



HAL
open science

Estimation de la vulnérabilité d'une structure soumise à un affaissement minier

Olivier Deck

► **To cite this version:**

Olivier Deck. Estimation de la vulnérabilité d'une structure soumise à un affaissement minier. Forum des Associations AFGC/AUGC/IREX "Innovation et Développement en Génie Civil et Urbain", May 2002, Toulouse, France. ineris-00972389

HAL Id: ineris-00972389

<https://ineris.hal.science/ineris-00972389>

Submitted on 3 Apr 2014

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

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

ESTIMATION DE LA VULNERABILITE D'UNE STRUCTURE SOUMISE A UN AFFAISSEMENT MINIER

Deck Olivier
INERIS

1 OBJECTIFS

En 1996, la ville d'Auboué, située en Meurthe et Moselle, dans le bassin ferrifère lorrain subit les conséquences d'un affaissement minier. 20 années s'étaient écoulées depuis le dernier événement du même ordre qui avait affecté la ville de Crusnes en 1977. Depuis, quatre autres affaissements se sont produits dans cette région, provoquant de sérieuses dégradations du bâti et des infrastructures. Le bassin ferrifère lorrain a été exploité depuis la seconde moitié du 19^e siècle. A partir de ces années et jusqu'aux années 1870, les mines ont été exploitées par des méthodes du type "chambres et piliers abandonnés" qui consistaient à laisser en place du minerai sous forme de piliers, permettant de supporter le poids des terrains sus-jacents. Supposés stables à long terme, ces exploitations ont été abandonnées. Diverses raisons permettent d'expliquer l'effondrement à moyen et long terme des piliers et des terrains sus-jacents. Le vieillissement des géomatériaux, le sous-dimensionnement de certains piliers, l'ennoyage des galeries... Les conséquences en surface se traduisent par l'apparition d'une cuvette d'affaissement d'une extension horizontale pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres et d'affaissement maximal d'ordre métrique (figure 1). Les structures localisées dans la zone d'influence de cette cuvette sont soumises à des mouvements des terrains (affaissement vertical, déformation

horizontale, pente et courbure) et peuvent, à leur tour, se déformer comme en témoigne la figure 2. La déformation horizontale et la courbure sont à l'origine des principales sollicitations. Dans certains cas, les structures peuvent résister et dans d'autres se dégrader fortement comme en témoigne la photographie 1. Les interrogations des pouvoirs publics, à propos des constructions, existantes ou futures, se formalisent par les trois questions scientifiques suivantes :

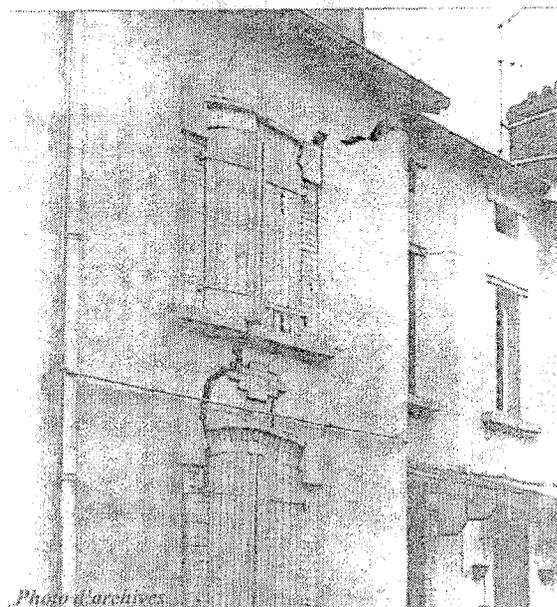


Photo 1 : Affaissement à Auboué, rue de Metz, (photo l'Est Républicain).

- Peut-on prévoir la dégradation d'une structure située dans la zone d'influence d'un affaissement minier lorsqu'on sait prévoir la cuvette d'affaissement et ses caractéristiques géométriques ?
 - Peut-on appliquer des remèdes, préventifs ou curatifs, aux structures susceptibles de se dégrader ?
 - Peut-on prescrire des dispositions constructives pour les projets en zone à risque d'affaissement ?
- La première question est centrale puisque d'elle dépend la compréhension des processus de dégradations et donc la possibilité de préconiser des mesures adaptées. En synthétisant différentes études bibliographiques, statistiques et numériques, nous avons abouti à une méthodologie d'étude permettant d'évaluer la vulnérabilité du bâti, en zone minière, en fonction des mouvements des terrains de surfaces prévisibles.

1.1 Démarche et méthode

La démarche est schématisée sur la figure 3. Elle consiste, dans un premier temps, à caractériser et quantifier les mouvements du terrain susceptibles d'affecter une structure. La détermination précise de ces mouvements (figure 1), qui est à l'amont de notre étude, est éminemment délicate. L'impressionnante quantité de méthodes empiriques et, depuis quelques temps, numériques témoigne de cette complexité (National Coal Board [1], Kratzsch [2], Whittaker et Reddish [3], Aïssaoui [4], Sylla [5]...). Basées sur des considérations empiriques, ces méthodes permettent d'atteindre une précision satisfaisante pour peu qu'elles aient été préalablement ajustées sur des affaissements miniers antérieurs et similaires du point de vue géologique et minier.

