

EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE DES AFFAISSEMENTS MINIERS PAR LA PRISE EN COMPTE DE LOIS DE VIEILLISSEMENT

ASSESSMENT OF THE MINING SUBSIDENCE PROBABILITY WITH ROCK AGEING BEHAVIOUR

Olivier DECK¹, Yves GUENIFFEY², Hafid BAROUDI², Ahmed HOSNI²

1 UMR 7359 GeoRessources, Université de Lorraine, Nancy, France

2 GEODERIS, Metz, France

RÉSUMÉ — Un modèle analytique est développé afin d'évaluer les probabilités d'occurrence des affaissements miniers dans le bassin ferrifère lorrain. Ce modèle est basé sur le calcul du coefficient de sécurité des exploitations minières compte tenu de leur profondeur, de leur taux de défrètement, de la présence d'exploitations superposées et de leur superficie. Trois lois de décroissance de la résistance sont considérées afin de modéliser les processus de vieillissement. Des simulations de Monte Carlo sont mises en œuvre pour évaluer le nombre moyen d'affaissements à différentes échéances de temps. L'application aux données du bassin ferrifère lorrain, constitué de 518 zones d'aléa, permet d'aboutir à des modèles réalistes. Les résultats ne concernent néanmoins pas la prévision réelle de la probabilité d'occurrence des affaissements en raison d'un nombre important d'hypothèses non justifiables autrement que pas le dire d'expert. En revanche, l'approche utilisée se révèle utile pour questionner ces dires d'expert et étudier leur cohérence.

ABSTRACT — An analytical model is developed to assess the mining subsidence probability in the French iron-ore field. This model uses the safety factor of each mining work in relation to its depth, extraction ratio, superimposition and area. Three time dependent laws are investigated to model ageing of mines. Monte-Carlo simulations allow the assessment of the mean value of the subsidence number for different dates. An application to the French-iron ore field, with 518 mining work areas give realistic results. At last, results cannot be used for a satisfactory assessment of the mining subsidence probability because of numerous assumptions based on expert judgements. However, results and methodology appear to be a powerfull way to test these expert judgements and study their relevance.

1. Introduction

L'objectif de cette recherche est d'apporter des éléments de réponses à une question récurrente posée par les acteurs de la gestion du risque minier : quelle est la probabilité d'occurrence qu'un affaissement se produise dans les années à venir ?

A défaut de répondre explicitement à cette question, un modèle est développé en ce sens. L'approche proposée fait appel à des calculs permettant de quantifier le

coefficient de sécurité des sites miniers et de modéliser leur diminution dans le temps en raison de phénomènes de vieillissement. Elle est basée sur la méthode de Monte-Carlo. Elle utilise d'une part des données et des modèles objectifs basés sur des mesures ou des considérations scientifiques, d'autre part des données et modèles plus subjectifs basés en grande partie sur de l'expertise. Son avantage repose sur la nécessité de quantifier les phénomènes modélisés, et elle constitue un outil intéressant pour questionner et affiner l'expertise. L'objectif de cette étude n'est pas réellement de répondre à la question initiale de la probabilité d'occurrence d'un affaissement, mais plutôt de formaliser différentes expertises en élaborant un outil d'aide à la réflexion, permettant d'affiner la perception des phénomènes mis en jeu.

Les paragraphes suivants présentent dans un premier temps un ensemble de considérations générales relatives aux exploitations minières et au contexte lorrain où l'approche développée a été appliquée. Le modèle développé est alors décrit et les résultats discutés.

2. Contexte de l'après-mines en Lorraine

Le bassin ferrifère lorrain a été exploité intensivement depuis la fin du XIX^e siècle jusque dans les années 90, avec un pic de production dans les années 60. La technique d'exploitation était principalement celle des chambres et piliers, avec des exploitations parfois superposées (Figure 1). Les taux de défrètement caractérisant la quantité relative de matériaux extraits étaient très importants à l'aplomb de terrains inoccupés (supérieurs à 70%) et les couches exploitées étaient foudroyées après l'arrêt de l'exploitation. A l'aplomb des terrains urbanisés, les taux de défrêtements étaient plus faibles (inférieurs à 60%) afin de conserver des piliers destinés à garantir la stabilité à long terme de l'exploitation après son arrêt. Les récents affaissements qui se sont produits dans le bassin ferrifère à la fin des années 90 ont prouvé que cette stabilité à long terme n'était pas toujours garantie. On estime aujourd'hui qu'il existe environ 250 km² de terrains sous-minés constituant un grand nombre de zones d'aléa minier.

