

(ID Modèle = 454913)

Ineris - 227346 - 2790402 - v1.0

04/02/2026

Traitements des terrils houillers en combustion ou en échauffement

Synthèse bibliographique et retour d'expérience européen

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : DAVESNE Jean-Marie, GOMBERT Philippe

Vérification : GOUZY AURELIEN; POULARD FREDERIC

Approbation : DUPLANTIER STEPHANE - le 04/02/2026

Table des matières

1	Contexte et objectif	6
2	Chronologie des travaux sur la mitigation	7
2.1	Réponses au questionnaire envoyé concernant la problématique des terrils houillers en auto-échauffement	7
2.2	Visites de terrils en combustion ou ayant subi des traitements	8
2.2.1	Journée du 23 avril 2024	8
2.2.2	Journée du 24 avril 2024	9
2.2.3	Journée du 25 avril 2024	9
3	Principales méthodes de gestion et de mitigation	11
3.1	Recouvrement ou encapsulation	11
3.1.1	Généralités	11
3.1.2	Retour d'expérience européen	14
3.2	Creusement de tranchées	17
3.2.1	Généralités	17
3.2.2	Retour d'expérience européen	18
3.3	Défournement/remodelage voire démantèlement	18
3.3.1	Généralités	18
3.3.2	Retour d'expérience européen	21
3.4	Par aspersion de liquides	23
3.4.1	Arrosage intensif	23
3.4.2	Pulvérisation d'eau	24
3.4.3	Retour d'expérience européen	25
3.5	Étouffement par injection de fluides	25
3.5.1	Par injection d'eau	26
3.5.2	Par injection d'autres liquides	26
3.5.3	Par inertage au gaz	28
3.6	Surveillance et restrictions d'accès	28
3.6.1	Généralités	28
3.6.2	Retour d'expérience européen	29
3.7	Autres méthodes	29
3.8	Synthèse des principales méthodes de mitigation	30
4	Conclusions	31
5	Références	32

Table des figures

Figure 1 : Classement hiérarchique des méthodes de mitigation employées	7
Figure 2 : Localisation des villes renfermant les terrils visités	8
Figure 3. Démantèlement par décapage (à gauche) puis nivellation et reprofilage (à droite) des terrils de Barnsley au Royaume-Uni (Donnelly et Bell, 2011)	12
Figure 4 : Modèle d'occurrence et de distribution de condensats d'émissions gazeuses dans la combustion spontanée de terrils houillers (Querol et al., 2011)	13
Figure 5 : Revégétalisation du sommet d'un terril houiller en combustion (a) et recouvrement par une couche de cendres volantes (b) à Welnowiec près de Katowice (Ciesielczuk, 2015).....	14
Figure 6 : Tentative de scellement du terril Rymer Cones en Pologne par des plaques de béton et des cendres volantes (à gauche) et vue du sommet (à droite) (Misz-Kennan et Tabor, 2015)	15
Figure 7 : Zone de crevasses dues à la combustion au sommet du Rymer Cones en 2024	15
Figure 8 : Recouvrement des flancs du terril Wrzosy à Pszow en 2024	16
Figure 9 : Vue satellite de la Halde Skalny en 2026 (source : Google Earth)	16
Figure 10 : Traitement et aspect final du terril de la carrière Simon à Schœneck (Paquette et al., 2002)	17
Figure 11 : Creusement d'une tranchée coupe-feu en 1997 sur la Verse des Prés à Cransac, Aveyron (Paquette et Degas, 2016)	18
Figure 12 : Tranchée du Grand terril de Bytom en 2024	18
Figure 13 : Excavation du banc de résidus houillers de Brymbo au pays de Galles (Nichol et Tovey, 1998)	19
Figure 14 : Vue d'ensemble (à gauche) et en détail (à droite) des excavations réalisées en 2008 pour éteindre le feu du terril de Starzykowiec (Misz-Kennan et Tabor, 2015).....	20
Figure 15 : Vue des opérations de défournement du terril de Rochebelle près d'Alès	20
Figure 16 : Compaction des résidus récents du terril Marcel par « rouleau vibreur » (Misz-Kennan et Tabor, 2015)	21
Figure 17. Vue du dernier cône Rymer non remodelé	21
Figure 18 : Remodelage du terril Warny-Las en 2024.....	22
Figure 19 : Bassin de récupération des eaux de traitement et remodelage du terril Dębieńsko	22
Figure 20 : Remodelage du terril Dębieńsko Centrale de tri des stériles miniers.....	23
Figure 21 : Tentative d'extinction du terril en combustion de Rochebelle (Gard) à l'aide de bombardiers d'eau ⁴	23
Figure 22 : Traitement en rizière d'un terril de charbon en combustion (McNay, 1971).....	24
Figure 23. Comparaison des quantités d'eau utilisées pour éteindre du charbon en combustion en laboratoire selon trois méthodes d'extinction (Hadden et Rein, 2011)	25
Figure 24 : Injection de boue cryogénique CO ₂ -N ₂ dans un terril en combustion (Kim, 2011).....	27
Figure 25 : Injection de coulis au droit d'une zone en combustion en 2024	28
Figure 26 : Mesures de surveillance et de restrictions d'accès en République Tchèque en 2024 (a : monitoring en sondage de la zone en combustion ; b : Grillage et barbelés pour sécuriser une zone thermiquement active sur le terril d'Ema)	29

Résumé

L'état des lieux de la problématique des échauffements de terrils réalisé par l'Ineris (Gombert, 2023) détaille les conditions nécessaires à l'accumulation de chaleur au sein d'un terril et les risques associés à leur échauffement (sécuritaires, sanitaires et/ou environnementaux).

En 2024 et en 2025, l'Ineris a ensuite réalisé une analyse bibliographique et un retour d'expérience du traitement des terrils houillers en combustion ou en échauffement en Europe, afin d'évaluer leur niveau d'efficacité. Ce retour d'expérience s'est appuyé sur 3 jours de visites de terrils en Pologne et en République Tchèque. Les principales méthodes de gestion et de mitigation observées sur place sont : la surveillance des terrils, le recouvrement des terrils par des matériaux inertes et leur démantèlement.

Le présent rapport synthétise ces travaux et identifie des éléments essentiels à prendre en compte lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre des travaux de mitigation sur des terrils en combustion.

Les traitements des terrils sont généralement complexes à mettre en œuvre (Nguyen, 2025). Leur efficacité n'est pas toujours assurée. Les méthodes de mitigation doivent être adaptées au cas par cas et généralement combinées entre elles pour être efficace (recouvrement / confinement, creusement de tranchées, remodelage, injection de coulis, pulvérisation d'eau...) ; de plus, un suivi sur plusieurs années est généralement requis pour s'assurer de l'atteinte des objectifs de traitement et de la non reprise de la combustion.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Traitement des terrils houillers en combustion ou en échauffement, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 227346 - 2790402 - v1.0, 04/02/2026.

Mots-clés :

Après-mine, auto-échauffement, combustion, terril, charbon, mitigation.

1 Contexte et objectif

Un terril houiller est un entassement à ciel ouvert de résidus miniers issus de l'extraction du charbon qui renferme des roches encaissantes, des restes de charbon et parfois divers autres déchets d'origine minière ou non minière (bois, huiles, déchets verts...). Il en existe plusieurs milliers dans le monde, en activité ou abandonnés, dont près d'un millier en France. Une partie d'entre eux, surtout les plus anciens, sont ou ont été en auto-échauffement, voire sont entrés en combustion (Gombert, 2023).

En effet, le simple stockage en vrac d'un solide combustible, oxydable (bois, papier, charbon, tourbe, produit agroalimentaire, matière plastique...) et divisé (poudre, grains, blocs...) peut conduire à son auto-échauffement par oxydation (Evanno, 2005). Ce processus résulte de la réaction exothermique d'oxydation des matériaux au contact de l'air et, dans le cas du charbon, d'autres mécanismes également exothermiques comme son hydratation ou l'oxydation de la pyrite qu'il renferme. Si la chaleur libérée au cours de ces divers processus parvient à s'accumuler et que l'apport d'air est suffisant pour entretenir les réactions exothermiques, la température va pouvoir augmenter jusqu'à éventuellement atteindre celle correspondant à l'inflammation du charbon. Il en résulte une combustion spontanée ou auto-combustion qui se manifeste en surface par des dégagement de gaz, de fumées et/ou de flammes. L'arrêt du processus d'auto-échauffement ou sa poursuite puis son emballement vers l'auto-combustion dépend essentiellement du bilan du flux d'air qui favorise l'oxydation en entrant dans le terril mais exporte les calories produites en sortant du terril. Divers facteurs aggravants sont susceptibles de modifier ce flux : ils sont de nature interne au terril (granulométrie des résidus, teneur en eau, teneur en soufre), externe (hauteur et forme du terril, compaction des matériaux, âge du terril) ou climatologique (précipitations, humidité de l'air, rôle du vent, température ambiante).

À cela s'ajoutent des causes externes susceptibles d'enclencher directement le processus de combustion d'un terril, comme les incendies (naturels ou accidentels), la foudre, les courts-circuits, etc...

Parmi les dizaines de milliers de terrils houillers existant dans le monde, quelques milliers sont ou ont été en combustion visible. Cela a probablement été le cas de la plupart des anciens terrils où les déblais étaient mal triés et les blocs trop gros, ce qui favorisait à la fois la présence de combustible et l'entrée de comburant. Actuellement, seuls quelques pourcents des terrils modernes sont en combustion visible, bien qu'on ne sache pas réellement – faute de mesures – combien sont déjà en auto-échauffement.

La combustion d'un terril houiller peut engendrer des évènements redoutés de type sécuritaire (brûlures, explosions, instabilités), sanitaire (pollution de l'eau ou de l'air, nuisances olfactives) et/ou environnemental (relargage de composés (éco)toxiques, brouillards acides, gaz à effet de serre). Les principaux phénomènes qui en résultent sont la brûlure des personnes, l'instabilité du terril, son explosion, la pollution de l'air, la pollution des sols ou des eaux alentour, ou encore des nuisances olfactives ou dues aux fumées.

Dans ce contexte, après un premier travail de synthèse sur le risque d'auto-échauffement et d'entrée en combustion des terrils (Gombert, 2023). Le Bureau du Sol et du Sous-Sol (BSSS) a confié à l'Ineris la réalisation d'une étude visant à évaluer les méthodes de traitement des terrils houillers en combustion ou en échauffement et plus particulièrement celles utilisées Europe.

2 Chronologie des travaux sur la mitigation

2.1 Réponses au questionnaire envoyé concernant la problématique des terrils houillers en auto-échauffement

La première phase de ce travail a débuté en 2021 par l'envoi d'un « Questionnaire concernant la problématique des terrils houillers en auto-échauffement » à 140 personnes-ressources dans plusieurs pays charbonniers avec ces 3 questions :

- Question 1: Combien y a-t-il de terrils houillers en auto-échauffement ou en auto-combustion dans votre zone ?
- Question 2 : Quels sont les principaux problèmes que ces terrils en combustion font peser dans la zone d'étude ?
- Question 3 : Quelles sont les principales méthodes de mitigation utilisées dans cette zone ?