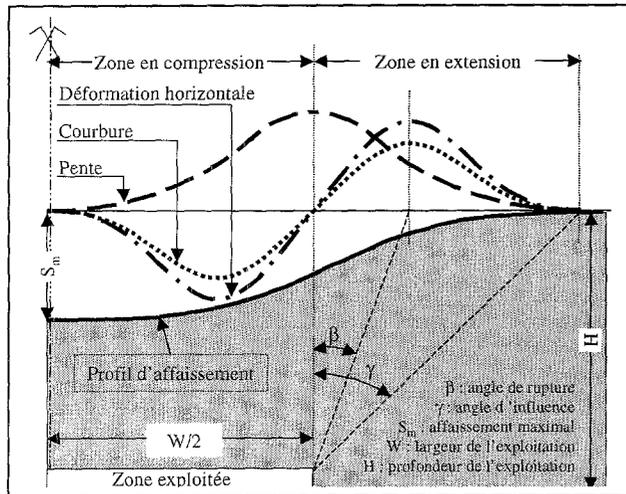


Figure 1 : Description des mouvements des terrains de surface consécutifs à un affaissement minier.

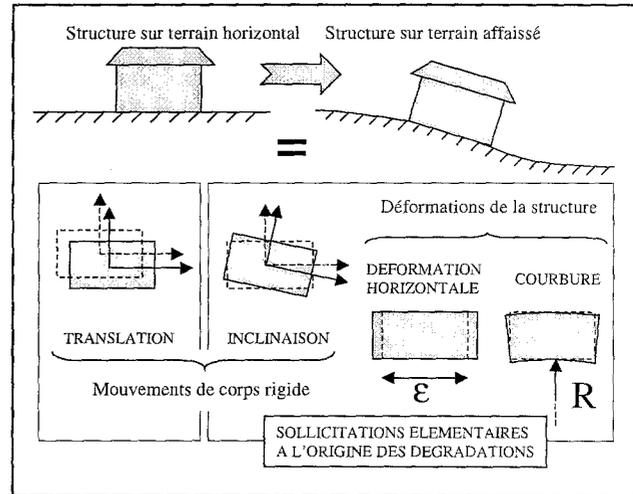


Figure 2 : Décomposition des sollicitations de la structure

Dans un second temps il est nécessaire de qualifier l'enjeu de la structure. On entend par enjeu, la répercussion sociale, économique et politique qu'aurait une dégradation d'une structure. Si l'enjeu est modéré et que l'ouvrage est de conception traditionnelle, alors des méthodes générales de prévision de la vulnérabilité sont les plus adaptées. Elles sont de mise en œuvre rapide et peuvent atteindre des degrés de précision élevés lorsqu'elles sont appliquées à un ensemble d'ouvrages classiques. Elles ne permettent pas l'étude précise de la vulnérabilité d'une structure unique. En particulier, elles n'ont pas vocation à localiser les dégradations possibles dans la structure. Si l'enjeu est important ou si la structure est d'une conception originale, une étude individualisée est nécessaire pour quantifier sa vulnérabilité. Il est nécessaire, d'une part, d'en réaliser un modèle s'appuyant sur les concepts classiques de la résistance des matériaux (assemblage de poutres, poteau, coques...), et d'autre part, de la solliciter convenablement. Estimer la sollicitation n'est pas aisé étant donné que les déplacements du terrain peuvent, ou non, se transmettre intégralement à l'ouvrage selon la résistance que peut opposer ce même ouvrage aux mouvements du terrain. La nature des terrains superficiels a une grande influence sur la sollicitation. Si ces derniers sont globalement beaucoup plus raides que la structure, celle-ci sera sollicitée par des déplacements (les mêmes que ceux du terrain). Si les terrains sont beaucoup moins raides que la structure ou si les raideurs sont du même ordre de grandeur, alors des phénomènes d'interaction sol-structure complexes peuvent se produire et il n'est pas possible d'estimer aisément la sollicitation de l'ouvrage. Il est alors nécessaire de réaliser une modélisation numérique permettant de reproduire correctement le comportement du terrain et la raideur de la structure afin d'en déduire la sollicitation de l'ouvrage réel. Des méthodes relativement simples, que nous présenterons, permettent de quantifier ces raideurs équivalentes afin de les comparer. Quel que soit le degré d'interaction, une fois les sollicitations réelles estimées, l'étude se poursuit par un calcul de structure classique pour les bureaux d'études. Les résultats sous forme d'efforts dans les éléments de structure doivent ensuite être traduits en terme de vulnérabilité du bâti étudié. Il semble, à ce stade, pertinent de comparer ces résultats avec les critères généraux d'évaluation de la vulnérabilité. C'est en effet un moyen efficace d'ajuster les résultats uniquement calculatoires par des considérations d'ordre

empirique. L'estimation méthodologique de la vulnérabilité doit ensuite faire l'objet d'une vérification, à défaut de validation, par des experts. Compte tenu de la complexité du phénomène, il est nécessaire que chaque résultat, issu de la méthode, soit critiqué puis validé par une personne compétente.