La recherche présentée porte sur un ensemble de 538 zones d'aléa relativement homogènes et susceptibles de s'affaisser en cas d'effondrement des secteurs miniers sous-jacents. Ces 538 zones se décomposent en 384 secteurs monocouches, 131 secteurs bi-couches, 22 secteurs tri-couches et 1 secteur quadri-couches. Pour toutes ces zones, une base de données permet de connaître les profondeurs des exploitations, leur taux de défrètement (pourcentage de vides), l'épaisseur de l'intercalaire en cas de multi-couches (épaisseur de terrain entre deux couches successivement exploitées) et la date d'arrêt des travaux (Figure 1).

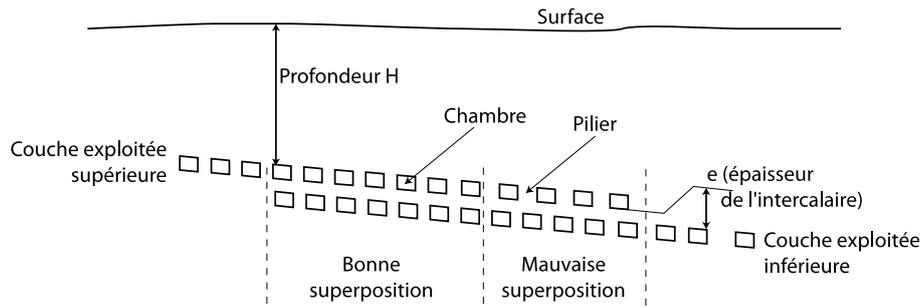


Figure 1 : Schématisation d'une exploitation souterraine bi-couches.

Les études conduites par GEODERIS (GIP constitué entre le BRGM et l'INERIS pour apporter à l'Etat une assistance et une expertise en matière d'après-mine) ont fait ressortir une valeur moyenne de la résistance à la compression du minerai de l'ordre de 20 MPa. Après revue des valeurs et élimination de certaines valeurs extrêmes, une loi de distribution de type loi normale caractérisée par une résistance moyenne de 24 MPa et un écart type de 6 MPa est proposée.

Parallèlement à cette base de données des zones d'aléa, l'exploitation des archives a permis de dénombrer un total de 18 zones similaires où un affaissement accidentel s'est déjà produit. Pour 7 d'entre elles l'affaissement s'est produit au cours de l'exploitation ou immédiatement après son arrêt (moins d'un an). A ce nombre d'évènements observés peut être rattaché un taux moyen de survenue des affaissements d'environ un affaissement tous les 4,5 ans

Le modèle développé a pour ambition d'évaluer le nombre d'affaissements susceptibles de se produire dans les années à venir sur la base d'un certain nombre d'hypothèses ou considérations :

- La stabilité à long terme des couches exploitées peut s'appréhender par l'intermédiaire d'un coefficient de sécurité correspondant au ratio de la sollicitation des piliers par leur résistance à la compression.
- La résistance à la compression est supposée diminuer avec le temps compte tenu de phénomènes de vieillissement physico-chimiques ou d'écaillage des piliers. Différentes lois d'évolution sont testées.
- Le modèle doit tenir compte de l'influence de la superficie des couches exploitées ; une zone plus grande a plus de chance de subir un affaissement qu'une zone plus petite (toutes variables égales par ailleurs).
- Différents paramètres peuvent être considérés incertains et caractérisés par des distributions statistiques permettant ainsi d'appliquer des simulations de Monte-Carlo et d'évaluer l'intervalle de confiance des prévisions obtenues.
- Les résultats obtenus doivent être compatibles avec les observations des 18 affaissements référencés. A très long terme, le nombre de zones susceptibles de s'affaisser est estimé à environ 90% du nombre de zones initiales, sur la base d'un jugement d'experts.

3. Calcul du coefficient de sécurité

On utilise l'indice « i » pour caractériser une zone en surface et l'indice « j » pour caractériser le numéro d'une couche souterraine exploitée à l'aplomb d'une zone. Dans le cas de monocouches, $j=1$. Dans le cas de multicouches (exploitations superposées), j est compris entre 2 et 4. L'indice $j=1$ caractérise la mine la plus haute et les indices suivants caractérisent les couches successivement en dessous.

