effet que peut avoir chaque mouvement élémentaire sur la stabilité d'un bâtiment.

#### Sollicitations induites par le mouvement de translation du terrain

Dans l'hypothèse où les affaissements sont progressifs, c'est-à-dire sans effet dynamique notable, les changements de la géométrie de la structure du bâtiment peuvent être négligés. La géométrie initiale du bâtiment représente à la fois la configuration initiale et la configuration finale (c'est-à-dire après l'affaissement) du système.

La figure 31 représente un bâti dans sa position initiale et dans sa position actuelle obtenue par une simple translation dans le plan, les conditions de chargement restant inchangées. Dans ces conditions, certains impacts sur les réseaux enterrés sont à appréhender, mais la stabilité globale du bâtiment n'est pas menacée.

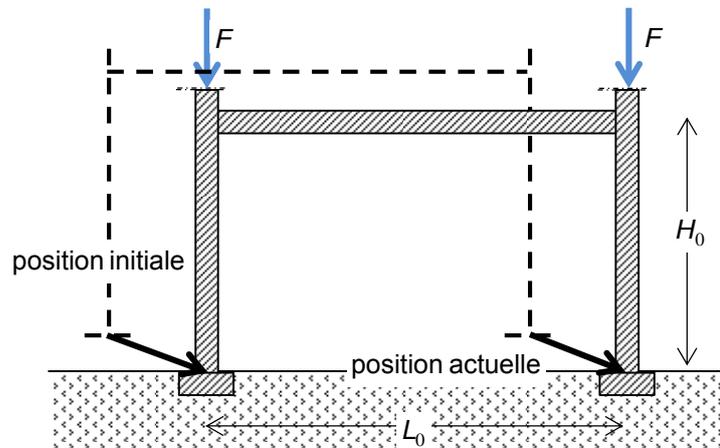


Figure 31: bâtiment soumis à un mouvement de translation du terrain

Sollicitations induites par le mouvement de rotation du terrain

Le mouvement de rotation du terrain a pour conséquence une inclinaison généralisée du bâtiment. Cette inclinaison du bâti induit un excentrement de la charge gravitaire par rapport à son plan vertical initial. En conséquence, des moments de flexion sont générés dans les deux poteaux verticaux en plus des efforts de compression axiale préexistants (figure 32). À mesure que la pente du terrain augmente, l'excentrement correspondant de la charge gravitaire augmente et donc également les moments de flexion qui amplifient les déplacements transversaux et donc l'excentrement.

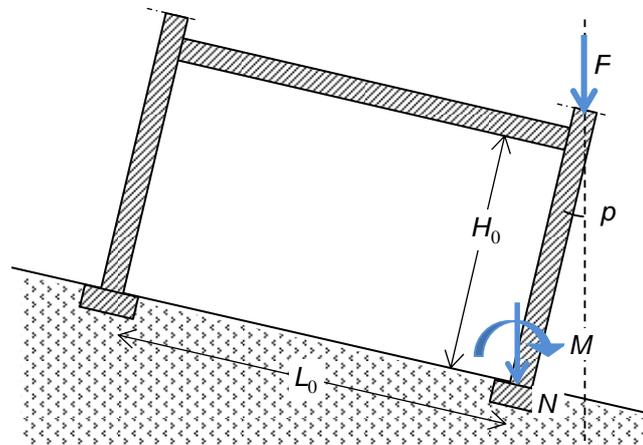


Figure 32: bâtiment soumis à une inclinaison du terrain

L'analyse de cette structure conduit à calculer, dans le cas le plus défavorable, les efforts de compression et de flexion en pied du poteau à droite, en tenant compte du fait que  $p$  (exprimé en radians)  $\approx \sin(p)$ , du fait de la faible valeur de  $p$  :

$$N_p = F \quad ; \quad M_p = FH_0 p$$

où  $p$  est la pente de l'affaissement (exprimée en radians) tandis que  $N_p$  et  $M_p$  sont respectivement l'effort normal et le moment de flexion engendrés par cette pente.