A l'aval de la méthodologie d'évaluation, s'effectue un choix sur les mesures à prendre, qui dépend de la vulnérabilité et de l'enjeu de chaque structure.

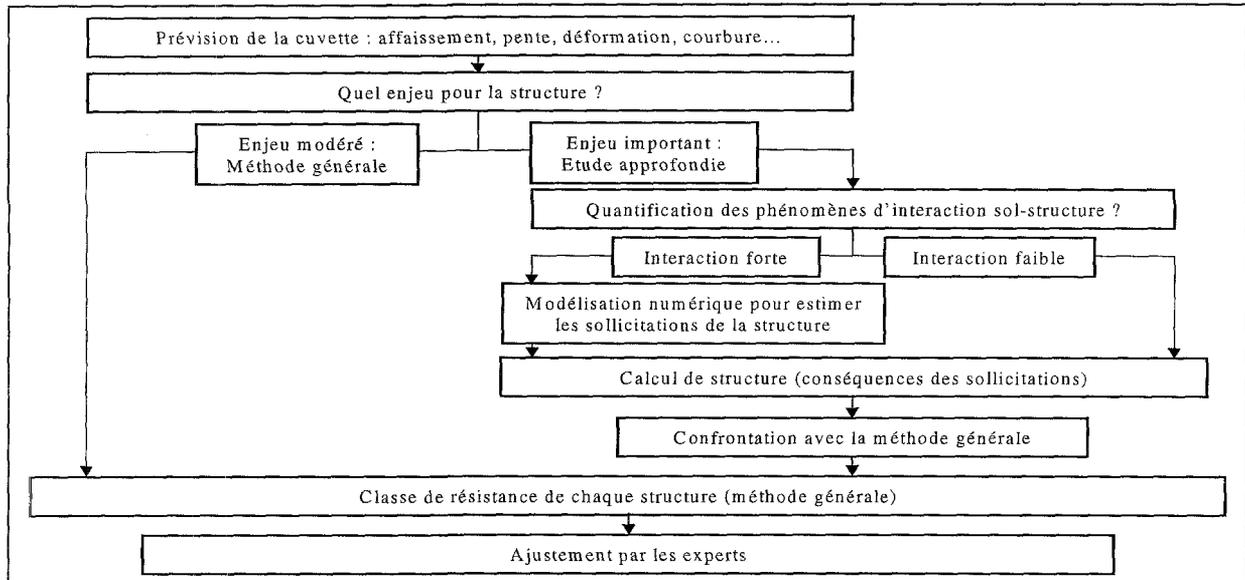


Figure 3 : Méthodologie générale pour l'évaluation de la vulnérabilité d'une structure vis-à-vis d'un affaissement minier.

2 UNE METHODE GENERALE POUR UN ENJEU MODERE

Les méthodes à vocation générale ne peuvent offrir une prévision satisfaisante que si elles sont appliquées à un ensemble de constructions. La possibilité d'erreur de l'estimation qui en découle au niveau d'une construction ne permet d'envisager leur utilisation que lorsque l'enjeu de la structure étudiée est modéré. Par ailleurs, elles nécessitent d'être ajustées à la typologie du bâti du bassin minier étudié. Elles n'ont donc de sens qu'appliquées à un grand nombre de structures relativement homogènes et d'enjeu modéré. Elles sont généralement appropriées à l'étude de la vulnérabilité des habitations. Deux catégories de méthodes existent : les abaques et les méthodes des points.

▪ Les abaques (figure 4) :

Les abaques permettent d'affecter une vulnérabilité en fonction de deux variables caractéristiques de la structure ou des mouvements du terrain : la longueur de l'ouvrage et la déformation horizontale du terrain pour le NCB[1]; la distorsion de l'ouvrage et la déformation horizontale du terrain pour Boscardin et Cording [6], ou encore la pente du terrain et la déformation horizontale du terrain pour Wagner et Shumann [7]. L'avantage de ces abaques est leur simplicité d'utilisation. Leur inconvénient réside, justement, dans cette simplicité. En effet, il est difficile d'admettre qu'une seule caractéristique de l'ouvrage, la longueur, permette de caractériser son comportement.

▪ Les méthodes pondérales :

Les méthodes pondérales permettent une approche plus exhaustive au moyen d'un certain nombre de critères caractérisant la structure (longueur, type de fondation, matériaux de construction...). A chaque caractéristique est affecté un nombre de points qui, une fois additionnés, permettent de caractériser la résistance globale de la structure. Comparée aux mouvements du terrain, cette résistance permet d'évaluer la vulnérabilité de la structure (Bruhn et al. [8], Bhattacharya et Singh [9], Yu et al. [10], Kwiatek [11], Dzegniuk et al. [12]). Pour être efficaces, de telles méthodes doivent être ajustées au site étudié, c'est-à-dire à la typologie du bâti.