On note SF_{ij} , le coefficient de sécurité de la couche « j » située dans la zone « i ». Il correspond au ratio $R_{ij}(t)/S_{ij}$ [1] où $R_{ij}(t)$ est représentative d'une résistance à la compression des piliers de la couche considérée pouvant varier dans le temps et S_{ij} est représentative d'une sollicitation constante dans le temps, calculée au moyen du modèle de l'aire tributaire [2].

$$SF_{ij}(t) = \frac{R_{ij}(t)}{S_{ij}} \quad (1)$$

$$S_{ij} = k \cdot \frac{\gamma \cdot H_{ij}}{1 - \tau_{ij}} \quad (2)$$

avec k un coefficient empirique permettant de tenir compte de l'influence défavorable de dépilages antérieurs à proximité de la zone étudiée (Whittaker and Reddish 1989 ; $k = 1$ en absence de dépilage, $k=1,2$ en présence d'un dépilage assez large et $k = 1,45$ en présence de dépilages peu larges, situation la plus défavorables), γ le poids volumique des terrains (25 KN/m^3), H_{ij} la profondeur de la couche et τ_{ij} son taux de défructement.

En cas de superposition des exploitations, on introduit un paramètre $\alpha_{j,j+1}$ permettant de tenir compte de l'influence d'une couche exploitée sur les couches adjacentes [3] et calculer le coefficient de sécurité global de la zone. Ce paramètre est défini de telle manière que l'effet d'une superposition soit nul lorsque l'épaisseur de l'intercalaire est supérieure à 7m. Pour des épaisseurs inférieures, on définit deux lois (Figure 2) afin de distinguer les situations où la superposition est jugée « bonne », des autres où elle est jugée « mauvaise » (piliers mal superposés). La valeur minimale α_{lim} est égale à $e_{lim}/7$. Ces choix reposent sur le jugement d'expert. Pour le paramètre e_{lim} , on adopte une valeur initiale égale à 4,5 m qui est discutée par la suite.

$$\begin{aligned} SF_i &= \text{Min}[\alpha_{12}SF_{i,1} ; \alpha_{12}SF_{i,2}] && \text{pour 2 couches} \\ SF_i &= \text{Min}[\alpha_{12}SF_{i,1} ; \alpha_{12}SF_{i,2} ; \alpha_{23}SF_{i,2} ; \alpha_{23}SF_{i,3}] && \text{pour 3 couches} \end{aligned} \quad (3)$$

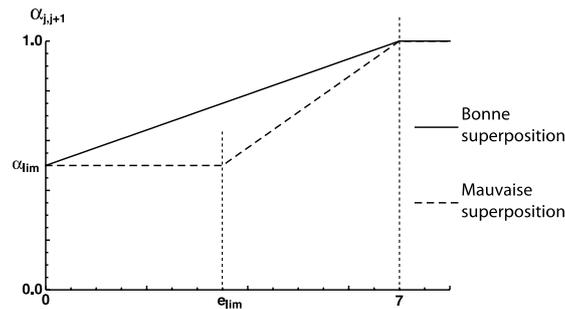


Figure 2 : Définition du coefficient $\alpha_{j,j+1}$ caractérisant la réduction du coefficient de sécurité d'une couche selon l'épaisseur de l'intercalaire la séparant d'une autre couche.

4. Influence du temps

L'influence du temps est prise en compte en définissant des lois de décroissance de la résistance en fonction de Δt_{ij} , le temps écoulé depuis la date d'exploitation. On note $R_{ij}(0)$ la résistance initiale caractéristique de la couche j , dans la zone i et $R_{ij}(\infty)$ la résistance ultime. Cette décroissance permet d'expliquer l'occurrence tardive d'un effondrement. L'explication physique de cette décroissance réside dans la somme de phénomènes de fluage et de dégradation physico-chimique des matériaux (Bieniawski 1967, Costin 1987, Grgic et al. 2001). Peu d'études existent sur l'évolution à très long terme des propriétés mécaniques des géomatériaux (Kemeny 2002 ; Tran et al. 2009). Plusieurs lois de décroissance sont testées (Figure 3) : linéaire [4], hyperbolique [5] et exponentielle [6]. Ces trois lois sont exprimées en fonction d'un paramètre $\Delta t_{90\%}$ caractérisant le temps nécessaire pour que la résistance des piliers ait atteint une valeur proche de leur résistance ultime [7].