23 réponses ont été obtenues issues de 12 pays (Gombert, 2023).

L'analyse des réponses aux questions 1 et 2 a déjà été réalisée (Gombert, 2023), relativement à la question 3, la méthode de mitigation la plus fréquemment citée par les personnes-ressources est l'étanchéification des terrils par recouvrement ou par compaction (Figure 1). Vient ensuite un panel d'autres méthodes employées préférentiellement dans certains pays, comme l'excavation du terril pour récupération du clinker¹ (Pologne), la surveillance par caméra thermique (Allemagne, Tchéquie) ou tout simplement le fait de laisser le terril se consumer s'il n'y a pas d'enjeu (Royaume-Uni, Belgique). En revanche, la méthode la moins employée est l'aspersion de liquide (généralement de l'eau) en surface qui est toutefois mentionnée en Chine et, dans une moindre mesure, en Russie.

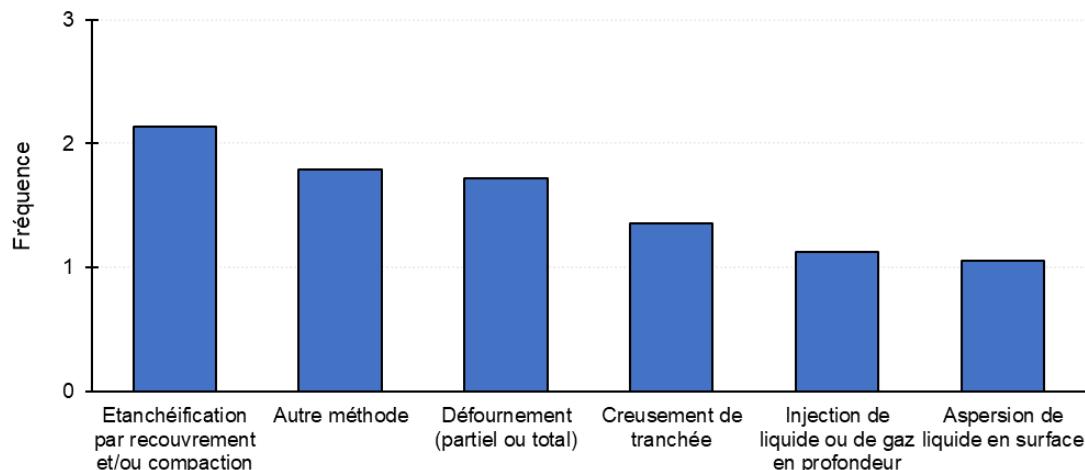


Figure 1 : Classement hiérarchique des méthodes de mitigation employées

Légende : 0 = rare, 1 = peu fréquent, 2 = fréquent, 3 = très fréquent

À retenir : Les réponses obtenues ne concernent qu'une dizaine de pays. Elles font état d'environ 9000 terrils houillers charbonniers dont un millier sont ou ont été en auto-échauffement ou en combustion, soit une proportion moyenne d'environ 10 %. Cette proportion varie en fait d'un pays – voire d'un bassin minier – à l'autre mais dans des pays comme la Chine (1^{er} producteur mondial de charbon), cette problématique n'a encore été que peu étudiée. Il apparaît aussi que les terrils modernes sont moins sujets à l'auto-échauffement que les anciens terrils, lesquels sont majoritaires dans certains pays. La fréquence et la gravité des phénomènes qui en résultent sont généralement considérées comme faibles, à l'exception parfois de la pollution de l'air. Enfin, la méthode de mitigation la plus fréquemment rencontrée est l'étanchéification des terrils par recouvrement ou par compaction.

¹ Clinker : Roche d'un terril recueite lors de l'auto-échauffement du terril, mais non fondue (par opposition aux paralavas, qui ont fondu) ; aussi appelée porcellanite ou schiste rouge.

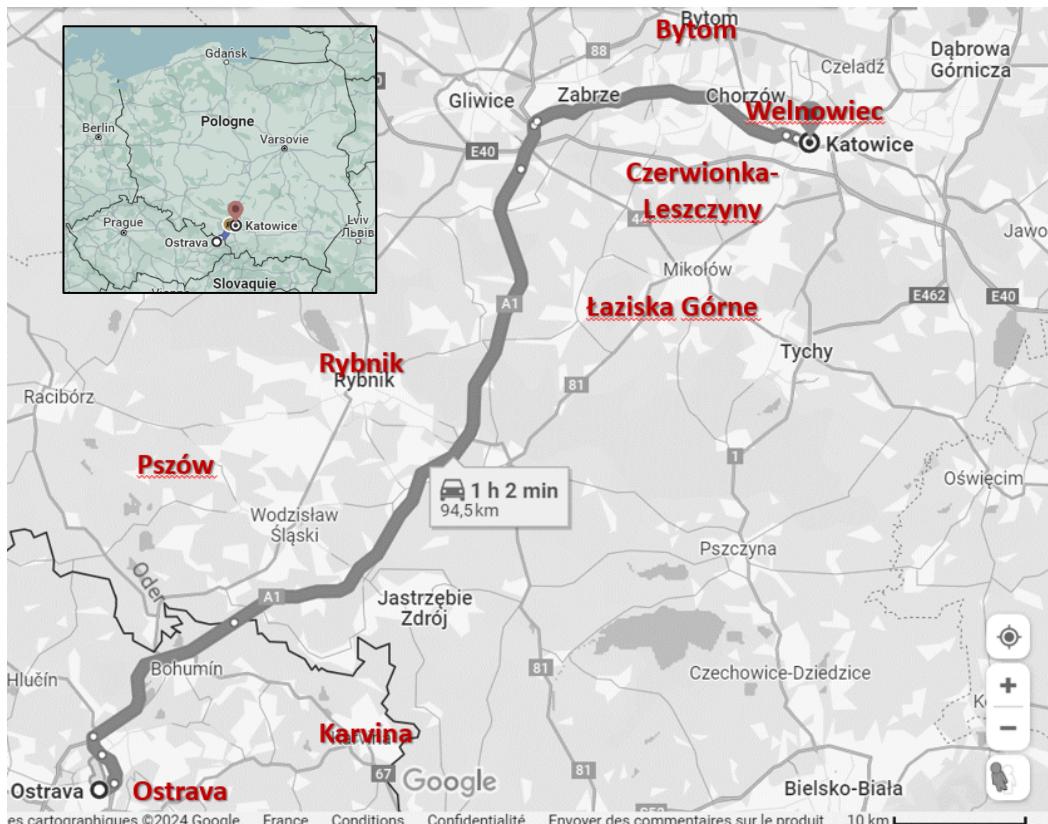
2.2 Visites de terrils en combustion ou ayant subi des traitements

Entre le 23 et le 25 avril 2024, une délégation formée de MM. Jean-Marie Davesne et Philippe Gombert pour l'Ineris, Olivier Lefebvre pour GEODERIS, Fabrice Quirin et Rémy Albinet pour le BRGM-DPSM s'est rendue en Pologne (Silésie) et en République Tchèque (Moldavie-Silésie).

12 terrils ont été observés à différents niveaux de combustion et de mitigation : 9 en Pologne et 3 en République Tchèque (Figure 2 et Tableau 1). Des relevés de température ont été effectués sur chacun de ces sites avec la caméra thermique HIKMICRO HM-TP42-3AQF/W-Pocket2 (Précision annoncée de $\pm 2^{\circ}\text{C}$) ainsi qu'une surveillance des concentrations en gaz à l'aide d'un détecteur multi-gaz Microclip X3.

Des retours d'expérience ont été échangés avec plusieurs experts polonais et tchèques (listés ci-après), au cours de ces visites de terrils, mais aussi au sein de leurs établissements respectifs : la faculté des mines de Gliwice (Pologne), la faculté des sciences de la terre de Sosnowiec (Pologne), la mine d'état Boleslaw, la société ZOWER sur le site du Terril Dębieńsko à Czerwionka-Leszczyny (Pologne) et l'université technique d'Ostrava (République Tchèque).

Selon les experts polonais rencontrés, tous les terrils coniques de Pologne auraient pris feu entre 2000 et 2016. En Haute-Silésie, il y aurait 250 terrils dont 17 sont actuellement en combustion : le plus grand occupe une superficie de 312 ha et ils représentent une surface totale de 4000 ha. D'après les experts de l'université technique d'Ostrava, il existerait environ 1000 terrils en République Tchèque, dont six thermiquement actifs.



2.2.1 Journée du 23 avril 2024

La visite des 6 terrils effectués ce jour-là a été organisée par MM. Adam Nadudvari (chercheur à l'université de Silésie de Katowice, ayant travaillé sur certains de ces terrils depuis 2013) et Łukasz Kruszewski (chercheur de l'Institut de géologie de Varsovie). La visite a débuté par la ville de Bytom,

située à 15 km au nord-ouest de Katowice², puis s'est poursuivie jusqu'à Pszow, à environ 60 km au sud-ouest de Katowice.

Parmi les 6 terrils observés, 4 sont toujours en auto-combustion et 2 ont été traités efficacement. Des prélèvements géochimiques ont été effectués par Adam Nadudvari pour étudier l'impact de ces terrils sur leur environnement.

2.2.2 Journée du 24 avril 2024

Cette journée a débuté à la faculté des mines de Gliwice, qui travaille notamment sur la gestion des terrils en combustion. Elle effectue par exemple un suivi de certains terrils par photogrammétrie avec des mesures régulières de température et de teneurs en gaz, notamment par le biais de drones volants de type DJI Matrice 210 V2 ou ZENMUSE XT 2 et 5.

Elle a été organisée par MM. Zenon Różański (Professeur assistant à la Faculté des mines de Gliwice), Paweł Wrona (Professeur à l'université de Silésie) et Jacek Korski (ingénieur au KOMAG Institute of Mining Technology, ancien directeur de la mine de charbon Bolesław Śmiały). 2 anciens terrils ont été observés, situés à moins de 30 km au sud de Katowice.

2.2.3 Journée du 25 avril 2024

3 terrils ont été observés dans le secteur d'Ostrava (République Tchèque). Ostrava est la capitale de la région de Moldavie-Silésie qui se trouve à l'extrême est de la République Tchèque. Il s'agit d'une région autrefois dénommée « le Cœur d'acier de la Tchécoslovaquie » du fait de ses nombreuses usines sidérurgiques et mines de charbon.

MM. Václav Zubíček et Martin Pies (chercheurs à l'université technique d'Ostrava) nous a présenté la région, les sites de visite et les moyens de surveillance utilisés. Plus tard, nous avons rencontrés sur site M. Rostislav Dudáš, directeur adjoint de l'entreprise d'état DIAMO pour l'après-mine. DIAMO est la compagnie d'état responsable de la gestion de l'après-mine (planification et travaux). Ils sont environ 3500. Les autorités sanitaires interviennent également pour les mesures de gaz car il s'agit de zones relativement urbanisées.

M. Adam Nadudvari et son équipe de géochimistes et d'écologues étaient également présents ce jour-là.

² Katowice est la plus grande ville de Silésie, région située au sud-ouest de la Pologne. La ville fut fondée au cours 19e siècle et prospéra grâce à une industrialisation massive, notamment sidérurgique, basée sur l'exploitation du charbon.