Sollicitations induites par la courbure du terrain

La figure 33 représente un bâtiment sur un terrain courbe, concave ou convexe, les modifications des conditions de chargement étant négligeables. En général, la mine de sel est localisée à une profondeur importante, ce qui induit donc une faible courbure du terrain.

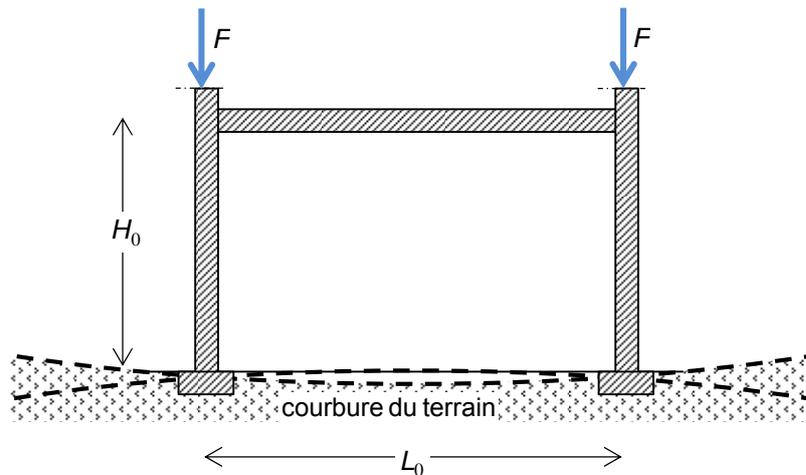


Figure 33: bâtiment soumis à une courbure du terrain

Dans les conditions où les courbures du terrain sont très faibles, c'est-à-dire les rayons de courbure sont très grands par rapport aux dimensions du bâtiment, ces courbures peuvent avoir certains impacts sur les réseaux enterrés et les fondations.

Sollicitations induites par la déformation horizontale du terrain

Il convient tout d'abord de noter que les translations et rotations du terrain se transmettent intégralement au bâti alors que les déformations horizontales et les courbures du terrain peuvent être gênées par la présence de l'ouvrage. La proportion des déformations se transmettant à la structure dépend donc de la rigidité relative du bâti par rapport à celle du terrain. Ce phénomène est connu sous le nom « d'interaction sol-structure ». Le taux de transmission pour des ouvrages rigides en béton ou maçonnerie renforcée est de l'ordre de 10 à 30%, et de 30 à 100% pour les bâtiments plus souples tels que ceux en métal. En conséquence, la déformation horizontale et la courbure de la structure engendrées par l'affaissement sont en général plus petites que celles du terrain.

Tenant compte du fait que la déformation horizontale du sol ne peut se transmettre entièrement à la structure, et que la structure est symétrique par rapport à son plan médian, le déplacement horizontal du pied de chaque mur par rapport à son plan initial vertical s'écrit :

$$\Delta L = c_\varepsilon L_0 \varepsilon / 2$$

où  $\varepsilon$  est la déformation horizontale du sol et  $c_\varepsilon \leq 1$ , est le coefficient de transmission de la déformation horizontale du sol au bâti.