La résistance ultime des couches $R_{ij}(\infty)$ est évaluée à environ 7,5 MPa, valeur définie à partir des rétro-analyses effectuées sur les 18 cas d'affaissements observés.

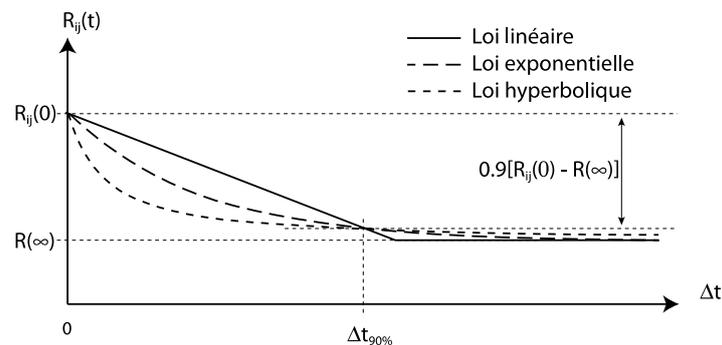


Figure 3 : Illustration des 3 lois de décroissance de la résistance étudiées.

$$R_{ij}(\Delta t) = \frac{R_{ij}(0) \cdot (\Delta t_{90\%} - \Delta t) + R_{ij}(\infty) \cdot \Delta t}{\Delta t_{90\%}} \quad \text{si } \Delta t < \Delta t_{max} \quad (4)$$

$$\Delta t_{max} = \Delta t_{90\%} / 0.9$$

$$R_{ij}(\Delta t) = \frac{R_{ij}(0) + k_1 \cdot R_{ij}(\infty) \cdot \Delta t}{1 + k_1 \cdot \Delta t} \quad (5)$$

$$k_1 = 9 / \Delta t_{90\%}$$

$$R_{ij}(\Delta t) = R_{ij}(\infty) + (R_{ij}(0) - R_{ij}(\infty)) \cdot \text{Exp}(-k_2 \cdot \Delta t) \quad (6)$$

$$k_2 = \text{Ln}(10) / \Delta t_{90\%}$$

$$R_{ij}(\Delta t_{90\%}) = R_{ij}(\infty) + 0.1 (R_{ij}(0) - R_{ij}(\infty)) \quad (7)$$

5. Influence des effets d'échelle et de la superficie des exploitations

La résistance à la compression caractéristique des couches exploitées peut s'estimer à partir de celle observée en laboratoire sur des éprouvettes. Elle doit tenir compte de deux effets d'échelle.

Le passage de l'éprouvette au pilier implique des effets d'échelles conduisant à une résistance des piliers plus faible en moyenne que celle des éprouvettes et accompagné d'une variabilité plus faible également. Si la résistance des éprouvettes Réprouvette suit une loi normale de moyenne 24 MPa et d'écart type 6 MPa, la loi de distribution de la résistance des piliers Rpilier est supposée suivre une loi de moyenne 22 MPa et d'écart type 3 MPa. Cette hypothèse est discutée dans la suite.

Le second effet d'échelle consiste à prendre en compte que si deux zones ne diffèrent que par leur surface, alors il est statistiquement plus probable d'observer un effondrement dans la zone la plus vaste. La résistance caractéristique initiale d'une couche Rij(0) est alors évaluée en considérant qu'une exploitation de grande étendue peut être assimilée à une juxtaposition de N sous-zones de résistance Rpilier dont l'effondrement d'une d'entre elles entraîne l'effondrement de la totalité [8]. C'est donc la résistance de la sous-zone la plus faible qu'il convient de prendre en compte pour caractériser la résistance de la zone dans son ensemble. Le nombre de sous-zones inclu dans une couche donnée est estimée au moyen de l'équation [9]. Cette approche revient à considérer une loi de Gumbel pour la distribution statistique de Rij(0).

$$R_{ij}(0) = \text{Min}[N \text{ valeurs aléatoires de } R_{\text{pilier}}] \quad (8)$$

$$N = \frac{A_{\text{zones}}}{A_0} \quad (9)$$

Avec Azone la superficie de la zone considérée et A0 une surface élémentaire intégrant un nombre réduit de piliers (1 ha par exemple). La valeur de A0 constitue un nouveau paramètre du modèle.

