

# DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE MULTI-ALEA POST-MINIER EN FRANCE

## DEVELOPMENT OF A POST-MINING MULTI-HAZARDS METHODOLOGY IN FRANCE

Hippolyte DJIZANNE<sup>1</sup>, Marwan AL HEIB<sup>2</sup>, Aurélien GOUZY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ineris, Parc Technologique ALATA, BP 2, 60550 Verneuil-en-Halatte, France

<sup>2</sup> Ineris, Campus ARTEM, 92 rue du Sergent Blandan, 54042 Nancy, France

**RÉSUMÉ** – Cet article a pour objectif de poser les bases méthodologiques pour l'évaluation des interactions entre les principaux aléas identifiés autour des mines abandonnées en France. Cette méthodologie a pour finalité de proposer un outil qui permettrait un aménagement et une gestion durable des bassins miniers français. Des matrices et des boucles sont utilisées pour visualiser et analyser les interactions entre les aléas.

**ABSTRACT** – This article aims to propose a methodology for evaluating the interactions between the main hazards identified around abandoned mines in France. The purpose of this methodology is to provide a tool that would allow the development and sustainable management of French mining areas. Matrices and loops are used to visualize and analyze interactions between hazards.

### 1. Introduction et méthodologie

En France, la fin de l'extraction minière a nécessité de développer des outils réglementaires pour la gestion de l'après-mine (Didier, 2007) notamment les Plans de Prévention de Risques Miniers (PPRM). En effet, plusieurs types d'aléas résiduels sont susceptibles d'affecter les anciens sites miniers. Plus largement, un territoire minier peut-être exposé à plusieurs types d'aléas (*dont des aléas miniers*), susceptibles d'interagir entre eux. Dans le cadre de l'après-mine, les aléas miniers peuvent être en interaction avec d'autres aléas miniers, des aléas naturels ou encore des aléas technologiques. Le terme multi-aléa est désormais fréquemment utilisé pour décrire ces situations.

Une réflexion a été menée à l'Ineris sur le développement d'une méthodologie qui permettrait, à terme, une identification et une évaluation du potentiel des interactions entre les différents aléas dans le contexte de l'après-mine. Pour un territoire donné, la méthodologie consiste d'abord à identifier les aléas miniers résiduels, les aléas naturels et les aléas technologiques. Ensuite, à préciser les types d'interactions : trois types d'interactions ont été recherchées : aléas miniers versus aléas miniers, aléas miniers versus aléas naturels et aléas miniers versus aléas technologiques. Finalement, analyser et visualiser les interactions, des matrices et des boucles ont été proposées afin de faciliter l'analyse et la visualisation des interactions potentielles entre aléas. Trois niveaux d'interaction ont été retenus : absence d'interaction ou *potentiel d'interaction nul* ; interaction(s) peu probable(s) ou *potentiel d'interaction faible* et interaction(s) probable(s) ou *potentiel d'interaction fort*. Cet article pose les bases méthodologiques pour l'évaluation des interactions entre les principaux aléas identifiés autour des mines abandonnées en France.

## 2. Description et évaluation des aléas

La première étape de la méthodologie est l'identification des aléas. Les aléas décrits dans cet article peuvent se produire sur les territoires marqués par la présence d'anciennes exploitations minières. Ils sont regroupés en trois grandes familles : les aléas miniers, les aléas naturels et les aléas technologiques.

### 2.1 Les aléas miniers

Les aléas miniers, 19 aléas retenus dans cet article, sont regroupés en quatre familles (Ineris, 2018 ; Tableau 4) :

- les aléas liés aux mouvements de terrain, tel que l'effondrement localisé (fontis), l'effondrement généralisé, etc. ;
- les aléas liés à l'échauffement de terrain sur dépôts miniers ;
- les aléas liés aux perturbations hydrologiques et hydrogéologiques tel que la modification des émergences, l'inondation des points bas topographiques etc. ;
- les aléas liés aux émanations de gaz qui peuvent être d'origine endogène (*au sein du gisement avant l'exploitation minière*) ou exogène (*au sein de l'environnement extérieur perturbé pendant et après l'exploitation minière*).