Tableau 1 : Visites de terrils en Pologne et en République Tchèque

Nom du terril	A été en combustion	Tentatives de mitigation	Types de mitigation	Toujours en combustion	Facteur aggravants	Restrictions d'accès	Remarques
	Oui/Non	Efficaces/Sans succès/Non		Oui / Non		Efficaces/Insuffisantes/Non	
Bytom	Oui	Sans succès (injection) puis efficaces	Injection de coulis, puis excavé et recouvert par cendres volantes et boues	Non	Déchets ménagers	Non	
Chorzow	Oui	?	?	Oui	Déchets ménagers	Insuffisantes	
Grand terril de Bytom	Oui	Sans succès	Tranchée	Oui	Hautes températures	Insuffisantes	Présence d'une personne sur site
Wawni-Las	Oui	Efficaces	Remodelé et recouvert par matériaux inertes et compactés	Non		Efficaces	
Stożki (mine Rymer)	Oui	Sans succès	Remodelé et recouvert par des plaques de béton et des matériaux inertes	Oui	Présence de crevasses	Insuffisantes	
Wrzosy (à Pszow)	Oui	Partiellement efficaces	Aplanni et recouvert par environ 0,50 m de matériau argilo-sableux	par secteurs	Piste sauvage de motocross	Insuffisantes	Traitements non pérennes
Skalny (à Łaziska Górnne)	Oui	Efficaces	Tranchées + sarcophage (cendres volantes, déchets miniers et résidus de traitement d'eaux usées), injection de CO ₂ liquide via des forages allant jusqu'à 3 m de profondeur	Non		Efficaces	Monitoring et tonte régulière
Dębieńsko (à Czerwionka-Leszczuny)	Oui	Efficaces	Démantèlement, réutilisation des matériaux, remodelage et recouvrement par argiles	Localement (secteurs non traités)		Efficaces	
Heřmanice (à Ostrava)	Oui	Partiellement efficaces	Températures contenues grâce à la mise en place d'un mur de 1 m de cendres volantes et de 5 m d'argiles compactées à 3 MPa dans une dépression + monitoring	Oui	Zone péri-urbaine	Insuffisantes	Surveillance drone, injections pour stabiliser les pentes
CSA (près de Karvina)	Non	/	En cours de démantèlement	/		Efficaces	
Ema (près d'Ostrava)	Oui	Non	Surveillance mais températures contenues	Oui	Topographie marquée	Insuffisantes	Touristique

3 Principales méthodes de gestion et de mitigation

La mitigation d'un risque consiste à réduire soit l'intensité des phénomènes dangereux (brûlures, explosions, instabilités, pollution de l'air, nuisances olfactives, ...) soit la vulnérabilité des enjeux (personnes, bâtiments, ...). Dans le cas de l'auto-échauffement d'un terril, réduire l'intensité de l'aléas pourrait être réalisé en diminuant sa température interne, c'est-à-dire en stoppant ou en ralentissant la réaction d'oxydation du charbon ou en favorisant la dissipation de chaleur. De même, interdire l'accès aux terrils en combustion permet de réduire le niveau de vulnérabilité humaine à ces phénomènes.

La synthèse des méthodes de mitigation et de leur utilisation en Europe, qui fait l'objet de ce rapport, a consisté à effectuer une synthèse bibliographie de ces différentes méthodes, puis à évaluer leur efficacité à partir de cas concrets et à partir des retours des visites de terrain en Pologne et en République Tchèque.

3.1 Recouvrement ou encapsulation

3.1.1 Généralités

Le recouvrement ou l'encapsulation du terril se fait généralement avec des matériaux destinés à réduire le flux d'air entrant (Zhai et al., 2017), des critères de couts et de disponibilité sont également pris en considération. Il doit donc s'agir de matériaux ininflammables (argiles, loess, cendres volantes, poussières de calcaire ou de schistes...) ou antipyrogéniques (NaCl, CaCl₂, MnCl₂...), disponibles en grandes quantités et à faible coût.

Dès 1948, Harrington et Heast proposent de mettre en place à la surface des zones en combustion d'un terril une couverture ou une couche de matériau incombustible (poussière de calcaire ou de schistes, cendres volantes). Ils signalent néanmoins que cela s'est souvent avéré improductif car, soit les fortes pluies érodent la couverture, soit les craquelures qui y apparaissent en période sèche dans concentrent l'air sur certaines zones qui continuent alors à brûler. Ils citent plusieurs exemples aux Etats-Unis :

- à Mahanoy City (Pennsylvanie), la combustion du terril St Nicholas, survenue en 1937, a pu être ralentie (mais non stoppée) en recouvrant la zone en feu avec 700 t de poussière de roche qui ont créé un écran d'environ 700 m² sur 0,60 à 0,90 m d'épaisseur ;
- en Virginie de l'Ouest, un terril de 12 m de hauteur sur environ 6 000 m² a brûlé pendant 10 ans jusqu'à ce qu'il soit partiellement recouvert de 0,75 m d'argile ; la partie recouverte n'a plus brûlé pendant 4 ans mais le feu a alors pris dans la partie non recouverte.

Toujours aux États-Unis, McNay (1971) signale que le recouvrement des terrils en combustion par des matériaux non combustibles est une technique largement utilisée en raison de son caractère relativement peu coûteux. Elle consiste à recouvrir le terril d'un manteau d'argile, de terre ou d'un autre matériau incombustible facilement disponible, afin de limiter la circulation d'air au sein du terril. Toutefois, l'efficacité de cette méthode se fait surtout sentir à court terme, à moins qu'un entretien et une réparation continués de la couverture ne soient prévus, ce qui fait qu'elle est généralement considérée comme un échec sur le long terme.

À Muga (Etats-Unis, Alabama), un terril d'environ 30 m de hauteur et d'une surface de 1 ha a été créé lors de l'exploitation souterraine du charbon entre 1908 et 1983. Vers 1989, il a pris feu pendant 3 mois lorsqu'on a brûlé les ordures qui avaient été jetées par-dessus. En 2006, tout le terril est entré en combustion, incommodant les habitants et créant plusieurs accidents à cause des brouillards matinaux occasionnés par ces fumées. Il a été décidé d'ensevelir le terril sous 1 m de terre en 2010 et le feu a de nouveau été déclaré comme éteint.

A Barnsley, au Yorkshire (Royaume-Uni), on a démantelé deux terrils en 1995 afin de réhabiliter ce site de 49 ha (Donnelly et Bell, 2011 ; Figure 3). Lorsque le sommet a été creusé, on y a découvert des points chauds dont la température allait de 600 à 900°C. Il a été décidé de décapier le terril en fines couches de 30 cm d'épaisseur puis de les compacter afin de réduire l'entrée d'air et donc la combustion. Les points chauds ont été recouverts d'argile compactée en couche de 45 cm, elle-même recouverte de débris schisteux. Des sondages creusés un an plus tard ont toutefois montré que les points chauds n'avaient pas encore refroidi : ils ont été éteints par pulvérisation de cendres et le site a pu être restauré.

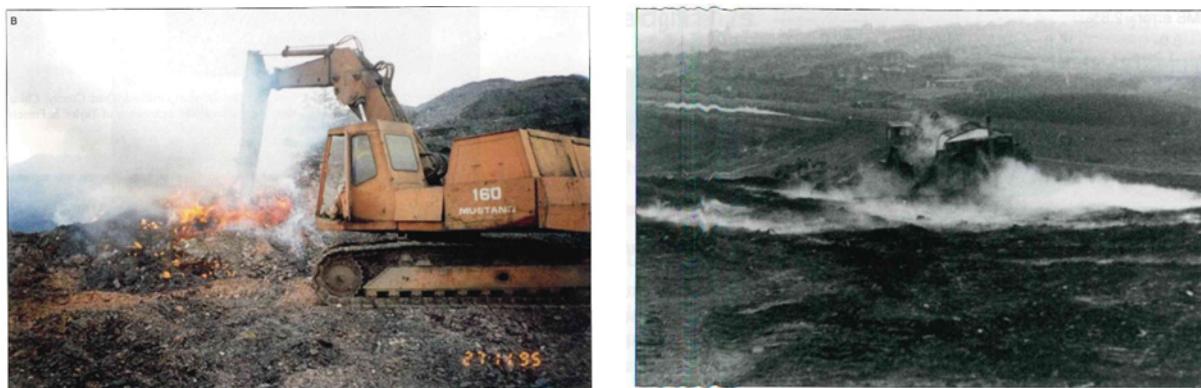


Figure 3. Démantèlement par décapage (à gauche) puis niveling et reprofilage (à droite) des terrils de Barnsley au Royaume-Uni (Donnelly et Bell, 2011)

À Shirebrook, dans le Nottinghamshire (Royaume-Uni), des sondages réalisés dans un terril de 1999 à 2001 ont montré des températures allant jusqu'à 300°C à 5 m de profondeur (Donnelly et Bell, 2011) : ce terril brûlait en fait depuis au moins 50 ans. Un recouvrement par de la poussière de calcaire a temporairement réduit la température du sol mais la combustion a fini par reprendre.

En Chine, dans la province de Shanxi, l'exploitation minière intensive de la région de Datong a entraîné une importante accumulation de résidus miniers dont plusieurs sont en combustion spontanée. En 2009, la plupart des terrils houillers a été compactée et recouvert d'une couche de sol, bouchant ainsi les événements actifs. D'après Querol et al. (2011), ces mesures auraient permis de réduire considérablement l'occurrence de la combustion spontanée, qui s'est limitée à une combustion sporadique et à des feux profonds dans les failles développées sous les terrils recouverts de terre (Figure 4).

En Inde, Mahananda (2014) signale que la plupart des stratégies de contrôle et de prévention de la combustion spontanée des terrils visent à éliminer l'oxygène ou à empêcher son accès au combustible. La meilleure façon d'y parvenir est d'appliquer des couches de couverture de matériaux inertes qui réduisent la vitesse à laquelle l'oxygène peut pénétrer dans le terril. Les meilleurs matériaux de couverture sont les argiles qui peuvent retenir l'humidité résiduelle. Cette humidité est importante car elle bloque les voies de passage de l'oxygène, empêchant ainsi la réaction d'oxydation de se produire. Les recherches sont actuellement menées sur les cendres volantes afin qu'elles servent de matériau isolant et réduisent la susceptibilité de combustion spontanée des terrils.

Dans le cas du stockage de tas de charbon pur, Zeyang et al. (2014) ont étudié le risque d'auto-échauffement de 3 tas (A, B et PCE) situés dans le bassin minier de Terruel en Espagne : seul le tas PCE est recouvert d'une couche de 3-4 cm de boue de cendres volantes, les deux autres tas étant nus (mais de diverses tailles et formés de divers charbons). Le temps d'apparition de l'auto-échauffement dans les tas de charbon A et B a été de respectivement 52 jours et 189 jours, ce qui montre qu'ils présentent un risque d'auto-échauffement (qualifié de « fort à élevé » par les auteurs). En revanche, il n'y a pas eu d'auto-échauffement pendant toute la durée de l'observation (190 jours) dans le tas PCE, ce qui indique qu'il s'agit, pour les auteurs, d'un tas « très sûr avec un niveau de risque faible à nul ».