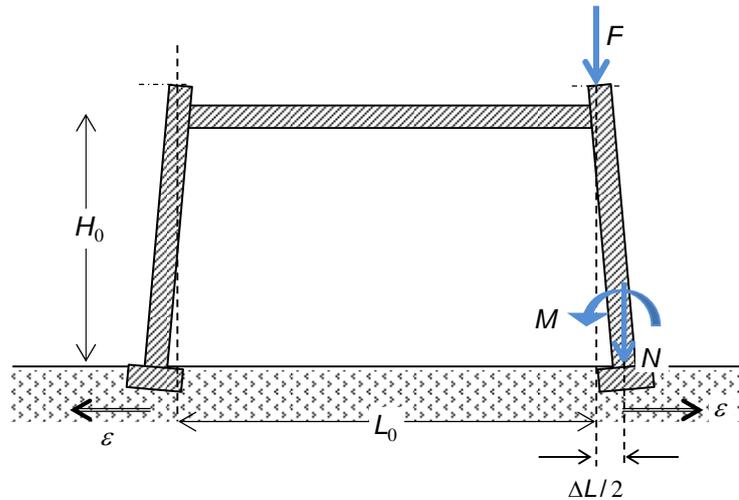


Figure 34: bâtiment soumis à une déformation horizontale du terrain

Le déplacement horizontal des fondations du bâti induit un excentrement de la charge gravitaire par rapport à son plan initial. En conséquence, des moments de flexion sont générés dans les deux poteaux verticaux en plus des efforts de compression axiale préexistants (voir figure 34). À mesure que la déformation horizontale du sol augmente, l'excentrement correspondant de la charge gravitaire augmente et donc également les moments de flexion qui amplifient les déplacements transversaux et donc l'excentrement.

L'analyse de cette structure conduit à calculer les efforts de compression et de flexion en pied de chaque poteau :

$$N_{\varepsilon} = F ; M_{\varepsilon} = F\varepsilon = c_{\varepsilon} FL_0 \varepsilon / 2$$

où  $N_{\varepsilon}$  et  $M_{\varepsilon}$  sont respectivement l'effort normal et le moment de flexion engendrés par la déformation horizontale du sol.

#### Comportement des murs de remplissage

Outre les sollicitations supplémentaires, la pente, la déformation horizontale et la courbure de l'affaissement du terrain, modifient de façon importante l'état initial des murs de remplissage, induisant par exemple, du fait de l'incompatibilité géométrique, des déformations. Les figures 35 à 37 ci-dessous illustrent les désordres potentiels sur les murs de remplissage dans de telles conditions.

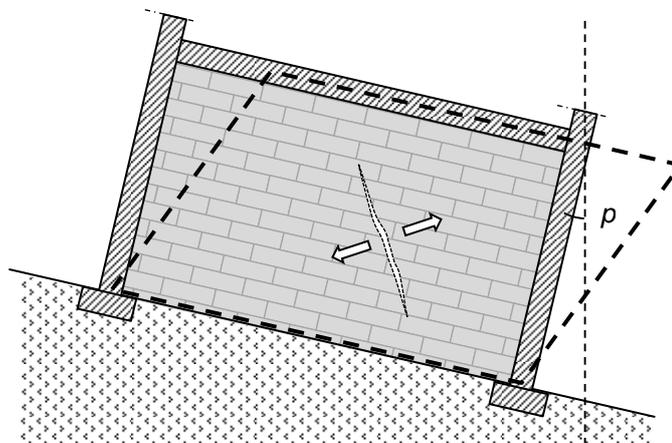


Figure 35: exemple de fissures diagonales induites par la mise en parallélogramme du mur de remplissage en cas de mise en pente du terrain

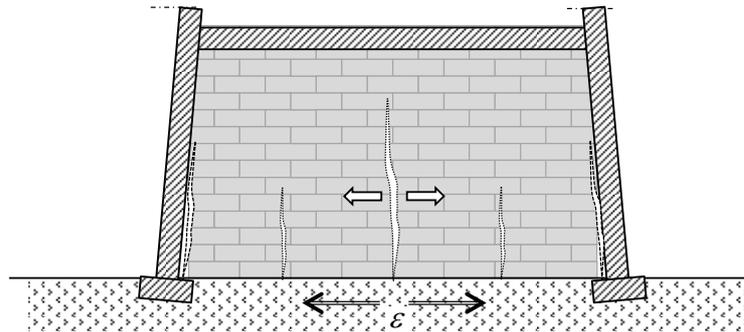


Figure 36: exemple de fissures verticales induites par la déformation horizontale du terrain