Notons que la sismicité induite par les travaux miniers est prise en compte dans cette analyse tandis que la pollution des sols, des eaux et de l'air d'une mine abandonnée n'est pas traitée.

Un aléa minier est qualifié en fonction de son intensité et la prédisposition du site minier (Ineris, 2018), notamment la méthode d'exploitation, la géologie, la topographie, l'hydrologie, etc. Trois classes d'intensité (*limitée, modérée et élevée*), ainsi que trois classes de prédisposition (*peu sensible, sensible et très sensible*) sont retenues. Le Tableau 1 est un exemple de croisement entre la prédisposition et l'intensité qui aboutit à l'évaluation de l'aléa minier, il est défini en trois niveaux : *faible, moyen* et *fort* (Ineris, 2018).

Tableau 1. Exemple d'évaluation de l'aléa minier - croisement de la prédisposition et de l'intensité pour l'évaluation de l'aléa minier (Ineris, 2018)

Intensité	Prédisposition		
	Peu sensible	Sensible	Très sensible
Limité	<i>Faible</i>	<i>Faible</i>	<i>Moyen</i>
Modérée	<i>Faible</i>	<i>Moyen</i>	<i>Fort</i>
Elevée	<i>Moyen</i>	<i>Fort</i>	<i>Fort</i>

### 2.2 Les aléas naturels

Les phénomènes naturels sont de mieux en mieux connus, étudiés et cartographiés à toutes échelles territoriales. 21 aléas naturels ont été identifiés (Tableau 4). Les aléas naturels sont généralement divisés en deux groupes : les aléas liés aux facteurs terrestres et les aléas liés aux facteurs climatiques. La plupart des aléas liés à l'atmosphère (cyclone, ouragan et tempête) ne sont pas pris en compte car ils n'interagissent pas ou très peu avec les aléas miniers. Pour faciliter l'analyse, les quatre aléas inondations ont été regroupés en un seul aléa. Le Tableau 2, à titre d'exemple, présente la qualification de l'aléa inondation selon quatre niveaux (*faible, modéré, fort* et *très fort*), il est établi en fonction de la hauteur d'eau ainsi que de la dynamique liée à la combinaison de la vitesse d'écoulement de l'eau et de la vitesse de montée des eaux.

Tableau 2. Qualification de l'aléa inondation en fonction de la hauteur et de la vitesse d'eau<sup>1</sup>

Hauteur d'eau	Dynamique		
	Dynamique lente	Dynamique moyenne	Dynamique rapide
H < 0,50 m	Faible	Modérée	Fort
0,50 < H < 1 m	Modérée	Modérée	Fort
1 m < H < 2 m	Fort	Fort	Très Fort
H > 2 m	Très fort	Très fort	Très fort

### 2.3 Les aléas technologiques

Les aléas technologiques<sup>3</sup> pris en compte dans cet article sont ceux qui sont liés à une activité humaine permanente correspondant à des accidents majeurs (*phénomènes dangereux susceptibles de conduire à des distances d'effet à l'extérieur du site à une probabilité donnée sur une installation industrielle*). Nous avons identifié au total 17 aléas (Tableau 4), liés à un effet thermique (explosion d'un gaz, le feu de nappe (liquide), etc.), toxique (rejet de produit toxique, substance radioactive, etc.) surpression (éclatement de bac) et rupture des ouvrages (barrage, digue, pont et de viaduc).