En Chine, afin d'améliorer les méthodes traditionnelles de recouvrement des terrils, un nouveau matériau d'isolation thermique a été mis au point avec des cendres volantes et de l'argile (Shenghua et al., 2014). Il s'agit d'empêcher la combustion spontanée tout en permettant la pose d'une couverture de terre végétale. La zone d'étude de cette recherche est un terril de la mine de charbon n°3 du groupe Yangquan. La zone a été divisée en quatre parcelles de plus de 200 m chacune où différents types de couches d'isolation ont été appliquées : cendres volantes (FF), argile (NN), couches alternées de cendres volantes et d'argile (FNC, à raison de 10 cm de cendres volantes puis 20 cm d'argile), et mélange de cendres volantes et d'argile (FNH, proportion de cendres volantes/argile = 1/2, épaisseur de 30 cm après avoir été tassée deux fois par un rouleau compresseur). Un an après la mise en place des couches isolantes, des échantillons ont été prélevés à intervalles réguliers. Le résultat des tests de perméabilité a montré que l'utilisation d'une couche de cendres volantes et d'argile sous la couverture de sol bloque efficacement l'entrée d'air : la perméabilité des couches FF ou NN est inférieure à celle de la valeur critique permettant la combustion spontanée (2.10^{-10} m^2) mais cette valeur finit par augmenter au fil du temps. L'effet du mélange des deux matériaux est meilleur : le mélange FNC a eu le meilleur effet de blocage, et sa perméabilité était inférieure à $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$. La température de surface

après une année de revégétalisation dans les zones d'application du FNC et du FNH était de l'ordre de 10-15°C à 10-30 cm de profondeur.

En Afrique du Sud, l'Université du Witwatersrand signale que si la situation est suffisamment grave mais que l'excavation du matériel concerné ne peut être réalisée, l'encapsulation devient le moyen privilégié pour contrôler les feux de terrils. Ce système utilise la privation d'oxygène pour stopper la combustion par recouvrement. D'autres systèmes sont l'étanchéité de surface, l'injection de coulis en couche profonde, l'excavation de surface et l'utilisation de pulvérisations d'eau à haute pression. Les cendres volantes peuvent également être utilisés pour encapsuler les terrils en échauffement.

Remarques :

Lorsqu'une épaisse couche de sol recouvre la surface d'un terril les « cheminées » de ventilation ne peuvent plus atteindre la surface et former des événements, en l'absence de crevasses (Querol et al, 2011). En conséquence, les processus de condensation dus à l'échauffement vont se produire en profondeur, et le flux gazeux atteignant la surface ne contiendra que du SO₂ comme principal polluant gazeux réactif, alors que des nodules de sulfate de calcium vont se former dans la matrice. Cela met en évidence le rôle du recouvrement dans la réduction des émissions organiques et inorganiques (en induisant la condensation des polluants à des niveaux plus profonds) et dans le piégeage de certains polluants des émissions gazeuses, principalement le SO₂, via des réactions de neutralisation. L'étude comparative de trois terrils de charbon, en Chine, soumis à divers types de remise en état a montré l'influence que la couverture du sol exerce sur la profondeur à laquelle les sels se condensent. De plus, la calcite contenue dans le sol joue un rôle de tampon vis-à-vis du pH et réduit la mobilité des métaux susceptibles d'atteindre la surface³. Il est donc important pour la réduction du lessivage que le sol utilisé pour les travaux de remise en état soit compacté ce qui, en plus des questions de stabilité structurelle, augmente le rapport ruissellement/infiltration : l'eau ruisselle à la surface plutôt que de s'infiltrer en profondeur. Bien que le lessivage des polluants ne puisse pas être totalement évité, la remise en état et, plus particulièrement, le recouvrement par des couches de sol peuvent être considérés comme une mesure efficace et rentable (en particulier si des sols locaux sont utilisés) pour réduire le risque environnemental de rejets importants (flux gazeux et liquides).

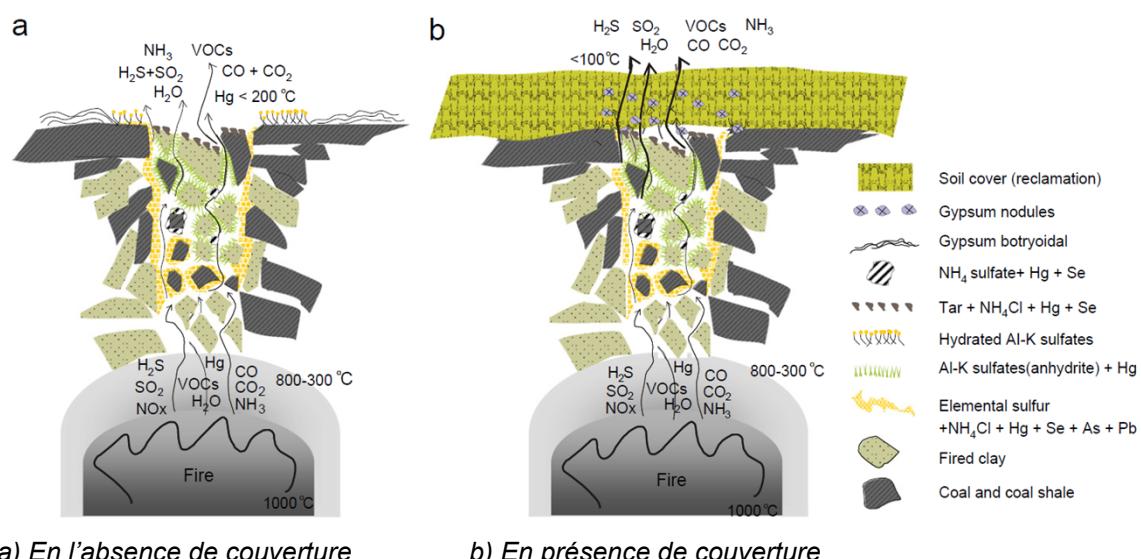


Figure 4 : Modèle d'occurrence et de distribution de condensats d'émissions gazeuses dans la combustion spontanée de terrils houillers (Querol et al., 2011)

³ La lixiviation de nombreux métaux (Li, Ti, Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Rb, Y, Nb, Mo, Cd, Sn, Sb, Terres Rares, Hf, Ta, W, Bi, Pb, Th, U) se produit lorsque le pH est inférieur à 3 voire (pour As, Se, V, Cr) entre 4 et 6 (Quero et al., 2011).

3.1.2 Retour d'expérience européen

3.1.2.1 Pologne

- La décharge municipale abandonnée à Katowice-Wełnowiec (Ciesielczuk, 2014 et 2015 ; Figure 5) contenait un mélange de résidus d'exploitation du charbon, de déchets municipaux et de déchets de construction. Elle a été fermée en 1996 puis recouverte entre 1998 et 2001 par différentes couches de terrains avec notamment des résidus de charbon. Ces couches ont des épaisseurs plus importantes que prévues et un taux plus élevé de matière organique/carbone. Le site a pris feu en 2008 et a été réhabilité vers 2015 par recouvrement avec une couche de cendres volantes puis par revégétalisation du sommet aplani. Malgré l'ajout de cette couche, dont l'épaisseur n'est pas précisée, la température a continué d'augmenter en bordure de la zone traitée et en moins d'un an, le feu souterrain s'est propagé sur environ 100 m. D'après Ciesielczuk, la propagation aurait peut-être pu être limitée en creusant une tranchée préventive perpendiculaire à la direction de propagation.



Figure 5 : Revégétalisation du sommet d'un terril houiller en combustion (a) et recouvrement par une couche de cendres volantes (b) à Wełnowiec près de Katowice (Ciesielczuk, 2015)

- Le terril de Rymer est l'un des nombreux terrils du bassin houiller de Haute-Silésie (Misz-Kennan et al., 2015b). Son édification a commencé au début des années 1900 puis une tentative de récupération des matériaux a eu lieu entre 1995 et 1999. Bien que le terril ait été entouré d'un fossé rempli de cendres volantes et d'argiles dans le but de bloquer les entrées d'air à sa base, il a rapidement commencé à montrer des signes d'auto-échauffement d'intensité variable. En 2000, certaines parties du dépôt ont été recouvertes de panneaux de béton remplis de boue de cendres volantes afin de tenter d'empêcher l'air de pénétrer à l'intérieur du terril (Figure 6). Cette mesure n'a pas non plus permis d'empêcher l'auto-échauffement et, après un certain temps, le processus d'auto-échauffement est devenu si intense qu'il a fallu retirer les panneaux et les cendres volantes (Misz-Kennan et Tabor, 2015).

Aujourd'hui, le terril est surveillé en permanence et les zones en feu sont systématiquement excavées pour être éteintes. Le terril a également été reconstruit par endroits pour éliminer les points chauds. Malgré ces mesures, les visites de terrain ont permis de constater que son sommet est en combustion avec des crevasses, pouvant atteindre 5 m de longueur sur 5 cm d'ouverture (Figure 7), qui émettent des fumerolles. Il semble que ce genre de crevasse parvienne à se rouvrir quelques années après le recouvrement du terril. Les chercheurs qui l'étudient ont noté la formation de pyrite au niveau des fumerolles ainsi qu'une émission de mercure sur la partie sommitale en combustion.



Figure 6 : Tentative de scellement du terril Rymer Cones en Pologne par des plaques de béton et des cendres volantes (à gauche) et vue du sommet (à droite) (Misz-Kennan et Tabor, 2015)



Figure 7 : Zone de crevasses dues à la combustion au sommet du Rymer Cones en 2024

- Le terril Dębieńsko, situé à Czerwionka-Leszczuny, regroupait 3 cônes de 1939 avec des concentrations en charbon entre 6 % et 10 %. Il a pris feu en 2003 et 2 des 3 cônes ont été démantelés. Le troisième, moins actif, a été conservé pour raison paysagère, en tant que témoin du passé minier. Il a été partiellement traité en recouvrant sa base d'une couche de matériaux fins afin de limiter les entrées d'air, mais il continue de se consumer sur les côtés.
- Une partie du terril Wrzosy à Pszow est en cours de recouvrement par environ 0,50 m de matériau argilo-sableux ocre mais on a observé des fumerolles à plusieurs endroits en périphérie de cette couverture (Figure 8) ; actuellement, le feu couve toujours mais il s'est déplacé.



Figure 8 : Recouvrement des flancs du terril Wrzosy à Pszow en 2024

- Le terril Skalny (Figure 9) à Łaziska Górske, a connu plusieurs traitements majeurs (tranchées, injections, remodelage, ...), dont la mise en place d'un « sarcophage » réalisé avec des déchets miniers et des boues de traitement issues de l'usine thermique proche, puis le recouvrement de la partie sommitale par une couche d'environ 10 cm de terre. Pour éviter l'érosion de cette couche, les eaux de pluie tombant sur le terril sont récupérées dans un bassin sommital afin d'arroser la surface végétalisée, avec parfois un pompage d'eau de mine pour maintenir ce bassin en eau. L'arrêt de l'auto-combustion de ce terril a nécessité de combiner plusieurs méthodes de mitigation, comme des tranchées pour limiter sa propagation, un remodelage et des injections pour stabiliser ses pentes et un recouvrement total pour réduire très fortement les apports en oxygène.