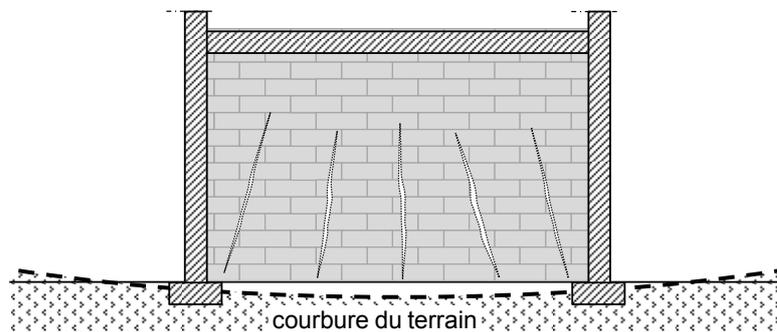


Figure 37: exemple de fissures verticales et diagonales induites par la courbure du terrain

### Échelle d'endommagement

L'échelle d'endommagement comprend cinq niveaux de N1 à N5 dont les désordres prévisibles peuvent être énumérés comme suit :

Pour le niveau N1 (dommages négligeables ou très légers) :

1. fissures très légères dans les plâtres,
2. légères fissures isolées dans le bâtiment, non visibles de l'extérieur.

Pour le niveau N2 (dommages légers) :

1. plusieurs fissures légères visibles à l'intérieur du bâtiment,
2. les portes et fenêtres peuvent se coincer,
3. des réparations aux murs et plafonds peuvent être nécessaires.

Pour le niveau N3 (dommages appréciables) :

1. fissures légères visibles de l'extérieur,
2. les portes et fenêtres sont coincées,
3. les canalisations sont rompues.

Le niveau N4 correspond aux dommages subis de niveau sévère dont les désordres peuvent être :

1. des canalisations rompues ou dégradées,
2. des fractures ouvertes dans les murs,
3. des châssis de portes et fenêtres tordus,
4. des sols en pente,
5. murs hors d'aplomb ou bombés, localement étayés,
6. quelques déchaussements des poutres,
7. en cas de compression, un chevauchement des joints dans les toits et soulèvement des murs en briques, avec fissures horizontales.

Le dernier niveau N5, correspondant aux dommages très sévères, représente l'effondrement partiel ou total quasi-certain :

1. le bâtiment doit être reconstruit partiellement ou complètement,
2. les poutres des planchers et de la toiture sont déchaussées et nécessitent d'être étayées,
3. l'inclinaison des planchers et des murs est très importante,
4. en cas de compression, gauchissement et bombement sévères des murs et du toit.

Les trois premiers niveaux d'endommagement (N1 à N3) correspondent aux dommages architecturaux. Les deux derniers niveaux de désordres (N4 et N5), correspondant respectivement aux dommages fonctionnels (état limite de service (ELS)) et structurels (état limite ultime (ELU)), ne permettent plus d'assurer la « viabilité » du bâtiment du fait de désordres trop importants, et avec risque d'effondrement partiel ou total pour le dernier niveau.

Plus précisément, on constate que les deux désordres prévisibles du premier niveau d'endommagement (niveau N1) de la construction sont des désordres visuels engendrés par de faibles déformations. Ces désordres n'occasionnent pas de modification de géométrie des éléments du bâtiment, susceptible de compromettre la sécurité des occupants.

Les trois désordres prévisibles du niveau N2, engendrés par les déformations, restent faibles mais peuvent néanmoins entraîner le coincement des fenêtres et des portes. Pour ces derniers, statistiquement à l'échelle d'un ensemble de bâtiments, les déformations observées sont suffisamment faibles pour que l'on puisse admettre qu'une faible proportion des bâtiments sera sujette à ce problème. De plus, les mouvements d'affaissement se produisent sur des durées relativement étalées, selon les connaissances qu'on en a aujourd'hui. Il n'y a pas de risque intrinsèquement lié à la chute brutale d'objets ou d'éléments d'équipement, en raison de la faible amplitude des mouvements de ce niveau d'endommagement et donc, il n'y a pas de risque pour l'occupant. Le seul risque que l'on pourrait envisager pour ces désordres serait une panique des occupants ne pouvant pas sortir du fait du coincement des portes et fenêtres, et tentant par là des évacuations risquées (défenestration, par exemple). Mais ce risque reste extrêmement limité en raison du caractère progressif des déformations d'une part, et de la faible proportion de bâtiments touchés, d'autre part. Toutefois, il pourrait être utile de diffuser un message clair aux occupants des bâtiments concernés, pour les engager au calme, en cas de premiers mouvements ressentis.