L'estimation de la probabilité d'occurrence ou la gravité d'un phénomène dangereux peut s'effectuer selon une approche qualitative, semi-quantitative ou purement quantitative. Le Tableau 3 présente une synthèse de l'évaluation de l'aléa technologique. L'arrêté ministériel du 29/09/2005 portant sur les installations classées, fixe cinq classes de probabilité croissante allant de E (*événement possible mais extrêmement peu probable*) à A (*événement courant*). La probabilité d'occurrence de l'aléa technologique est définie en 4 classes<sup>2</sup> (voir Tableau 3) : >D, 5E à D, <5E et Tous. L'intensité de l'effet de l'aléa technologique est définie en 4 classes : Indirect, Significatif, Grave et Très grave. L'aléa technologique est défini en 7 niveaux : Faible, Moyen, Moyen +, Fort, Fort +, Très Fort, Très Fort +.

Tableau 3. Evaluation de l'aléa technologique<sup>3</sup>

<b>Intensité de l'effet</b>	<b>Très Grave</b>		
Probabilité d'occurrence	> D	5E à D	< 5E
Niveau de l'aléa	Très Fort +	Très Fort	Fort +
<b>Intensité de l'effet</b>	<b>Grave</b>		
Probabilité d'occurrence	> D	5E à D	< 5E
Niveau de l'aléa	Fort +	Fort	Moyen +
<b>Intensité de l'effet</b>	<b>Significatif</b>		<b>Indirect</b>
Probabilité d'occurrence	> D	5E à D	< 5E
Niveau de l'aléa	Moyen +	Moyen	Faible

### 3. Identification et évaluation des interactions physiques entre aléas

Il n'existe pas encore de cadre méthodologique de référence à l'analyse multi-aléa consacrée à l'après-mine (Touili, 2018). Néanmoins, plusieurs outils méthodologiques sont envisageables pour étudier les interactions entre les aléas naturels : la matrice

<sup>1</sup> Source : Arrêté du 5 juillet 2019 relatif à la détermination, qualification et représentation cartographique de l'aléa submersion marine.

<sup>2</sup> Un phénomène de classe D est 10 fois plus probable qu'un phénomène de classe E, 5E correspond à 0,5D

<sup>3</sup> Source : Guide méthodologique pour les PPRT, MEDAD 2013.

d'interaction, la boucle d'interaction, la mise en place d'un SIG multi-aléa, les arbres de défaillance, l'analyse multicritère, la modélisation statistique de la vulnérabilité incluant une variabilité temporelle. Pour l'identification et l'évaluation des interactions entre les aléas, cette étude s'appuie sur la connaissance des caractéristiques communes de ces aléas. Des experts de différents domaines ont été réunis afin d'identifier les interactions possibles entre les aléas. Les outils choisis et présentés dans cet article sont la matrice d'interaction et la boucle d'interaction.

### **3.1 Matrice d'interaction entre les aléas**

Pour identifier la direction de l'interaction, nous avons défini un aléa source et un aléa cible. Un aléa source est un aléa qui se déclenche en premier et qui peut impacter ou déclencher un ou plusieurs d'autres aléas. La matrice d'interaction des aléas permet d'afficher la typologie et le potentiel des interactions à dire d'experts entre les aléas sources et les aléas cibles. Deux matrices d'interaction peuvent être générées pour identifier les interactions dans les deux directions où le potentiel de l'interaction est présenté en 3 niveaux :

- L'interaction entre deux aléas a un potentiel nul (*couleur blanche - absence d'interaction*) lorsqu'il n'est pas possible que ces aléas interagissent sur un même site compte-tenu de l'absence des facteurs communs qualifiant les deux aléas ou des mécanismes qui sont associés à ces aléas.
- L'interaction entre deux aléas a un potentiel faible (*couleur bleue - interaction peu probable*) lorsque cette interaction est phénoménologiquement possible, mais pas encore observée, ou lorsque les modifications engendrées par l'interaction ont une portée très limitée.
- L'interaction entre deux aléas a un potentiel fort (*couleur rouge - interaction probable*) lorsque cette interaction a déjà été observée sur un territoire ou lorsque les modifications engendrées par l'interaction ont une portée très importante.