Figure 9 : Vue satellitaire de la Halde Skalny en 2026 (source : Google Earth)

3.1.2.2 France

En France, plusieurs terrils houillers ont été confinés par recouvrement (Post, 2014). On peut citer le cas du « schistier » de la carrière Simon à Schœneck, en Moselle, dont le confinement a permis de supprimer les émanations de gaz et de faire baisser les températures (Paquette et al., 2002). En effet, sur ce site, la combustion a débuté et pris de l'ampleur en 1998 et les premiers travaux de confinement ont été réalisés au début de 1999 avec l'apport de 30 000 m³ de sables argileux et de déblais de chantiers, afin de recouvrir les hauts de talus et le bord de la plate-forme d'une couche de 0,50 à 1 m d'épaisseur. Après l'apparition de nouveaux foyers dans la zone centrale, en partie basse du talus, un nouvel apport 43 000 m³ a été réalisé fin 1999 pour tenter de contenir les foyers de combustion mais ceux-ci, une fois recouverts, se sont déplacés latéralement. Au cours de l'année 2000, l'Ineris a donc préconisé les mesures suivantes (Figure 10) :

- réaliser un masque du pied de talus (22 mètres de haut, 400 mètres de long, 115 000 m³) dans les secteurs les plus émissifs ;
- projeter sur le flanc du terril une couche de coulis de cendres volantes et de ciment épaisse d'une vingtaine de centimètres (soit au total 10 300 m³), pour une première action rapide d'étanchéification ;
- poursuivre les apports de sables pour continuer à recouvrir les foyers en crête (20 000 m³).

Après analyse thermographique, il est apparu que la totalité du terril était en combustion et qu'un défournement devenait irréalisable. Le choix a donc été fait d'un confinement total avec plus de 600 000 m³ de matériaux, mis en place par tranches montantes de 0,3 m compactées. Au final, l'épaisseur du recouvrement atteint 2,5 m en crête et près de 15 à 20 m à la base du talus, au droit des parties les plus grossières, donc les plus perméables et les plus chaudes. Enfin, le talus a été stabilisé en abaissant sa pente de 35° à 27° et le terril a été ensemencé par projection de graines et de fertilisants. L'auto-échauffement a semble-t-il cessé et plus aucune odeur ni trace de CO n'a été mise en évidence lors de la surveillance mise en place. Le coût de cette opération a été de 4 M€.



a) Projection de coulis sur les flancs du terril



b) Vue générale du site réhabilité

Figure 10 : Traitement et aspect final du terril de la carrière Simon à Schœneck (Paquette et al., 2002)

3.2 Creusement de tranchées

3.2.1 Généralités

Il s'agit ici d'isoler les parties en échauffement ou en combustion du terril en y creusant des tranchées (Figure 11) pour, entre autres, circonscrire la combustion et éviter sa propagation. Celles-ci peuvent être remplies de matériaux ininflammables (argiles, loess, cendres volantes, poussières de calcaire ou de schistes...) ou antipyrogéniques (NaCl, CaCl₂, MnCl₂...), en fonction de leur disponibilité et de leur coût. Toutefois, il s'agit généralement d'un mélange eau-cendres, éventuellement d'argiles humides. D'après Ciesielczuk (2015), cette méthode serait surtout efficace dans le cas des petits terrils plats.

Dès 1948, Harrington et Heast évoquent la possibilité, lorsque la combustion d'un terril est limitée à un secteur spécifique, d'isoler cette zone par une tranchée afin que le feu ne puisse se propager à l'ensemble du terril. Ils citent quelques exemples de ce type de traitement aux Etats-Unis :

- en Pennsylvanie, le terril de résidus d'anthracite de Mahanoy City a brûlé pendant 10 ans à partir de 1937 avec une zone en combustion qui mesurait environ 900 m² ; celle-ci a pu être isolée par une tranchée ;
- en Pennsylvanie, un terril édifié de 1915 à 1926 puis abandonné, a pris feu en 1942 ; on s'est contenté de creuser une tranchée jusqu'au niveau du sol pour isoler la partie en combustion mais quelques mois plus tard, l'autre partie du terril a pris feu spontanément.

Pour Richards et al. (1993), le creusement de tranchées peut être utilisé pour isoler et limiter la propagation du feu (Figure 11). Ces tranchées doivent alors avoir au moins 2 m de large et 2 m de profondeur, voire plus si la profondeur de la zone de combustion est plus importante. Les tranchées peuvent être laissées ouvertes pour l'inspection ou, s'il est important de contenir l'incendie, elles doivent être remplies d'une boue de poussière de calcaire et d'eau, ou d'un autre matériau inerte tel que de l'argile ou des cendres volantes pulvérisées.

À Brymbo, au nord du Pays de Galles (UK), une tranchée de 1,6 à 2,0 m de large et jusqu'à 6 m de profondeur a été creusée et remplie de granulats de calcaire concassé (Nichol et Tovey, 1998). Ces travaux n'ont pas été complètement efficace et une phase de défournement a dû être mis en œuvre (cf. § 3.3 suivant).



Figure 11 : Creusement d'une tranchée coupe-feu en 1997 sur la Verse des Prés à Cransac, Aveyron (Paquette et Degas, 2016)

3.2.2 Retour d'expérience européen

- Une vaste tranchée a été creusée au Grand terril de Bytom (Figure 12), dans le but, notamment, d'excaver des matériaux en combustion et d'isoler une partie du terril, mais le feu a fini par reprendre à quelques centaines de mètres de distance du foyer initial.



Figure 12 : Tranchée du Grand terril de Bytom en 2024

- Le terril Skalny à Łaziska Górske, a connu plusieurs traitements majeurs. Parmi ces traitements, le matériau en feu a été extrait, puis plusieurs tranchées ont été creusées et remplies par des cendres volantes et des résidus de traitement d'eaux usées compactés. L'efficacité de ces traitements est difficile à évaluer en raison des autres traitements réalisés par la suite (recouvrement, injections, ...).

3.3 Défournement/remodelage voire démantèlement

3.3.1 Généralités

Le défournement consiste à mettre à nu les zones en combustion, voire de démanteler complètement le terril, afin de refroidir la partie mise à nu et de déplacer la partie de matériaux en combustion et la « traiter » par ailleurs. Les matériaux défournés peuvent être déplacés sur un autre site pour y édifier un nouveau terril mieux compacté, éventuellement en y incorporant des matériaux ininflammables, ou à les refroidissant à l'eau au passage. On notera que, pour les petits terrils, on peut procéder directement à leur compactage *in situ*.

Harrington et Heast (1948) citent le cas du terril d'anthracite St Nicholas, en feu à Mahanoy City (Etats-Unis, Pennsylvanie), où 1,3 Mm³ de matériaux en combustion ont été extraits afin de mettre à l'air la zone en combustion. Ces matériaux ont été ensuite triés en fonction de leur température et de leur risque d'auto-échauffement, puis stockés en 3 tas (Leitch, 1940). Ces tas ont été soigneusement compactés puis refroidis, couches par couches, au cours de leur réalisation.

Une variante a été signalée par Hebley (1956) dans le Midwest américain pour éteindre un terril en feu : un jet d'eau à haute pression a fait déplacer les débris en feu jusqu'au bas du terril où un bulldozer a pu les étaler et les compacter en en chassant l'air.

À Brymbo (cf. chapitre 3.2), outre la tranchée, on a vainement tenté de recouvrir la zone en combustion d'un long banc de résidus houillers (de 10 m de hauteur sur plusieurs kilomètres de longueur) par 0,20 m de poudre de calcaire et 0,40 m d'argile, puis de l'isoler à l'aide d'une tranchée de 1,50 m de largeur remplie de poudre de calcaire (Nichol et Tovey, 1998). Il a finalement été décidé d'excaver 15 000 m³ de matériau en combustion, de les transporter sur un stockage temporaire, de les refroidir par aspersion d'eau, de les mélanger avec des matériaux inertes (cendres volantes et sol argileux) puis de les ramener sur site et de les compacter, en ajoutant une couche de sol argileux et une revégétalisation (Figure 13).



Figure 13 : Excavation du banc de résidus houillers de Brymbo au pays de Galles (Nichol et Tovey, 1998)

En Afrique du Sud, Akinshipe et Kornelius (2017) signalent que si la situation est suffisamment grave, cela justifie l'excavation du matériel concerné, sinon l'encapsulation est le moyen privilégié pour contrôler les feux de terrils.

A Barnsley, au Yorkshire (Royaume-Uni), les deux terrils démantelés en 1995 (cf. chapitre 3.1) n'avaient pas refroidi. Leur niveling, leur reprofilage et leur compactage n'avaient pas été suffisants et ils ont finalement été éteints par pulvérisation de cendres (Donnelly et Bell, 2011).

Pour Misz-Kennan et Tabor (2015), le démantèlement d'un terril avec la suppression des matériaux combustibles serait la seule façon d'éviter l'accumulation de chaleur à l'intérieur d'un ancien terril houiller. Les tentatives pour les sceller seraient vaines et la seule solution possible serait, d'après eux, de permettre un accès complet de l'air aux parties chaudes du terril en créant des excavations. L'air introduit fera monter la température et provoquera une combustion complète avec émission de gaz. Après plusieurs jours, la température baissera car les conditions favorisant l'accumulation de chaleur cesseront d'exister. Après un court intervalle, un matériau inerte pourra être introduit dans les vides laissés par les résidus brûlés. Cette méthode a été appliquée avec succès dans le terril de Starzykowiec (Figure 14) et les cônes de Rymer.



Figure 14 : Vue d'ensemble (à gauche) et en détail (à droite) des excavations réalisées en 2008 pour éteindre le feu du terril de Starzykowiec (Misz-Kennan et Tabor, 2015)

En France, près d'Alès (Gard), un incendie de forêt a provoqué en juillet 2004 l'entrée en combustion des deux anciens terrils houillers du Mont Ricateau et de Rochebelle. Pour éviter l'embrasement généralisé de ce dernier, proche de la ville, le défournement de 220 000 m³ de matériaux en combustion a été réalisé (Figure 15). Le terril a également été remodelé de manière à assurer la stabilité des pentes, la gestion des eaux de surface, la protection des sols de l'érosion ainsi que l'insertion paysagère. Une surveillance en continu de la qualité de l'air a été mise en place sur le site durant les travaux. Le défournement du terril de Rochebelle a permis de contrôler son auto-combustion, mais le traitement du terril Ricateau, dont le volume est beaucoup plus conséquent, aurait été trop conséquent. Il a donc été décidé, après avoir mis en place les mesures de sécurité nécessaires (clôture et déboisement partiel du site, réalisation d'une ceinture coupe-feu périphérique) de le laisser se consumer sous la surveillance de l'Office national des forêts, gestionnaire du site. Actuellement, on peut encore voir des fumerolles qui s'en dégagent lors d'épisodes pluvieux.