Dans le cadre des affaissements miniers lorrains, nous avons mené une étude statistique regroupant plus de 400 ouvrages dégradés afin de comparer ces diverses méthodes aux structures locales (Deck et al. [13]). Il en résulte l'intérêt d'établir une méthode locale donnant une importance de 40 à 60 % aux paramètres caractéristiques de la conception technique de l'ouvrage, un poids d'environ 30 % à l'influence de la longueur de l'ouvrage, un poids de l'ordre de 10 % pour caractériser la forme plus ou moins homogène de la structure et enfin un poids d'environ 10 % pour caractériser l'effet de site et le terrain en particulier. Cependant l'importance des propriétés mécaniques du terrain a toujours été très peu étudiée, probablement puisque chaque méthode a été élaborée pour un bassin minier donné, où le terrain devait présenter une certaine homogénéité.

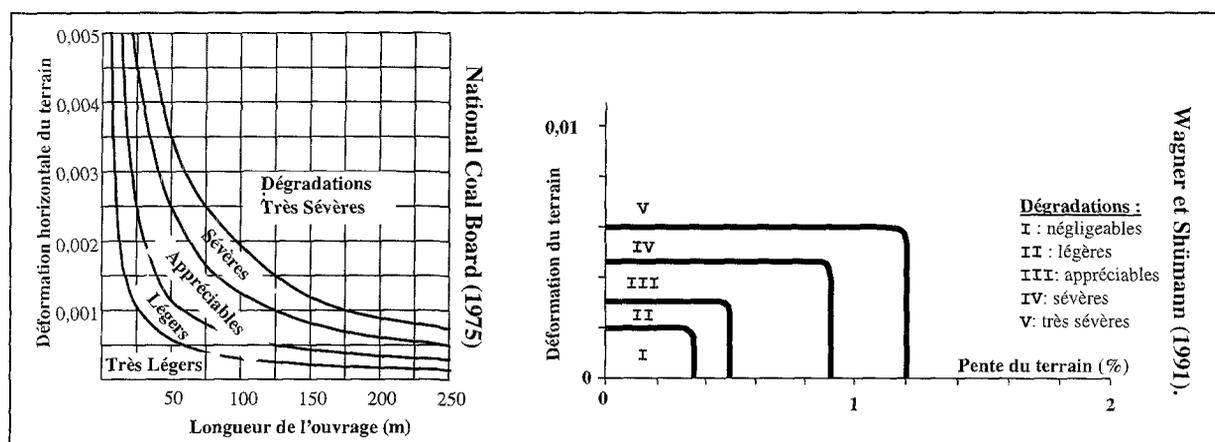


Figure 4 : Exemples d'abaques utilisés pour la prévision des dégradations d'une structure subissant un affaissement minier

3 EVALUATION DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE POUR UN ENJEU IMPORTANT

Lorsque l'enjeu d'un ouvrage augmente, il devient impératif de limiter le risque d'erreur concernant sa vulnérabilité. Une étude détaillée de son comportement sous l'action des mouvements du terrain devient nécessaire. Deux possibilités sont alors envisageables. Si la structure a un comportement souple par rapport à celui du terrain, les mouvements de ce dernier se transmettent alors intégralement à l'ouvrage. Par contre, si la raideur de la structure est suffisante pour perturber les mouvements du terrain, des phénomènes d'interaction sol-structure peuvent alors avoir lieu : glissement de l'interface sol-structure, rupture du terrain... Il convient donc de caractériser l'aptitude d'une structure à se déformer avec le terrain sans en perturber les mouvements. Nous avons donc étudié le comportement des structures vis-à-vis des principaux mouvements du terrain à l'origine de leur sollicitation : la déformation horizontale du terrain et la courbure.

3.1 Comportement vis-à-vis de la déformation horizontale

La figure 5 schématise notre démarche. On voit que l'ensemble "terrain-ouvrage" est modélisé par deux ressorts en parallèle. Le comportement d'un terrain ne sera donc pas perturbé par la présence d'une structure si sa raideur équivalente « $K_{\text{structure}}$ » est faible par rapport à celle du terrain « K_{terrain} ». La raideur d'une structure a été calculée analytiquement en calculant l'effort horizontal nécessaire à un déplacement horizontal de ses fondations. Pour ce faire, différents portiques, représentés sur la figure 6, ont été modélisés à l'aide d'éléments poutres auxquels ont été associés différentes conditions d'appui. Nous avons considéré différents paramètres pour rendre l'étude la plus exhaustive possible : la hauteur « h » ; la longueur « L », ainsi que le ratio « a » = h/L ; le nombre d'étages ; la raideur des éléments de structure « EI », calculée en faisant le produit du module de Young du matériau « E » par l'inertie de la section de l'élément considéré « I ». Les liaisons entre les éléments poutre ont été considérées articulées, encastées ou de raideur à déterminer « k_1 » et « k_2 ».