Les matrices d'interaction ci-après proposées dans les Tableaux 5 à 7, doivent être considérées comme une première tentative d'évaluation du potentiel des possibles interactions entre les aléas miniers, les aléas naturels et les aléas technologiques. Le Tableau 5, présente les deux matrices d'interaction entre aléas miniers (sources et cibles). On note qu'un aléa minier peut-être en interaction avec plusieurs aléas miniers. A titre d'exemple l'aléa affaissement (SUB), en tant qu'aléa source est en interaction avec 6 aléas de potentiel faible et 6 aléas de potentiel fort. En revanche, le même aléa en tant qu'aléa cible est en interaction avec 6 aléas de potentiel faible et 3 aléas de potentiel fort. Les deux matrices ne sont pas symétriques.

Un deuxième exemple est celui de l'aléa modification du régime de cours d'eau (IMC), qui n'interagit avec aucun autre aléa minier en tant qu'aléa source mais avec 7 aléas de potentiel faible et 2 aléas de potentiel fort.

Les possibles interactions entre les aléas miniers et les aléas naturels (Tableau 6 et Tableau 7) sont moins nombreuses que celles entre les aléas miniers et les aléas technologiques. Une analyse plus fine de ces interactions est évidemment nécessaire.

Tableau 4. Récapitulatif des aléas miniers, naturels et technologiques utilisés dans cette analyse multi-aléas

Aléas miniers (19)	Codes	Aléas naturels (21)	Codes	Aléas technologiques (17)	Codes
Affaissement progressif	<b>SUB</b>	Affaissement	<b>AFF</b>	Explosions de gaz	<b>EXP</b>
Affaissement cassant	<b>AFC</b>	Effondrement localisé (fontis)	<b>FON</b>	Feu de nappe (liquide)	<b>FEN</b>
Crevasse	<b>CRE</b>	Dissolution (ex. gypse, craie ou sel)	<b>DIS</b>	Feu de torche (gaz ou liquide)	<b>FET</b>
Effondrement localisé (fontis)	<b>FON</b>	Retrait gonflement des argiles ou tassement	<b>GON</b>	Feu de solides (produits solides combustibles)	<b>FES</b>
Effondrement généralisé	<b>EFG</b>	Glissement profond	<b>GSP</b>	Le boil over (hydrocarbure lourds)	<b>BLO</b>
Tassements liés aux travaux miniers ou aux terrils	<b>TAS</b>	Glissement superficiel	<b>GSS</b>	Le BLEVE (gaz liquéfiés inflammable)	<b>BLV</b>
Glissement profond	<b>GSP</b>	Ravinement, reptation (érosion)	<b>RAV</b>	Rejet de produit liquide avec vaporisation du jet liquide	<b>RPL</b>
Glissement superficiel	<b>GSS</b>	Érosion côtière	<b>ERC</b>	Rejet de produit gazeux	<b>RPG</b>
Ravinement, Reptation ou érosion	<b>RAV</b>	Coulée	<b>COU</b>	Rejet d'un gaz liquéfié	<b>RGL</b>
Coulée	<b>COU</b>	Eboulement	<b>EBO</b>	Incendie avec décomposition de produits toxiques	<b>IPT</b>
Eboulement de terrain	<b>EBO</b>	Chute de pierres ou de blocs	<b>CHT</b>	Rejets de substances radioactive ou Radiation nucléaire	<b>RSR</b>
Chute de pierre ou de blocs	<b>CHT</b>	Avalanche	<b>AVA</b>	Rejets de massif d'eau	<b>RME</b>
Echauffement des veines ou des terrils	<b>COM</b>	Séisme	<b>SIS</b>	Mouvements de terrains liés aux activités anthropiques	<b>MVT</b>
Gaz de mine	<b>GAZ</b>	Eruption volcanique	<b>ERP</b>	Éclatement de bac (Libération d'énergie Pneumatique)	<b>EBC</b>
Modification du régime des émergences des eaux souterraines	<b>IME</b>	Feu de forêt	<b>FEU</b>	VCE (Combustion de gaz, de vapeurs)	<b>VCE</b>
Modification du régime d'un cours d'eau	<b>IMC</b>	Tassement, consolidation	<b>TAS</b>	BLEVE (Combustion de gaz)	<b>BLV</b>
Inondation des points bas topographiques	<b>IPB</b>	Inondation de plaine par opposition aux inondation torrentielle	<b>INO</b>	Explosion de nitrate d'ammonium	<b>ENA</b>
Inondation brutale - ennoyage	<b>IBE</b>	Inondation par ruissellement et coulée de boue			
Sismicité induite en lien avec l'ancienne exploitation minière	<b>SIS</b>	Inondation par remontée de nappe			
		Inondation par submersion marine			
		Forte précipitation			
		Cyclone	<b>CYC</b>		
		Ouragan	<b>OUR</b>		
		Tempête	<b>TEM</b>		