Figure 15 : Vue des opérations de défournement du terril de Rochebelle près d'Alès

En Pologne, le terril de la mine Marcel a subi plusieurs auto-échauffements. Il résulte de l'amalgame de trois anciens terrils, recouverts de résidus houillers qui ont finalement été démantelés et compactés (Figure 16). Misz-Kennan et Tabor (2015) indiquent toutefois que pour éviter l'auto-combustion de terrils, la compaction des matériaux ne suffit pas et il faut également veiller à ce que les pentes de ces terrils soient faibles et à mélanger ou à intercaler les stériles avec des matériaux inertes.



Figure 16 : Compaction des résidus récents du terril Marcel par « rouleau vibreur » (Misz-Kennan et Tabor, 2015)

3.3.2 Retour d'expérience européen

- Le terril Stožki de la mine Rymer (voir chapitre 3.1.2.1) était initialement constitués de trois terrils coniques appelés les « Rymer Cones » mais deux d'entre eux ont été écrétés et étalés pour former un seul vaste terril conique au sommet aplati d'où dépasse le dernier cône (Figure 17). Avant le remodelage de deux des trois cônes, ce terril avait subi une tentative d'extinction par excavation puis par recouvrement de cendres volantes du côté des maisons mais le feu a migré sur l'autre versant. Le remodelage devait faciliter son traitement, mais le terril est toujours partiellement en combustion.



Figure 17. Vue du dernier cône Rymer non remodelé

- Le terril de Warny-Las, relativement plat, mais deux zones en combustion avaient été détectées en 2017 par analyse des photos satellites, avec des températures in situ mesurées à 500°C. Comme il existe des maisons et une zone d'activités à proximité, et qu'il était souvent parcouru par des promeneurs, il a été nécessaire de le traiter. Lors de notre visite en 2024 (Figure 18), il était en travaux de réhabilitation afin d'en faire un parc. Le détail de son traitement ne nous a pas été transmis. Toutefois, d'après les observations de terrain, ce dernier a probablement subi un défournement pour sécuriser le site. Ensuite, il a été recouvert avec des matériaux de déconstruction de bâtiments et du clinker compactés. Aucun échauffement n'a été constaté sur le site lors de notre visite.



Figure 18 : Remodelage du terril Warny-Las en 2024

- Le cas du traitement du terril Dębieńsko, situé à Czerwionka-Leszczuny, permet d'illustrer qu'un démantèlement d'un terril, peut également permettre la valorisation des matériaux extraits (Figure 19). En effet, Le matériau chaud qui est extrait est humidifié pour le refroidir, puis on procède à la récupération du charbon et au criblage des stériles (Figure 19) pour créer des remblais routiers : 2,5 Mt ont déjà été utilisées sous forme de remblais routiers (à raison de 1000-2000 t/jour) et, en 2023, 160 kt ont permis de remblayer d'anciens vides miniers. Les déchets restant servent à l'édification d'un nouveau terril plat à l'emplacement de l'actuel bassin de retour des eaux de process chargées en particules fines. Après drainage de ce bassin, ces matériaux fins constitueront la base du futur terril en limitant les entrées d'air. Les eaux de ruissellement issues du terril sont récupérées mais la végétalisation des pentes après leur recouvrement par de la terre devrait limiter le ravinement constaté. Une attention particulière est portée au respect d'une pente de 4:1 qui correspondrait à la limite maximale pour que le ruissellement des eaux de pluie ne crée pas de désordres. Il existe également une digue de rétention des eaux de ruissellement et, depuis 2003, un réseau de piézomètres autour du site, lequel se trouve à quelques centaines de mètres d'un quartier résidentiel.
- À ce jour, 27 millions de tonnes de matériaux ont été ainsi été soumis au recyclage. Le site devrait être ensuite revalorisé avec notamment la création d'un complexe sportif et d'une centrale solaire, si les démarches administratives aboutissent. Une baisse des températures a déjà été constatée. Environ 50 personnes travaillent sur ce site et le coût du traitement est autofinancé par la vente du charbon et des matériaux de remblai.



Figure 19 : Bassin de récupération des eaux de traitement et remodelage du terril Dębieńsko



Figure 20 : Remodelage du terril Dębieńsko Centrale de tri des stériles miniers

- Le démantèlement d'un terril peut également se faire en l'absence de combustion, comme c'est le cas pour le terril CSA, situé à proximité de Karvina, qui est démantelé pour extraire des matériaux réutilisables, l'aplanir et le compacter. Ses matériaux constitutifs sont peu à peu récupérés puis criblés (en trois fractions granulométriques) et, une fois séparés des restes de charbon, ils servent comme remblai routier et pour le comblement des deux puits de mine encore ouverts.

3.4 Par aspersion de liquides

3.4.1 Arrosage intensif

Lorsqu'un terril entre en combustion, les services de lutte contre l'incendie sont souvent les premiers intervenants car ils disposent de moyens lourds capables d'éteindre des feux classiques. La première solution envisagée est généralement d'arroser les zones en combustion avec de l'eau ou un produit aqueux. Harrington et Heast (1948) font remarquer dès 1948 que même un arrosage de plusieurs milliers de m³ d'eau n'aboutirait pas forcément à l'extinction, même temporaire, du feu (exemple : Pennsylvanie). Cette méthode s'est généralement avérée inefficace, à l'exception de petits terrils, voire surtout être un facteur aggravant en raison notamment de la formation de gaz à l'eau⁴, explosif et inflammable, ou du risque d'explosion de poches de vapeur d'eau (Ciesielczuk, 2015 ; IMTE, 2006). Dans les cas où l'arrosage parvient à éteindre une zone, le feu reprend souvent à proximité, probablement parce que l'eau contribue à oxyder le charbon et qu'elle érode les particules fines à la surface du terril, décolmatant les fissures et permettant à l'air de mieux pénétrer dans le matériau. Plusieurs mines sont ainsi obligées d'éteindre chaque année les feux des terrils qui ont été arrosés (Harrington et Heast, 1948).

Ainsi, la tentative d'extinction du terril du Mont Ricateau, près d'Alès (Gard), par de tels moyens a été un échec en 2004 : entré en combustion à la suite d'un incendie de forêt, on a profité de la présence des bombardiers d'eau venus éteindre cet incendie pour traiter le terril en combustion en y effectuant 60 largages d'eau (Figure 21), mais sans succès (ARIA, 2004).



Figure 21 : Tentative d'extinction du terril en combustion de Rochebelle (Gard) à l'aide de bombardiers d'eau⁴

⁴ Le gaz à l'eau est un gaz de synthèse produit par une réaction endothermique de l'eau sur du charbon ou du coke incandescent, contenant du monoxyde de carbone et du dihydrogène.

On note toutefois deux exemples positifs d'usage massif d'eau en Pennsylvanie (Etats-Unis) :

- l'un concernait un projet de démonstration du Bureau des Mines de Pennsylvanie qui a consisté à utiliser une batterie de canons à eau à haute pression pour déloger les résidus chauds, afin de pouvoir les transporter hors du terril à l'aide d'un bulldozer vers un site d'élimination adjacent où d'autres canons à eau ont permis de les refroidir avant de les compacter (McNay, 1971) (NB : dans ce cas l'effet dynamique des jets d'eau, en déplaçant les matériaux, a probablement plus contribué au succès de l'extinction, que l'apport d'eau seul) ;
- l'autre, près de Scranton, concernait un test original réalisé en 1970 sur un terril en combustion dont le sommet avait déjà été recouvert par un matériau imperméable lors d'une précédente tentative d'extinction ; ce plateau sommital a alors été remodelé en « rizières » par création d'une digue périphérique et de 6 casiers qui ont été inondés pendant un mois ; cela a permis de refroidir suffisamment les résidus immédiatement sous-jacents pour permettre leur dragage, casier par casier, toujours sous l'eau, jusqu'à l'arasement complet du terril (Figure 22).



Figure 22 : Traitement en rizières d'un terril de charbon en combustion (McNay, 1971)

3.4.2 Pulvérisation d'eau

En revanche, la pulvérisation d'eau (pluie fine ou brouillard) pourrait être efficace pour éteindre les terrils en feu (Harrington et Heast, 1948), à condition de pulvériser de l'eau sur la totalité du terril et sans perturber sa structure de surface, sinon des courants d'air peuvent se former et raviver localement le feu. L'objectif est en effet de refroidir la surface (éventuellement pour permettre la circulation d'engins) et d'y former peu à peu une croûte étanche à l'air, sans apporter de l'eau en profondeur afin d'éviter d'entretenir l'échauffement ou la combustion. Cette pulvérisation ne doit jamais cesser jusqu'à l'extinction totale du feu, « pas même un seul jour sous peine de ruiner les efforts des jours précédents » selon les auteurs. En 1942, après plus d'un an de tests sur les terrils en combustion de Grande-Bretagne, le protocole a donné de bons résultats, contrairement aux injections d'eau dans des trous ou des tranchées.

En 1968, à Scranton (Pennsylvanie), le Bureau des Mines a mené un nouveau projet de démonstration qui a été considéré comme une étape vers la mise au point d'un procédé efficace et peu coûteux d'extinction des terrils de charbon en combustion (McNay, 1971). Il utilisait une combinaison de canons à eau et d'équipements de terrassement :

- une batterie de canons à eau à haute pression pour tremper et déloger les résidus chauds puis les amener hors du site ;
- l'utilisation d'un bulldozer pour pousser les résidus refroidis vers un site d'élimination adjacent ;
- l'utilisation de canons à eau pour refroidir encore ces résidus.

En outre, un système d'arrosage à l'eau a été testé sur une zone pendant une nuit afin de réduire les températures de surface et de permettre le déplacement des véhicules à pneus en caoutchouc sur le site du projet le lendemain. Un bulldozer équipé d'un ripper a ainsi pu être utilisé pour détacher les blocs de charbon refroidis afin de faciliter leur transport par un tracteur-racleur. Ces résidus ont été déplacés vers une zone adjacente, compactés par le mouvement du tracteur-racleur et recouverts d'un matériau non combustible. Des sondages réalisés dans ce nouveau stockage de matériaux refroidis n'a pas montré de reprise d'échauffement.

Selon IMTE (2006), l'eau ne peut pas être utilisée systématiquement à cause du risque d'explosion de vapeur. Elle doit être utilisée avec précaution et à une certaine distance pour assurer la sécurité.

Des tests d'extinction ont été réalisés en laboratoire en 2009 sur des récipients remplis de blocs de charbon (Hadden et Rein, 2011). Après avoir initié la combustion à l'aide d'une résistance électrique, trois essais d'extinction ont été réalisés en apportant de l'eau au moyen d'un tuyau, d'une pomme de douche ou d'un pulvériseur (Figure 23) :

- le tuyau d'eau prend trois fois plus de temps et consomme 80 % d'eau en plus pour parvenir au même résultat d'extinction, à cause de la concentration de l'écoulement d'eau le long de des chemins préférentiels ;
- la pomme de douche réduit ce problème en appliquant l'eau sur une plus vaste surface mais le débit d'eau reste important et il se crée encore des chemins préférentiels ;
- le pulvériseur a une action plus uniforme et crée en outre un écoulement plus lent ; il s'agit de la méthode la plus efficace sur le plan de la quantité d'eau consommée pour éteindre la combustion.