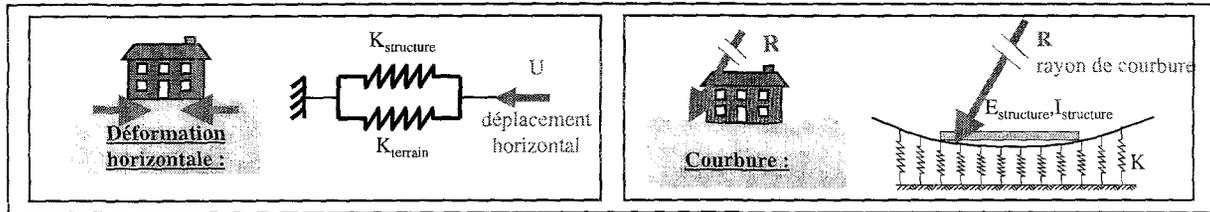


Figure 5 : Modèles adoptés pour évaluer l'importance des phénomènes d'interaction sol-structure vis-à-vis d'une déformation horizontale du terrain ou d'une courbure du terrain.

Légende	Modèle	Raideur	Typologie de la structure
E_1, I_1 : raideur des poteaux E_2, I_2 : raideur de la poutre k_1 : raideur de la liaison poteau-sol k_2 : raideur de la liaison poutre-poteau h : hauteur d'un étage L : longueur de l'ouvrage a : rapport h/L K_s : raideur de la structure		$K_s = \frac{1}{h^3 \left(\frac{2}{3 E_1 I_1} + \frac{a}{E_2 I_2} \right)}$	Structure à un niveau, sans sous-sol, fondations ponctuelles superficielles
		$K_s = \frac{6 a E_2 I_2 + 3 E_1 I_1}{2 h^3 + \frac{a h^3 E_2 I_2}{E_1 I_1}}$	Structure à un niveau, fondations profondes ou fondations superficielles avec présence d'un sous-sol
		$K_s = \frac{E I [3 + 6 a + \frac{6 E I}{L} (\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2})]}{h^3 [2 + a + \frac{2 E I}{L} (\frac{2}{k_1} + \frac{2}{k_2} + \frac{3}{k_1 a} + \frac{6 E I}{k_1 k_2 h})]}$	Structure à un niveau, raideur des fondations et des liaisons à ajuster
Liaison encastrement Liaison glissière Liaison articulée Liaison articulée et glissière Liaison de raideur k en rotation Liaison glissière de raideur k en rotation		$K_s = \frac{3 E I (a + 1)(a + 3)}{h^3 (2a + 3)(a + 4)}$	Structure à deux niveaux, sans sous-sol, fondations ponctuelles superficielles
		$K_s = \frac{3 E I (2a^2 + 9a + 8)}{h^3 (a^2 + 6a + 7)}$	Structure à deux niveaux, fondations profondes ou fondations superficielles avec présence d'un sous-sol

Figure 6 : Raideurs horizontales calculées pour les différents types de bâtis modélisés.

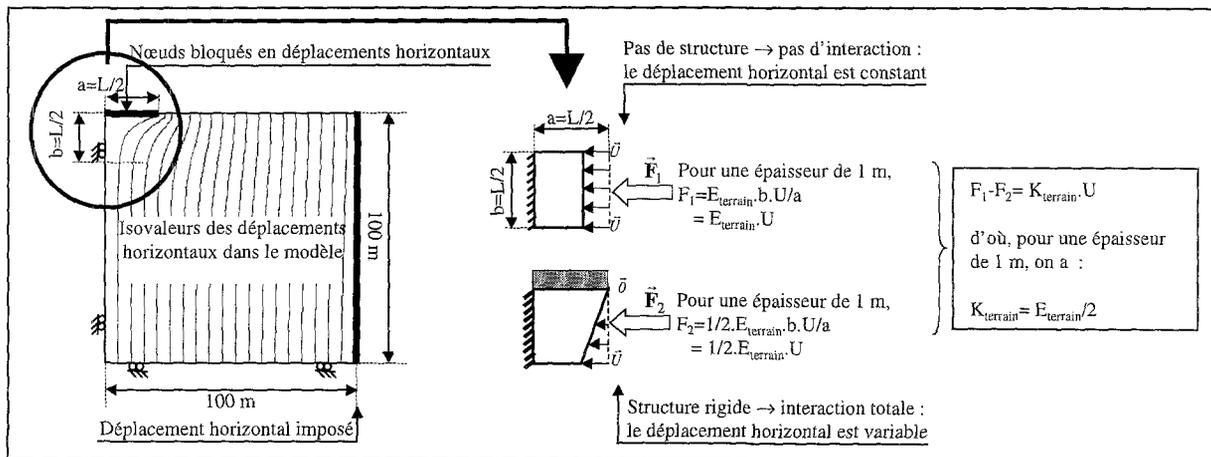


Figure 7 : Evaluation de la raideur horizontale du terrain vis-à-vis d'une déformation horizontale, pour une épaisseur unitaire du terrain.

La figure 6 présente les résultats du calcul de « $K_{structure}$ », auxquels nous avons abouti. Par ailleurs une étude numérique a été réalisée pour caractériser la raideur d'une paroi pleine. Cette étude a mis en évidence la très forte raideur d'un tel ouvrage comparée aux précédentes avec des raideurs de dix à cinq cents fois plus élevées.