L'analyse de ces matrices montre, d'une part que les interactions entre les aléas miniers sources et les aléas naturels sont moins fréquentes que les interactions entre les aléas miniers et aléas miniers, d'autre part les aléas miniers interagissent principalement avec l'aléa inondation, qu'il soit d'origine minier ou naturel.

Tableau 5. Matrice d'interaction entre aléas miniers (sources et cibles), la couleur bleue correspond à une interaction peu probable et la couleur rouge correspond à une interaction probable.

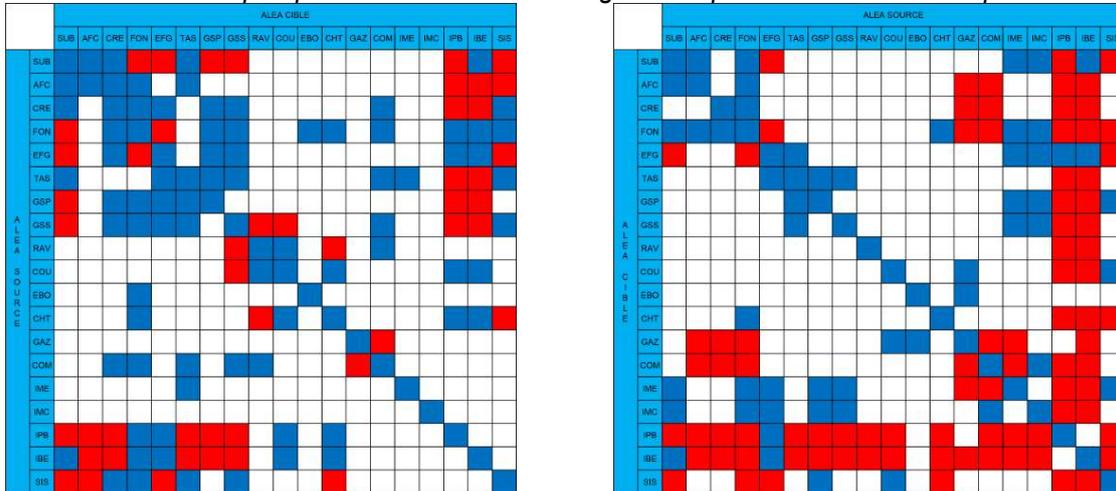


Tableau 6. Matrice d'interaction entre aléas miniers (bleu clair) et aléas naturels (vert)