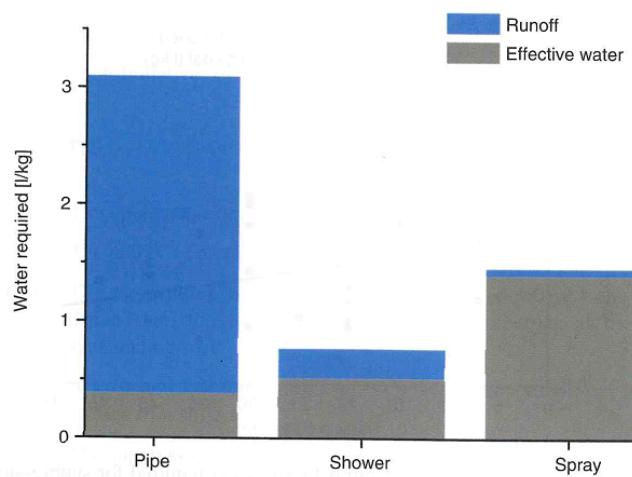


Figure 23. Comparaison des quantités d'eau utilisées pour éteindre du charbon en combustion en laboratoire selon trois méthodes d'extinction (Hadden et Rein, 2011)

Aux Etats-Unis, le service de Pennsylvanie pour la remise en état des mines abandonnées (PBAMR) a payé 2,2 M\$ pour éteindre le feu d'un terril de 30 m de hauteur et de 1,6 ha près de Simpson (Gibbons, 2014). Il a fallu 6 mois pour l'éteindre, des milliers de m³ d'eau et des dizaines de m³ de mousse.

Toujours en Pennsylvanie, la fumée et l'odeur d'un terril d'anthracite en feu ont atteint Simpson, Carbondale et d'autres parties du comté de Lackawanna en 2014 (TAP, 2019). Pendant des mois, des ouvriers ont pulvérisé quotidiennement environ 6 000 m³ d'eau sur ce terril, pendant qu'une pelleteuse ramassait les résidus en combustion, mais sans réussir à éteindre le feu.

3.4.3 Retour d'expérience européen

Aucun exemple d'arrosage intensif ni de pulvérisation d'eau d'un terril en combustion n'a pu être observé en Pologne ou en République Tchèque au cours de la mission de terrain de l'Ineris réalisée en 2024.

3.5 Étouffement par injection de fluides

Cette méthode consiste à injecter en profondeur dans le terril, via des sondages, un matériau fluide dans le but de combler les crevasses et les vides, et de réduire l'accès à l'air des zones en combustion. Il peut s'agir d'un coulis d'eau et de cendres, de silicates ou de carbonates, ou encore de matériaux plus élaborés (produits chlorés, phosphates, polymère, composés soufrés, aniline, phénol, borax, urée...).

3.5.1 Par injection d'eau

Un rapport de 1942, cité par Harrington et Heast (1948), explique que les essais réalisés en injectant de l'eau dans des trous ou des tranchées ont conduit à l'extinction temporaire des feux puis à leur reprise ultérieure avec plus de vigueur (probablement en raison de l'hydratation exothermique du charbon). Corey et al. (1956) signalent que l'injection d'eau n'a qu'un intérêt limité dans l'extinction de ce type de feux.

Dans l'Ohio (Harrington et Heast (1948)), le feu d'un terril de 30 m de hauteur et 400 m de longueur a été éteint avec succès grâce à de l'eau injectée dans des trous creusés de 1,5 m de profondeur ; l'eau était injectée 16 h/jour pendant 6 mois.

En 1963-1964, aux Etats-Unis, le Bureau des Mines a réalisé la démonstration expérimentale de trois procédures d'extinction de terrils de charbon en feu (McNay, 1971) : l'aspersion d'eau à la surface du terril, l'injection d'eau dans un réseau de 125 trous de forage non tubés de 3 m de profondeur (permettant d'obtenir une pénétration plus profonde de l'eau), et l'injection d'eau par des forages tubés également implantés à 3 m dans le terril. Le débit d'eau utilisé était à chaque fois équivalente à 6 mm de pluie par heure. Ces trois techniques ont donné à peu près la même réduction de température à 3 m de profondeur mais aucune réduction observable à 6 m. Trois mois après l'arrêt du projet, peu ou pas de traces d'incendie ont été observées à la surface des terrils alors que les températures à 3 m de profondeur étaient aussi élevées voire plus que celle observées avant l'application de l'eau.

Dans le cas de la combustion de la décharge municipale abandonnée à Katowice-Wełnowiec (voir chapitre 3.1.2.1), avant de procéder à son recouvrement, on avait tenté de l'éteindre en creusant des sondages pour refroidir les matériaux en combustion. Cette opération avait au contraire apporté de l'oxygène et intensifié la combustion.

En France, dans le bassin minier du Nord – Pas de Calais, le terril n°76 d'Avion (Hauts-de-France) est en combustion depuis 1987 et de l'eau y est injectée pendant la saison chaude, par pompage dans la nappe phréatique, au débit de 120 m³/jour (Masalehdani et Potvin, 2004). Cette injection d'eau aurait permis de contrôler la combustion du terril et ainsi permettre son exploitation pour des granulats routiers entre 1993 et 2018. Il aurait ainsi été complètement démantelé.

3.5.2 Par injection d'autres liquides

3.5.2.1 Généralités

Dès 1948, Harrington et Heast proposent une nouvelle méthode qui consiste à injecter une boue minérale ou du coulis de ciment via des forages. Ils citent quelques résultats obtenus :

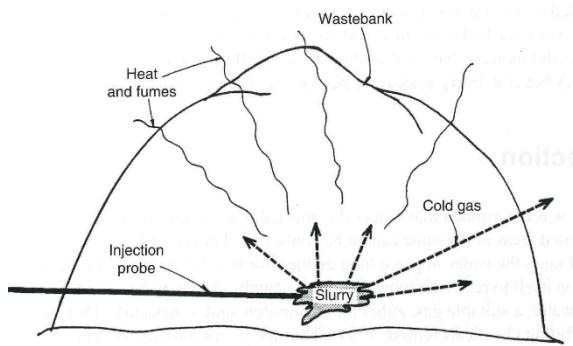
- aux Etats-Unis, 26 t de coulis de poussière de calcaire ont été injectées dans un forage de 50 m de profondeur mais une excavation postérieure a montré que cela n'avait pénétré que sur environ 2 m de distance dans un premier essai, et 5 m environ lors d'un second essai ;
- en Angleterre, un terril en feu a été traité par l'injection d'un coulis du même type à travers des tubes de 3" allant jusqu'à 2 m de profondeur : il a ainsi été injecté entre 45 kg et 20 t de coulis par sondage, ce qui a permis d'éteindre une grande partie du feu en 3 mois ;

Cependant, Harrington et Heast (1948) signalent que cette même technique employée sur d'autres sites n'a pas eu de succès. Il a même été imaginé de prérenniser le système en creusant des tranchées à la surface du terril et en les remplissant fréquemment d'eau afin qu'elle s'infiltre.

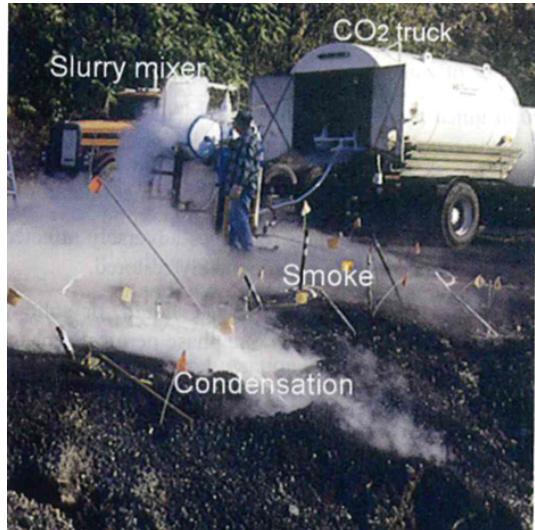
Vers 1996, un test d'extinction par de la mousse de polyuréthane a été réalisé dans l'US Bureau of Mines de Lake Lynn (Pennsylvanie, Etats-Unis) sur un tas de 1,8 m³ de résidus houillers (Kim, 2011). Un tube de 1" a servi à injecter de la mousse au centre du bloc mais celle-ci a suivi un chemin préférentiel à l'interface tube-résidus et sa dispersion au sein du bloc a été limitée. D'autres tests de laboratoire ont montré qu'en injectant d'abord de la mousse on aurait pu créer une barrière pour mieux contrôler la dispersion de la mousse extinctrice.

Le même laboratoire a également testé l'injection d'une « boue cryogénique » renfermant des cristaux de CO₂ solide dans de l'azote liquide, plutôt que de l'azote liquide pur qui reste trop longtemps liquide et finit par couler au bas du terril (Kim, 2011). Injectée dans un terril en feu, cette boue cryogénique devrait se vaporiser ou se sublimer en absorbant la chaleur et en émettant du CO₂ gazeux qui devrait interner la combustion. C'est ce qui a été réalisé dans le terril de Midvale (Ohio, Etats-Unis) vers 2004 où il a été employé 1140 kg de CO₂ et 4600 kg d'azote liquide (Figure 24). La température près du point d'injection a baissé puis est remontée à sa valeur initiale au bout de 4 mois. Il semble que

les gaz chauds de combustion se soient déplacés suite à l'injection et soient allés allumer la combustion dans des zones adjacentes. Cependant, un an après l'expérience, les températures étaient globalement plus faibles en profondeur bien que le feu couve encore.



a) Schéma de principe



b) Test dans le terril de Midvale (Ohio, Etats-Unis)

Figure 24 : Injection de boue cryogénique $\text{CO}_2\text{-N}_2$ dans un terril en combustion (Kim, 2011)

En Allemagne, 7 terrils en combustion ont été traités par l'injection de coulis de ciment et/ou d'anhydrite (Sinha et Singh, 2005). De même, à Brymbo (cf. chapitre 3.2 et 3.3), on a créé un rideau de 111 forages remplis d'un coulis de ciment et de cendres volantes injecté sous pression (à raison de 1 à 3 t par trou, soit un total de 145 t). Ces injections ont permis de ralentir la propagation de la combustion, mais celle-ci n'a pas été complètement stoppée.

Yong-Liang et al. (2012) font état de la création et de l'utilisation d'un nouveau matériau composé de sables en suspension, d'un gel minéral inorganique, d'un polymère organique et d'un dispersant, afin de traiter les importants incendies de mines de charbon du nord-ouest de la Chine. Dans cette région, la pénurie d'eau et de lœss nécessite en effet, pour les éteindre, un coût important en coulis de scellement conventionnel. Afin d'améliorer la qualité du coulis d'injection et de réduire le gaspillage d'eau, un colloïde en suspension dans le sable a été testé. Ce nouveau matériau réduit l'oxydation du charbon au-dessus de sa température critique en augmentant son énergie d'activation, réduisant ainsi la teneur en CO et C_2H_4 inflammables, et supprimant la combustion spontanée du charbon.