La raideur horizontale du terrain « $K_{terrain}$ » est plus complexe à estimer analytiquement. Il s'agit de déterminer l'étendue du terrain qui participe à sa propre raideur vis-à-vis de la sollicitation horizontale étudiée. Une étude numérique très simple, menée à l'aide du code aux éléments finis CESAR-LCP (V. 3.2.4), a permis d'estimer cette raideur (figure 7). Lorsqu'un massif de sol élastique est sollicité par une déformation horizontale constante, mais que les déplacements horizontaux sont bloqués sur une longueur « L » de la frontière supérieure (modélisation d'une interaction forte entre le

terrain et l'ouvrage), le champ de déformation dans le terrain est perturbé jusqu'à une profondeur à peu près égale à la demi-longueur « $L/2$ » de l'ouvrage. C'est cette même zone du terrain qui participe à sa raideur. Il en résulte une raideur du terrain qui peut être estimée à la moitié de son module de Young.

La comparaison des raideurs équivalentes de l'ouvrage et du terrain permet alors de mettre en évidence si les déformations horizontales du terrain se transmettent intégralement à l'ouvrage ($K_{\text{structure}} \ll K_{\text{terrain}}$). Dans le cas contraire, une étude numérique globale prenant en compte les phénomènes d'interaction doit être mise en œuvre afin d'estimer la sollicitation réelle de la structure.

3.2 Comportement vis-à-vis de la courbure

La figure 5 présente le modèle adopté. Le raisonnement est basé sur une comparaison du travail mécanique de deux scénarios, le plus probable étant celui nécessitant la plus faible énergie pour se réaliser. Le premier scénario suppose que le terrain va se déformer sous le poids de la structure qui va, elle, rester horizontale (travail « W_1 »). Le second suppose que la structure va se déformer pour prendre la même courbure que le terrain (travail « W_2 »). La démarche de comparaison est alors présentée sur la figure 8. Un premier test permet de choisir un des deux scénarios ou bien de conclure à une interaction sol-structure forte si les deux travaux sont du même ordre. Un second test est ensuite nécessaire afin d'évaluer si le chargement « q » de la structure est suffisant pour déformer le terrain ou la structure sur toute la longueur de l'ouvrage. Le cas contraire signifie que la structure sera partiellement décollée du terrain.

Le calcul du rayon minimal que peut prendre la structure, nécessaire pour le second test, est effectué à mi-longueur de l'ouvrage en supposant la structure simplement appuyée à ses deux extrémités (zone concave) ou en son centre (zone convexe). On obtient des rayons de courbure identiques, égaux à $8EI/qL^2$.

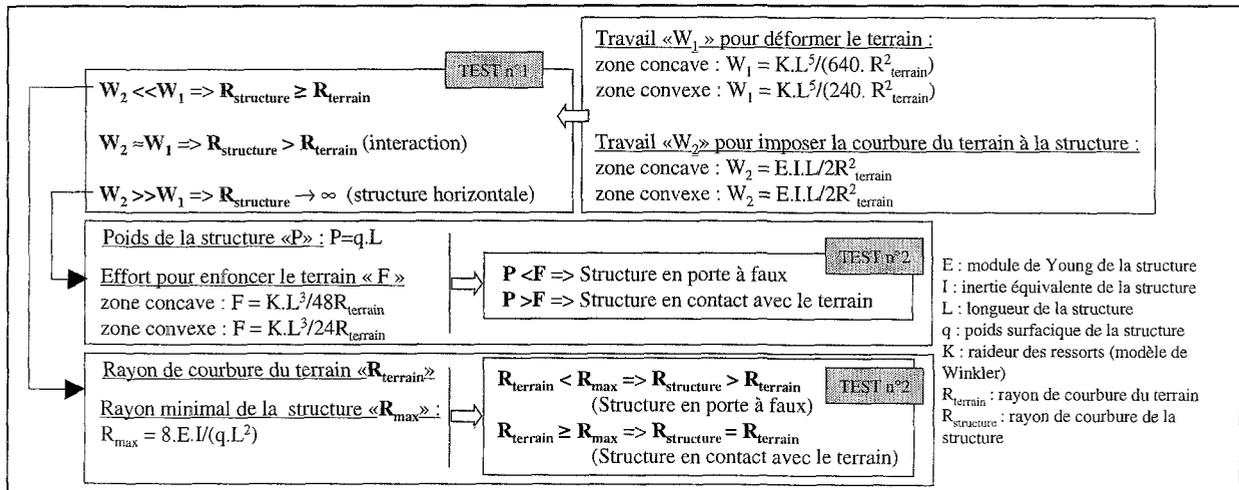


Figure 8 : Méthodologie pour l'étude du comportement d'une structure vis-à-vis d'une courbure du terrain.