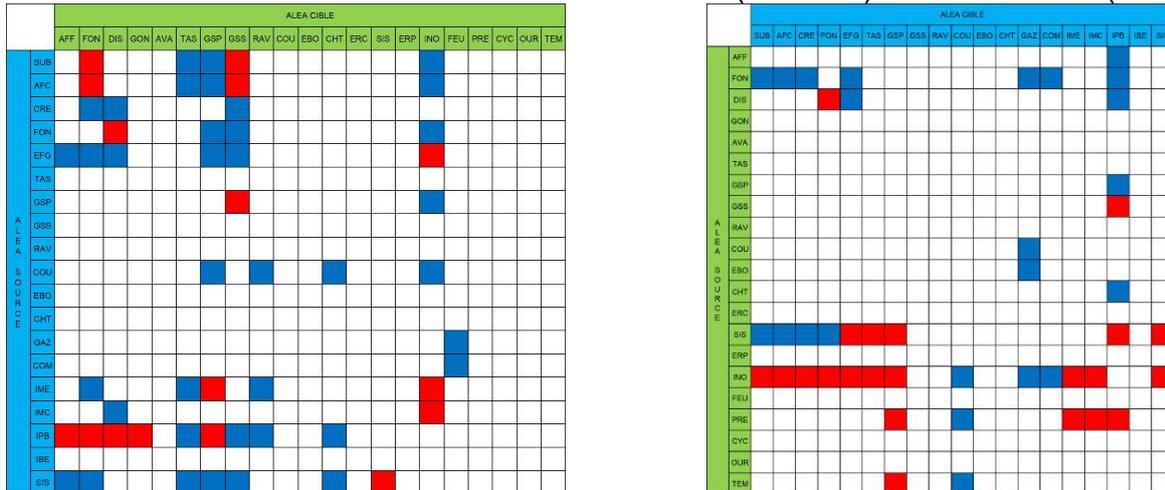
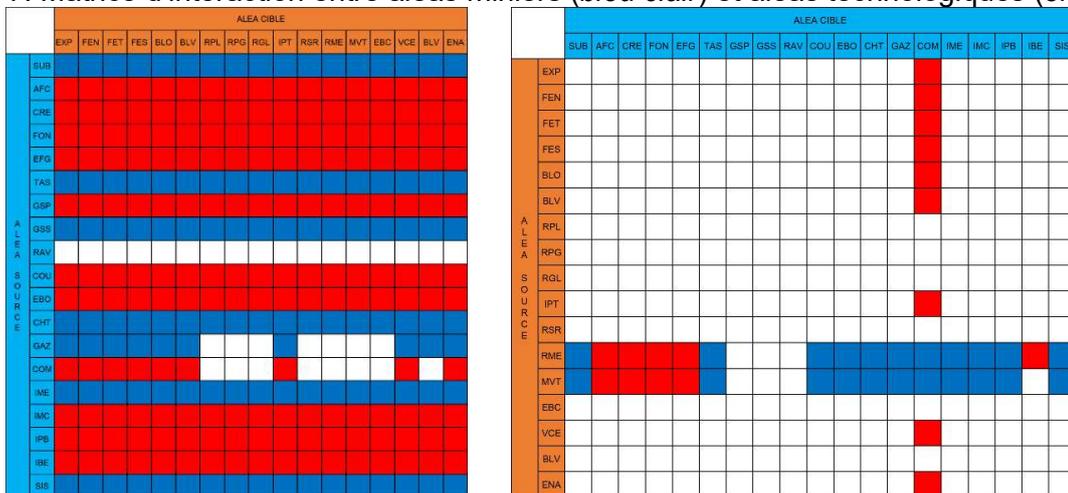


Tableau 7. Matrice d'interaction entre aléas miniers (bleu clair) et aléas technologiques (orange)



### 3.2 Boucles d'interaction entre aléas

La boucle d'interaction est un outil d'affichage qui permet de représenter la typologie ou le potentiel des interactions entre un aléa source, placé au centre de la boucle, et un ou plusieurs aléas cibles qui gravitent tout autour de l'aléa source. Dans une boucle, bien que l'aléa source soit au centre, la flèche qui part du centre vers l'aléa cible peut-être dédoublée dans le sens inverse, permettant d'identifier une simple ou double interaction directe entre les aléas. Une interaction directe où l'aléa source déclencherait directement l'autre aléa (cible). Le potentiel de l'interaction est représenté par la couleur de la flèche. Les Figures 1 à 3 présentent des boucles d'interaction entre aléas miniers et les aléas : miniers, naturels et technologiques. Ce mode de présentation, complémentaire à la matrice d'interaction traite un aléa source à la fois, à titre d'exemple, nous avons présenté les aléas miniers suivants : affaissement progressif (SUB), effondrement localisé (FON) et effondrement généralisé (EFG) et leurs interactions avec les aléas miniers, les aléas naturels et technologiques.