Les sept désordres prévisibles dont trois du niveau N3 et quatre désordres 1 à 4 du niveau N4, plus sévères que les précédents, présentent un risque de panique accentué par rapport à ce qui est décrit ci-dessus pour les trois désordres du niveau N2. Mais ces désordres sont réputés pouvant également conduire à des ruptures de canalisations par de faibles changements de géométrie. En conséquence, la présence de canalisations de gaz représente ici le risque majeur pouvant être appréhendé, risque très largement pondéré par le caractère progressif de l'affaissement. Dans ces conditions, **il convient de proscrire les installations au gaz.**

Les trois désordres 5, 6, 7 du niveau d'endommagement N4 et ceux du niveau N5, sont définis en lien avec des changements importants de géométrie (murs hors d'aplomb, etc...) et avec des risques de chutes d'éléments de structure ou d'équipement. Ces deux niveaux d'endommagement présentent des risques certains pour la sécurité des occupants qui ne peuvent pas être pondérés par le délai d'évacuation car il s'agit là d'une situation d'effondrement ou d'impraticabilité des ouvrages, ce qui n'était pas le cas pour les niveaux de N1 à N3 et une partie de N4, pour lequel il s'agissait d'une situation d'amorce de désordres.

Pour se placer du côté de la sécurité et en vue d'une simplification de la démarche, il est raisonnable de considérer que, pour les niveaux d'endommagement de N1 à N3, la sécurité des occupants ne peut pas être directement menacée, du fait de l'absence de risque de chutes d'éléments porteurs ou d'équipement et du caractère progressif de l'affaissement tandis que pour les niveaux N4 et N5, la sécurité des occupants est menacée en l'absence de dispositifs de surveillance adaptés.

## Évaluation du niveau d'endommagement du bâtiment

L'étude a pour objet de définir les dispositions constructives complémentaires et adaptées à la problématique d'affaissements miniers sur la commune de Varangéville. Les bâtiments étudiés doivent respecter, au moins, les règles de l'art de la construction : les Normes Françaises – Documents Techniques Unifiés (et les Avis Techniques) régissant notamment les modes de mise en œuvre de techniques de construction et les règles usuelles de conception et de calculs (Eurocode 2 pour les structures en béton armé, Eurocode 3 pour les structures métalliques, Eurocode 4 pour les structures mixtes acier-béton, et Eurocode 6 pour les ouvrages en maçonnerie).

L'étude menée pour toute construction neuve, et la conception qui en résultera, devra démontrer que le niveau d'endommagement est limité au **niveau N3**. Cette étude, menée par le Bureau d'Étude de l'opération, devra définir :

1. Le contexte géologique :
  - Type de sol,
  - Connaissance sur la présence d'eau (nappe phréatique, ruisseau, ...),
  - Pente du terrain,
  - Autres...
2. Les matériaux utilisés :
  - En infrastructure, en superstructure et en éléments du second œuvre,
  - Valeur caractéristique du béton, nuance des aciers, classe des bois utilisés, etc...,
  - Autres...
3. Les principes et règles de conception :
  - Type du plancher bas et types de fondations retenus (semelles isolées, superficielles, radier...),
  - Description des éléments porteurs (murs, poteaux-poutres, planchers),
  - Règles et hypothèses de calculs retenus,
  - Critère d'endommagement retenus dans les calculs et traduisant le niveau d'endommagement N3,
  - Autres...
4. Les principes architecturaux et techniques permettant d'améliorer qualitativement le comportement vis-à-vis des affaissements :
  - Direction du bâtiment par rapport à celle de la cuvette d'affaissement,
  - Fractionnement de la structure du bâtiment,
  - Principes de contreventement,
  - Protection vis-à-vis des ouvrages voisins,
  - Traitement de l'interface sol/soubassement,
  - Appréciation de la ductilité d'ensemble,
  - Autres...
5. Synthèse des points précédents :