6. Modèle final et simulations de Monte Carlo

Le modèle développé réside sur le calcul à différentes dates du coefficient de sécurité de chaque zone. Ce coefficient varie en fonction du temps en raison de l'utilisation d'une loi de décroissance de la résistance. Ce coefficient est par ailleurs incertain en raison d'un grand nombre d'incertitudes relatives aux valeurs des paramètres. L'application proposée dans cet article se limite à un nombre restreint de paramètres aléatoires ou incertains pour lesquels une étude de sensibilité est réalisée (Tableau 1). Les autres paramètres sont déterministes : profondeur H_{ij} , taux de défrètement τ_{ij} , épaisseur de l'intercalaire e_{ij} , date d'arrêt de l'exploitation, coefficient de surcontrainte k_{ij} , superficie A_{ij} pour chaque couche.

Tableau 1 : valeurs des paramètres considérées pour l'étude de sensibilité.

Paramètres	Cas de référence	Variations étudiées
Rpilier [Mpa]	Loi normale [$\mu=20$, $\sigma=3$]	Moyenne $\mu = \{20 \text{ à } 24\}$
		Ecart type $\sigma = \{2 \text{ à } 4\}$
$R(\infty)$ [Mpa]	7.5	{6.5 à 8.5}
$\Delta t_{90\%}$ [year]	Distribution uniforme 1500 +/- 500	{1000 à 3500} +/- 500
A0 [ha]	1	{.5 à 5}
elim [m]	4.5	{3 à 5}

La procédure utilisée afin d'estimer un nombre d'effondrement à chaque date calendaire est une application de la méthode de Monte Carlo. Un calcul correspond à l'attribution déterministe ou probabiliste d'une valeur à l'ensemble des zones étudiées. Le résultat est alors le nombre parfaitement déterminé d'effondrements à chaque date calendaire. Une simulation consiste donc à reproduire ce calcul un grand nombre de fois (200 fois permet d'obtenir des résultats robustes) et d'en déduire le nombre moyen d'effondrements et l'écart type de ce nombre à chaque date calendaire. L'exploitation du modèle consiste alors à tester différentes hypothèses en vue de réaliser des études de sensibilité et de dégager un ensemble d'hypothèses cohérentes avec le nombre d'effondrements déjà observés.

7. Résultats

Les résultats consistent en un nombre d'effondrements, associé à un intervalle de confiance, à différentes dates calendaires. Pour juger de la pertinence des résultats, trois indicateurs sont observés :

- Nombre d'affaissements initial. Ce nombre correspond aux zones instables dès l'origine, avant toute prise en compte de l'effet du vieillissement. Il doit être proche de 7 afin d'être comparable au nombre de cas réels connus.
- Nombre d'affaissements en l'an 2000. Ce nombre doit être proche de 18 afin d'être comparable au nombre de cas réels connus.
- Taux d'arrivée des affaissements en l'an 2000. Ce taux doit être d'environ 1 tous les 4-5 ans afin d'être comparable aux observations ;

- Nombre d'affaissements final. Ce nombre correspond aux zones instables à très long terme, compte tenu de la prise en compte de l'effet du vieillissement. Ce nombre doit être proche de 480 afin que le pourcentage de zones stables à très long terme soit d'environ 10% (choix d'expert).

Le Tableau 2 présente de manière synthétique le nombre d'effondrements moyen calculé selon les valeurs considérées (valeurs minimales ou maximales) pour chaque paramètre étudié. On observe que seul $R(\infty)$ a une influence sur le nombre d'événements à long terme. Les paramètres $\Delta t_{90\%}$ et $R(\infty)$ ont une très faible influence sur le nombre d'effondrements à court terme (en 2000). Les autres paramètres ont toujours une influence beaucoup plus importante.

La figure 4 présente plus précisément l'influence du choix de la loi de décroissance et du paramètre $\Delta t_{90\%}$. Chaque calcul du nombre moyen d'affaissements obtenu est associé à son intervalle de confiance à 95%. Pour les résultats en l'an 2000, on observe une faible influence du choix de la loi de décroissance, à moins de considérer des temps caractéristiques faibles ($\Delta t_{90\%} > 1000$ ans). Pour les résultats en l'an 2500, les résultats sont significativement différents. On observe que pour une même valeur de $\Delta t_{90\%}$, le nombre d'affaissements est plus important pour une décroissance hyperbolique et moins important pour une décroissance linéaire. Ce résultat est logique compte tenu de la forme de chaque loi (Figure 3)

Tableau 2 : Résultat de l'étude de sensibilité montrant le nombre d'effondrement calculé à trois échéances de temps (initiale, année 2000 et finale) pour le cas de référence et pour les valeurs maximales P_{max} ou minimales P_{min} des paramètres étudiés.