Nous présentons en détail, sur la figure 9, le calcul du travail « W_1 » en zone concave. Celui en zone convexe est identique dans la démarche. Le terrain est modélisé par des éléments de rigidité. Nous avons adopté le modèle de Winkler (Henry [14]), qui suppose que les éléments de raideur verticale « K » n'interagissent pas entre eux. En particulier, ce défaut revient à sous estimer l'effort et le travail nécessaires à la déformation du terrain. D'autres modèles, plus complets et plus complexes, pourraient être adoptés si nécessaires. En supposant l'existence d'un substratum indéformable à une profondeur « H », il est possible d'estimer la raideur du terrain « K » en fonction de « H » et des propriétés mécaniques du terrain (figure 9). Dans le cas où aucun substratum n'existe en profondeur, la profondeur « H » nécessaire à la définition de la raideur des ressorts peut être estimée à partir de la connaissance du tassement initial sous une fondation uniformément chargée. Milovic [15] propose par exemple une estimation de ce tassement dans différentes situations. Les principales étapes du calcul de la force et du travail nécessaires à la déformation du terrain sont présentées sur la figure 9. Sous

l'hypothèse que la longueur de la structure « L » est négligeable par rapport au rayon de courbure du terrain « R_{terrain} » (généralement de l'ordre du kilomètre), les formules de la force et du travail des efforts de déformations « W₂ » se simplifient grandement.

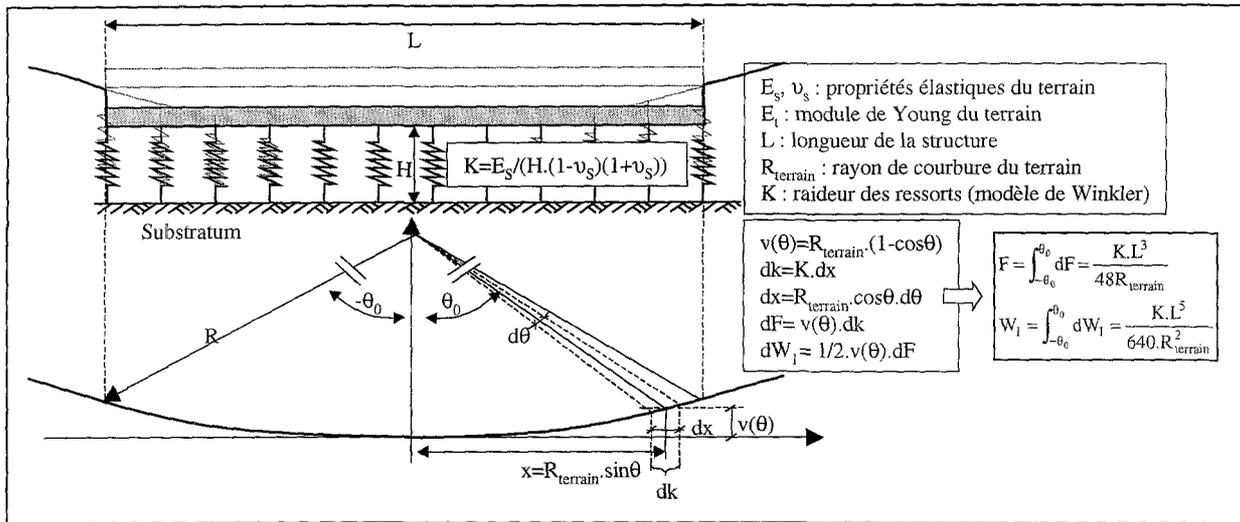


Figure 9 : Calcul de la force et du travail nécessaires pour déformer le terrain.

Pour calculer le travail de déformation de la structure « W₂ », on a négligé le travail des efforts tranchants pour ne considérer que celui des moments de flexion. En imposant une courbure constante le long de l'ouvrage, on impose également un moment constant. Le travail « W₂ » se calcule alors facilement avec l'équation suivante :

$$W_2 = \frac{1}{2} \int M_f \cdot \frac{M_f}{E \cdot I} dx = \int \frac{E \cdot I}{2R_{\text{terrain}}^2} dx = \frac{E \cdot I}{2R_{\text{terrain}}^2} L$$

Où « E » est le module de Young de la structure, I son inertie et « R_{terrain} » le rayon de courbure du terrain imposé à la structure

4 CAS D'UNE INTERACTION SOL-STRUCTURE FORTE

L'étude du comportement d'un ouvrage vis-à-vis des deux mouvements sollicitant élémentaires du terrain, la déformation et la courbure, permet de distinguer les cas où une interaction sol-structure forte existe. La méthodologie d'étude consiste alors en la réalisation d'une simulation numérique globale où sont modélisés aussi bien le terrain que l'ouvrage. La précision des résultats est nécessaire au contact sol-structure afin d'estimer les sollicitations de la structure.

A partir de la cuvette d'affaissement prévisionnelle, il est possible de solliciter un massif de sol en lui imposant les déplacements verticaux correspondants à l'affaissement (figure 10). En modifiant l'épaisseur « h » du modèle, l'amplitude des déformations horizontales à la surface du modèle « ε_{max} » peut être ajustée. Il est donc possible de créer dans la partie supérieure

du massif, au niveau de la structure étudiée, un champ de déplacements correspondant au champ de déplacements réel de l'affaissement prévu.