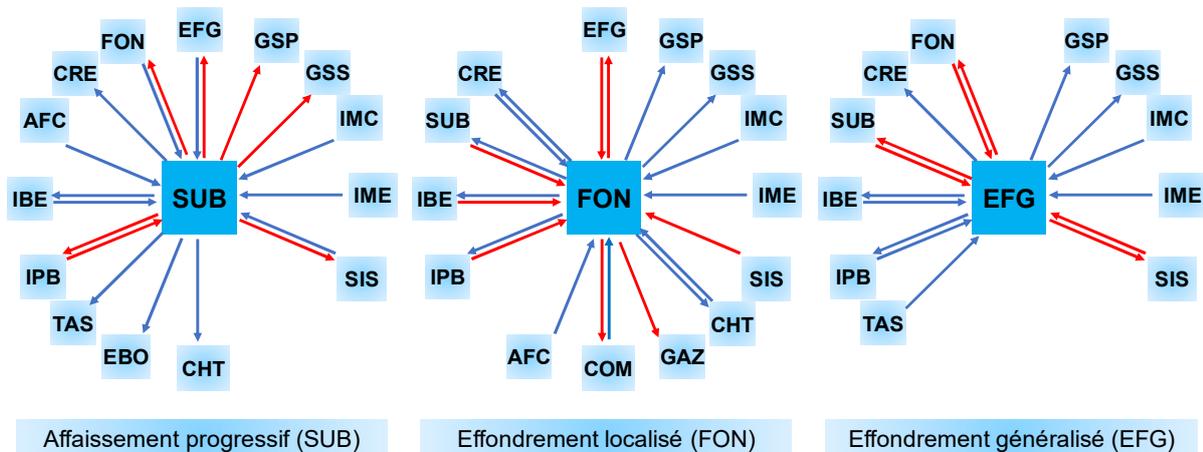


Figure 1. Boucles d'interaction des aléas miniers de type affaissement progressif (SUB), effondrement localisé (FON) et effondrement généralisé (EFG) et les autres aléas miniers

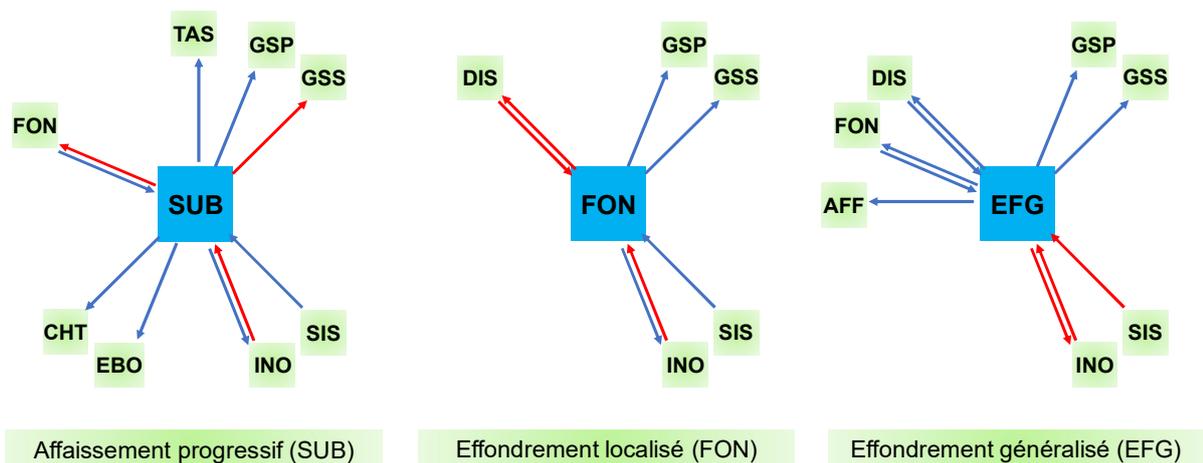


Figure 2. Boucles d'interaction entre les aléas miniers de type affaissement progressif (SUB), effondrement localisé (FON) et effondrement généralisé (EFG) et les aléas naturels