		Nombre initial d'affaissements		Nombre d'affaissements en l'an 2000		Nombre final d'affaissements	
Cas de référence		15		17		499	
		Résultat pour P_{min}	Résultat pour P_{max}	Résultat pour P_{min}	Résultat pour P_{max}	Résultat pour P_{min}	Résultat pour P_{max}
Paramètre étudié P	μ de $R_{pilier}(0)$	25	8	29	9	499	499
	σ de $R_{pilier}(0)$	9	19	11	23	499	499
	$R_{ij}(\infty)$	15	15	18	18	527	358
	$\Delta t_{90\%}$	15	15	22	16	499	499
	A0	20	8	23	10	499	499
	elim [m]	28	13	31	15	502	498

Pour chacun des trois modèles de réduction de la résistance (linéaire, exponentiel et hyperbolique), on a cherché à optimiser les valeurs des paramètres mal connus. Des

solutions satisfaisantes, au regard des indicateurs de pertinence ont été obtenues pour les 3 modèles en considérant des valeurs proches de celles du cas de référence pour l'essentiel des paramètres. Seules les valeurs de $\Delta t_{90\%}$ diffèrent alors. Le

Tableau 3 présente les valeurs de ces paramètres et la Figure 5 illustre les résultats obtenus. Pour les trois modèles, l'écart type du nombre d'effondrements prévu est de l'ordre de 3,5 ce qui correspond à un intervalle à 95% de +/-7 effondrements.

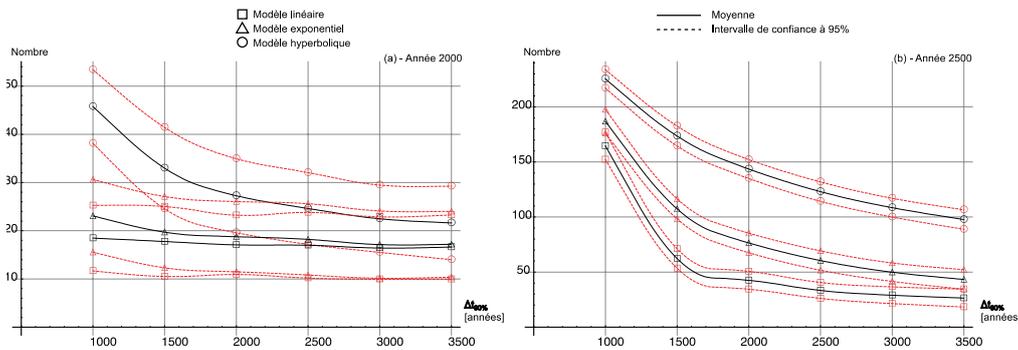


Figure 4 : Etude de sensibilité des lois de décroissance et de la valeur moyenne de $\Delta t_{90\%}$ pour les trois lois de décroissance étudiées. a) nombre d'affaissements en l'an 2000 et b) nombre d'affaissements en l'an 2500.

Les résultats montrent que le choix de la loi de décroissance a une influence très importante sur les valeurs qu'il convient de considérer pour $\Delta t_{90\%}$. En revanche, son influence est très limitée sur le calage des autres paramètres et l'ensemble des modèles aboutissent à des valeurs semblables pour A_0 , elim , R_{pilier} et $R(\infty)$.