Conclusion sur l'appréciation de limitation des désordres au niveau N3.

*Sur la base de cette synthèse, le bureau d'étude attestera que la construction ne dépassera pas le niveau d'endommagement N3 en cas d'affaissement de terrain.*

## Recommandation de conception

### Implantation

Le phénomène d'affaissement du terrain modifie, par nature, l'organisation originelle du sol. Une topographie accidentée et un relief de terrain accusé peuvent avoir des conséquences amplifiées sur les constructions environnantes. Il s'agit là par exemple d'un changement des états d'équilibre des terres en cas de mouvement du sol d'assise, d'un glissement de terrain par instabilité dans le cas d'un talus et d'un risque d'éboulis dans le cas d'une falaise située à proximité. De ce point de vue, pour éviter des effets défavorables cumulés, les constructions doivent être éloignées des zones susceptibles d'induire d'autres désordres potentiels telles que les zones de tête ou de pied des talus, des falaises ou zones de risbermes ou encore, si possible, les terrains en pente.

### Voisinage

La disposition des constructions mitoyennes ou accolées présente une forte longueur face à la courbure en début et en fin d'affaissement. Dans ce cas, il est obligatoire de prévoir un vide entre chaque construction que l'on appelle joint vertical d'affaissement. Ces joints doivent être maintenus libres et dégagés de tous objets ou matériaux susceptibles de les obstruer et de les rendre impropres à leur destination première. Ils doivent être protégés sur toutes leurs faces.

On note que la largeur du joint vertical d'affaissement est beaucoup plus importante que celle du joint thermique ou utilisé pour se prémunir en cas de séisme. Cette largeur est calculée de manière à éviter la collision entre les bâtiments adjacents en cas d'affaissement.

### Direction du bâtiment par rapport à celle de la cuvette d'affaissement

L'orientation des axes de comportement du bâtiment coïncidant avec les directions des sollicitations peut :

- réduire la surface sur laquelle s'exerce la poussée de terre, le frottement et la déflexion,
- éviter le comportement plus complexe, de type torsion par exemple.

En conséquence, il est recommandé d'orienter les façades du bâtiment pour que la direction de sa largeur soit parallèle à la direction radiale de la cuvette.

### Forme des bâtiments

Une régularité des formes et des rigidités, tant en plan horizontal qu'en élévation, assure une meilleure distribution des sollicitations dans l'ossature en faisant participer tous les éléments. Dans la mesure du possible, on essaiera de concevoir une structure dont la forme est aussi compacte et simple que possible, ce qui permettra d'éviter l'apparition de concentration de contraintes dans la structure et de diminuer le risque lié au phénomène de distorsion.

Les ouvertures, portes et fenêtres, amèneront à des concentrations de contraintes. Dans la mesure du possible, il est conseillé de limiter le nombre des ouvertures et leurs dimensions.

Des analyses tridimensionnelles peuvent justifier d'un comportement satisfaisant d'un bâtiment dont la géométrie en plan est complexe. Cependant, il est à rappeler qu'une bonne conception et la présence de joints verticaux d'affaissement sont de toute évidence un bon moyen pour augmenter la robustesse des ouvrages. Dans ce cas, les constructions de forme complexe pourraient être ramenées à des sous-structures simples indépendantes séparées les unes des autres par des joints verticaux d'affaissement, tant au niveau des fondations qu'au niveau de la superstructure.