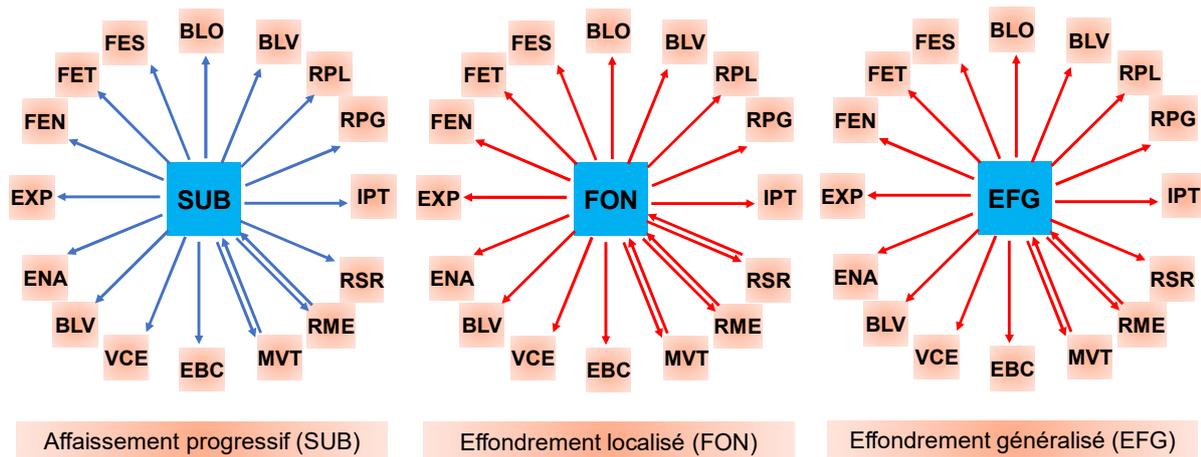


Figure 3. Boucles d'interaction entre les aléas miniers de type affaissement progressif (SUB), effondrement localisé (FON) et effondrement généralisé (EFG) et les aléas technologiques

#### 4. Conclusion

Cet article propose une base méthodologique et de représentation pour l'évaluation des interactions entre les aléas identifiés autour des anciennes mines en France. Après avoir rappelé les avantages de cette analyse multi-aléa, la méthodologie a consisté à identifier ces aléas, rappeler les méthodes d'évaluation individuelle des aléas, analyser les facteurs de prédisposition pour identifier à dire d'experts et évaluer le potentiel des possibles interactions et enfin valider cette méthodologie sur des cas concrets. L'identification des interactions est basée essentiellement sur la connaissance des aléas (nature de phénomène, prédisposition ou probabilité d'occurrence, intensité). Les trois familles d'aléas sont évaluées différemment. Parmi les outils utilisés pour afficher les résultats des interactions, nous avons retenu les matrices et les boucles d'interaction, deux outils de représentation complémentaires. Il s'agira par la suite de tester la méthode sur des anciens sites miniers concernés par ces interactions ce qui permettra d'avoir une meilleure prise en compte du risque et donc une meilleure préservation des intérêts généraux identifiés autour des mines abandonnées en France.

#### 5. Références bibliographiques

- Didier C. (2007). La politique française de prévention des risques liés à l'après-mine. Réalités industrielles. Annales des mines, Ed. Eska, 2007, pp.86-97. (ineris-00961916)
- Ineris (2018). Evaluation des aléas miniers, Guide méthodologique Ineris 17-164640-01944A, 54p.
- Touili N. (2018). La gestion des risques multiples en zones urbaines : un modèle intégré d'analyses multirisques pour une résilience générale. ISTE Open Science – Published by ISTE Ltd. London, UK – openscience.fr