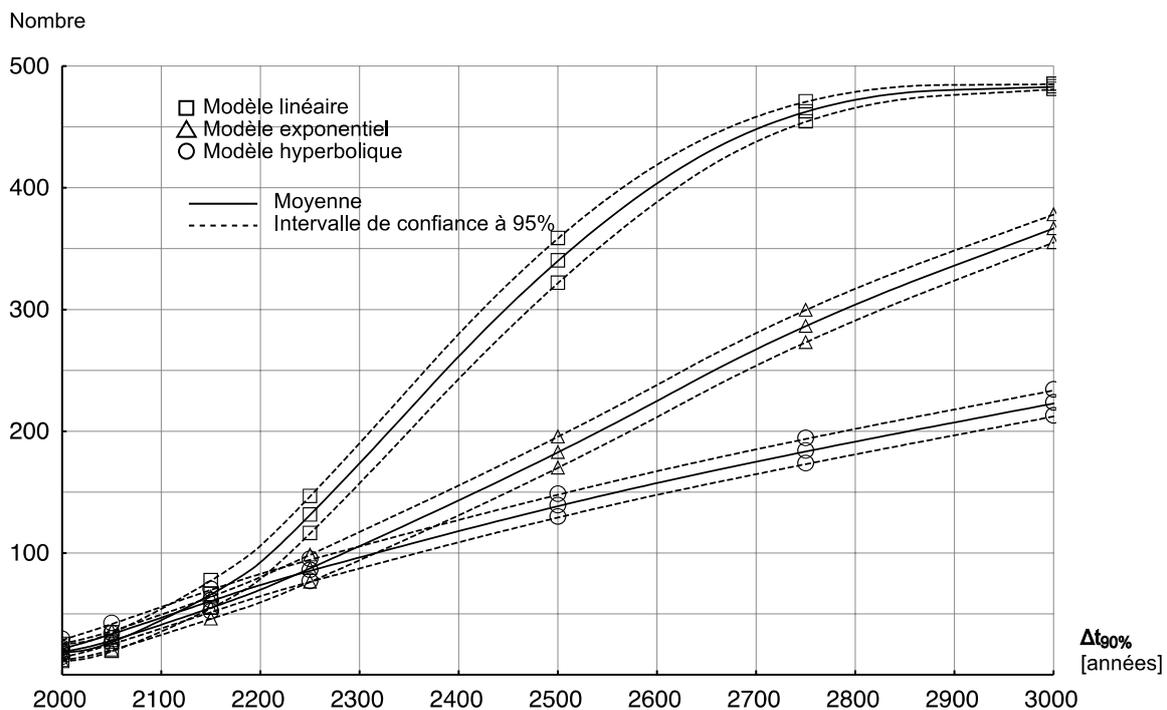


Figure 5 : Représentation des résultats finaux, obtenus avec chacune des trois lois considérées et donnant des résultats cohérents avec les éléments de calage existants.

Tableau 3 : valeurs finales considérées pour les modèles ajustés selon la loi de décroissance de la résistance utilisée.

	Modèle linéaire	Modèle exponentiel	Modèle hyperbolique
Rpilier [MPa]	Loi normale [$\mu=22$, $\sigma=3$]		
R(∞) [MPa]	7,5		
$\Delta t_{90\%}$ [year]	Distribution uniforme [200 ; 1000]	Distribution uniforme [500 ; 1500]	Distribution uniforme [2000 ; 3000]
A0 [ha]	1		
elim [m]	5		

8. Conclusions et perspectives

Le modèle développé présente un intérêt en tant qu'outil d'aide à la réflexion et non comme un outil d'aide à la décision dans la mesure où de nombreuses hypothèses importantes ne peuvent bénéficier de validation. La mise en œuvre d'une approche analytique, par une formalisation mathématique du problème, permet d'interpeller les experts sur la pertinence des hypothèses effectuées. En particulier, les hypothèses relatives à l'influence de l'intercalaire, à la variabilité de la résistance initiale et à la résistance finale constituent des pistes de recherche pertinentes. Le modèle pourrait être complété par une prise en compte de l'influence de l'élanement des piliers et la présence ou non de secteurs ennoyés. Une incertitude pourrait également être prise en compte pour l'ensemble des paramètres.

Références

- Bieniawski Z.T. Mechanism of brittle fracture of rock, Parts I, II, III. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1967, 4: 395-430.
- Costin L.S. Time dependent deformation and failure. In: Fracture Mechanics of Rocks. Academic Press, 1987, pp. 111–166.
- Grgic D., Homand F., Dagallier G., Ageing of Lorraine (France) abandoned iron mines. Rock Mechanics - a Challenge for Society, Särkka & Eloranta (eds), 2001 Swets & Zeitlinger Lisse, ISBN 90 2651 821 8.
- Kemeny J., The Time-Dependent Reduction of Sliding Cohesion due to Rock Bridges Along Discontinuities: A Fracture Mechanics Approach, Rock Mech. Rock Engng. (2003) 36 (1), 27–38.
- Tran, T.-H., Vénier R. and Cambou B. Discrete modelling of rock-ageing in rockfill dams, Computers and Geotechnics 36 (2009) 264–275.
- Whittaker B.N., Reddish D.J., (1989). Subsidence : Occurrence, Prediction, Control. Editions Elsevier.