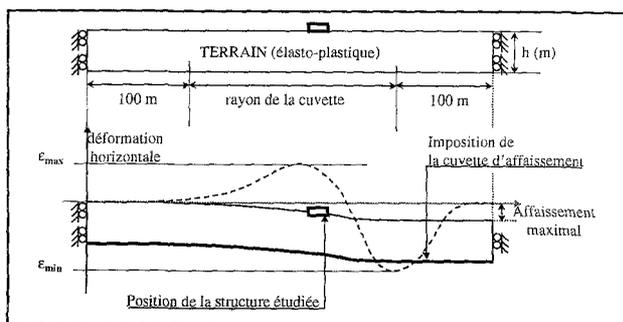


Figure 10 : Modélisation numérique globale permettant d'estimer la sollicitation réelle d'un ouvrage.

La structure peut être modélisée à l'aide d'éléments poutres ou massifs et le contact avec le terrain peut se faire au moyen d'éléments d'interface. Le sol ne devra pas être considéré comme

élastique afin de prendre en compte les ruptures du massif. Il est bien évident que cette étape, en vue de la détermination la plus précise possible des sollicitations d'une structure, est complexe à réaliser et délicate à vérifier. Les sources d'erreur sont multiples, depuis le choix du modèle de structure jusqu'aux processus de convergence numérique en cas de rupture, en passant par les propriétés mécaniques des différents constituants.

5 CONCLUSION

La méthodologie proposée pour étudier la vulnérabilité du bâti en zone d'affaissement minier permet de prendre en compte l'enjeu d'une structure ainsi que les phénomènes d'interaction sol-structure qui peuvent apparaître afin d'adopter la méthode adéquate à chaque situation. L'utilisation des abaques et des méthodes pondérales est destinée aux structures courantes, d'enjeu modéré, alors que la modélisation numérique doit être utilisée afin d'estimer au mieux les sollicitations réelles agissant sur une structure. Quelles que soient les méthodes employées, il est nécessaire de les ajuster au type du bâti étudié. C'est pourquoi ces méthodes nécessitent d'être adaptées à un site donné puis ajustées selon les premiers retours d'expérience.

Nous avons également mis au point une méthode permettant d'évaluer l'importance des phénomènes d'interaction sol-structure. La modélisation d'une structure à l'aide d'éléments poutres permet d'estimer sa raideur vis-à-vis d'une sollicitation horizontale et de la comparer à celle du terrain. Une seconde méthode permet, au moyen d'un raisonnement sur les énergies mises en œuvre, d'évaluer le comportement d'une structure en zone de courbure.

Lorsque les phénomènes d'interaction sol-structure deviennent prépondérants, une analyse numérique globale est nécessaire afin d'estimer la sollicitation réelle d'un ouvrage.

Références

- [1] National Coal Board.- Subsidence engineer's handbook (1975).
- [2] Kratzsch H.-Mining Subsidence Engineering, (Springer-Verlag, 1983)
- [3] Whittaker B. N. et Reddish D. J.- Subsidence : Occurrence, Prediction, Control. (Elsevier, 1989).
- [4] Aissaoui K.- Amélioration de la prévision des affaissements dans les mines à l'aide des approches empiriques, numériques et analytiques. Thèse de doctorat, INPL-LAEGO (1999).
- [5] Sylla M.- Modélisation numérique des exploitations minières par la méthode des éléments frontières ; développement et applications. Thèse de doctorat, INPL-LAEGO (2001).
- [6] Boscardin M.D., Cording E.J.-Building response to excavation-induced settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No. 1 (1987).
- [7] Wagner H., Schümann E.H.R.- Surface effects of total coal-seam extraction by underground mining methods. *J.S. Afr. Inst. Min. Metall.*, Vol. 91, No. 7, Juillet 1991, pp.221-231.
- [8] Bruhn R. W., McCann W. S., Speck R. C., Gray R. E.- Damage to structures above active underground coal mines in the northern appalachian coal field. First Int. Conf. on stability in underground mining, chap. 47, pp. 1022-1046. (1982)
- [9] Bhattacharya S. et Singh M.M.-Proposed criteria for subsidence damage to buildings. In *Rock mechanics in productivity and protection*. 25th Symposium on rock mechanics, pp.747-755. (1984)
- [10] Yu Z., Karmis M., Jarosz A., Haycocks C. Development of damage criteria for buildings affected by mining subsidence. 6th annual workshop generic mineral technology center, mine system design and ground control, pp. 83-92. (1988) lieu ?
- [11] Kwiatek J.- Protection des constructions sur les terrains miniers (traduction du polonais). Titre original "Ochrona obiektow budowlanych na terenach gorniczych". Publication du G.I.G., Katowice, (1998).
- [12] Dzegniuk B. et Hejmanowski R.- Evaluation of the damage hazard to building objects on the mining areas considering the deformation course in time. International congress of the international society for mine surveying, septembre 2000, Cracovie, Pologne
- [13] 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*, numéro spécial "Géotechnique, géologie et aménagements en site urbain", juin 2002 (à paraître).
- [14] Henry F.D.C.- The design and construction of engineering foundations. Chapman &Hall Ltd. (1986).
- [15] Milovic D.- Stresses and displacements for shallow foundations. (Elsevier, 1992).