Plusieurs additifs ont été testés sur des feux de mine de charbon de par le monde. Une étude bibliographique menée par l'Ineris (Velly et Pokryszka, 2001) avait permis d'identifier cinq familles principales de produits antipyrogènes efficaces (les silicates, les produits chlorés, les phosphates, les carbonates et les composés soufrés) plus divers autres composés (l'aniline, le phénol, le borax, l'urée). Il a été difficile d'établir une hiérarchie exhaustive entre ces produits, compte tenu de la diversité des charbons étudiés et des méthodes et paramètres utilisés pour tester l'efficacité des produits.

3.5.2.2 Retour d'expérience européen

A Bytom, l'injection de coulis à faible profondeur, pour tenter d'isoler le charbon de l'air, a été localement positive mais le feu a fini par migrer plus loin.

Au terril Heřmanice, l'injection de coulis par forage en bordure du sommet du terril (Figure 25) était en cours de réalisation lors des visites de 2024. Ces injections ont pour objectif de consolider la zone en auto-combustion du terril et ainsi éviter d'éventuels glissements de terrain. La consolidation des bordures du terril permet également de limiter l'apparition de fractures, qui pourraient favoriser les apports en oxygène et donc l'échauffement du terril.

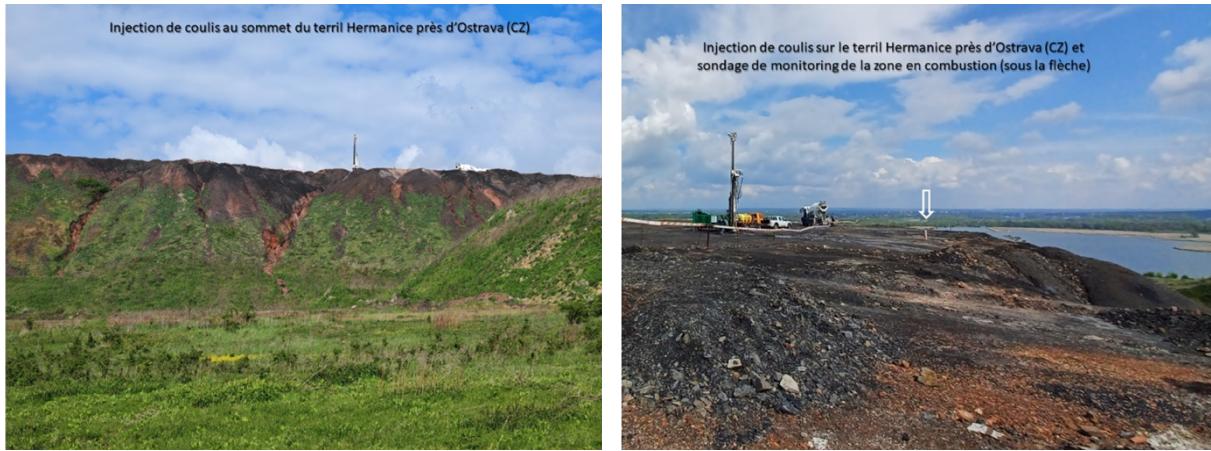


Figure 25 : *Injection de coulis au droit d'une zone en combustion en 2024*

3.5.3 Par inertage au gaz

3.5.3.1 Généralités

Pour Nalbandian (2010) qui a étudié les feux de blocs de charbon entassés dans un silo, l'inertage au CO₂ est une technique largement utilisée pour prévenir les incendies suspects en milieu confiné (silos ou sous-sol). Le CO₂ est stocké sous forme liquide puis vaporisé. On pousse ensuite la vapeur de CO₂ à travers le charbon afin d'atteindre son niveau d'adsorption et de remplir tous les espaces vides entre les particules de charbon, réduisant ainsi l'oxygène disponible pour le feu à presque zéro. À un moment donné, la production de chaleur par oxydation sera inférieure à la perte de chaleur par conduction et la masse brûlante se refroidira. En maintenant cette condition suffisamment longtemps, on peut éteindre l'incendie.

3.5.3.2 Retour d'expérience européen

Dans le cadre du traitement du terril de Skalny, l'injection de CO₂ liquide via des forages a été réalisée jusqu'à 3 m de profondeur car, d'après l'ancien directeur de la mine correspondante, c'est la profondeur à laquelle les variations de la pression atmosphérique peuvent faire pénétrer l'air en périodes de hautes pressions. L'efficacité de cette mesure reste toutefois difficile à évaluer à Skalny, où plusieurs autres traitements de grandes envergures (remodelage, recouvrement par des matériaux inertes, ...) ont été réalisés concomitamment.

3.6 Surveillance et restrictions d'accès

3.6.1 Généralités

Un terril présentant un risque de combustion constitue un danger pour toute personne marchant à sa surface. En effet, la température de surface peut être difficile à appréhender sans capteur thermique et la température à quelques centimètres de profondeur, sous une croûte superficielle, peut parfois atteindre plusieurs centaines de degrés. Les terrils en combustion émettent aussi des gaz toxiques (CO, CH₄, mercure, fluoranthène, ...), dont certains sont dépourvus d'odeur.

Une surveillance instrumentée ou périodique du terril permet de détecter tout échauffement du terril et, le cas échéant, adapter la gestion du site. Ainsi, si un échauffement est détecté la mitigation des risques corporels pourrait reposer, en première mesure, sur l'interdiction d'accéder au site.

En France, par exemple, la plupart des terrils présentant un aléa fort de combustion sont interdits d'accès et leurs périmètres sont sécurisés. Cette sécurisation résulte d'une succession d'étapes : une étude d'aléas combustion, pour évaluer l'intensité de l'aléa (à partir du volume du terril, de sa granulométrie, du pourcentage de charbon, ...) et sa probabilité d'occurrence puis des recommandations de gestion en accord avec les autorités locales et l'administration.

3.6.2 Retour d'expérience européen

Les visites de terrils effectués entre le 23 et le 25 avril 2024 (paragraphes 2.2) ont permis d'identifier différentes approches relativement à la surveillance et aux restrictions d'accès aux terrils en Europe :

- En Moldavie-Silésie (région de République Tchèque), le suivi des quatre terrils thermiquement actifs se fait par thermographie par drone, avec des contrôles terrestres à l'aide d'images infrarouges. Ils réalisent également des études photogrammétriques et de l'analyse d'images par drone pour définir un index de végétation, permettant de donner une information sur un éventuel échauffement du terril. Les terrils sont également monitorés à distance (Figure 26b) : température, humidité relative, gaz (CO, CH₄, ...), poussières, pluviométrie, accéléromètre, dynamomètre/tiltmètre⁵... Cependant, la durée de vie des capteurs n'est que de quelques années du fait des conditions extrêmes (pH<2, température jusqu'à 300°C). D'après leurs mesures réalisées in situ, les processus d'oxydation du charbon seraient actifs jusqu'à 10 m de profondeur. Les secteurs les plus dangereux sont grillagés pour en interdire l'accès (Figure 26b) et des événements peuvent être réalisés afin de « contrôler » les émissions de gaz toxiques.



Figure 26 : Mesures de surveillance et de restrictions d'accès en République Tchèque en 2024
(a : monitoring en sondage de la zone en combustion ; b : Grillage et barbelés pour sécuriser une zone thermiquement active sur le terril d'Ema)

- En Pologne, malgré les odeurs très désagréables des fumerolles et les panneaux de prévention, des personnes accèdent tout de même à certains terrils en combustion (présence d'un squatter installé dans une cabane de fortune sur le grand terril de Bytom, par exemple).

3.7 Autres méthodes

On citera ici pour mémoire quelques autres modes de gestion de terril en combustion qui ont eu un certain succès :

- isoler les flancs du terril avec ensemencement de la végétation (Gogola et al., 2020, China, 2013, Paquette et al., 2002) ;
- favoriser la combustion des terrils pour une éventuelle utilisation de la chaleur produite (Nguyen, 2025). *Cette méthode n'est à employer qu'en « dernier ressort », après l'échec des méthodes précédentes, car elle consiste à laisser brûler le terril tout en maîtrisant les gaz et fumées émis.*

⁵ un tiltmètre est un instrument de métrologie utilisé pour mesurer les variations de l'horizontalité, que ce soit le sol ou une structure artificielle

3.8 Synthèse des principales méthodes de mitigation

Le Tableau 2 synthétise les principales méthodes de mitigation identifiées lors des travaux bibliographiques et des visites de site en Pologne et en République Tchèque.

Tableau 2. Méthodes de gestion et de mitigation des terrils en combustion

Méthode	Pays	Référence	Observés lors des visites de sites Pologne et en République Tchèque
Recouvrement / Encapsulation du terril avec des matériaux ininflammables ou antipyrogéniques	Pologne, Chine, Afrique du Sud, Etats-Unis, Royaume-Uni, Chine, Inde, Espagne, Pologne, France	Ciesielczuk (2015), Zhai et al. (2017), China (2013), Akinshipe et Kornelius (2017), Gogola et al. (2020), Harrington et Heast (1948), McNay (1971), Donnelly et Bell (2011), Querol et al. (2011), Mahananda (2014), Zeyang et al. (2014), Shenghua et al. (2014), Paquette et al. (2002)	Oui (notamment en combinaison avec d'autres traitements), cf. § 3.1.2
Isolation des parties en feu par creusement de tranchées, éventuellement remplies d'un coulis	Pologne, Chine, Royaume-Uni, Etats-Unis	Ciesielczuk (2015), Zhai et al. (2017), Gogola et al. (2020), Nichol et Tovey (1998), Harrington et Heast (1948), Richards et al. (1993), Paquette et Degas (2016)	Oui (notamment en combinaison avec d'autres traitements) cf. § 3.2.2
Mise à nu des zones en combustion (défournement) ou démantèlement complet du terril	Pologne, Chine, Afrique du Sud, Etats-Unis, Royaume-Uni, France	Ciesielczuk (2015), China (2013), Akinshipe et Kornelius (2017), Gogola et al. (2020), Harrington et Heast (1948), Nichol et Tovey (1998), Donnelly et Bell (2011), Misz-Kennan et al. (2015b)	Oui (notamment en combinaison avec d'autres traitements) cf. § 3.3.2
Déplacement des matériaux en combustion et compactage sur un nouveau site	Royaume-Uni, Etats-Unis, Chine	Nichol et Tovey (1998), McNay (1971), Donnelly et Bell (2011), Querol et al. (2011)	Oui (notamment en combinaison avec d'autres traitements) cf. § 3.3.2
Injection profonde d'un coulis en forages	Pologne, Chine, Afrique du Sud, Royaume-Uni, Etats-Unis, Allemagne, France	Ciesielczuk (2015), Zhai et al. (2017), China (2013), Akinshipe et Kornelius (2017), Gogola et al. (2020), Nichol et Tovey (1998), McNay (1971), Harrington et Heast (1948), Sinha et Singh (2005), Yong-Liang et al. (2012), Velly et Pokryszka (2001)	Oui (notamment en combinaison avec d'autres traitements) cf. § 3.5.2.2
Aspersion/Pulvérisation d'eau à la surface du terril	Afrique du Sud, Royaume-Uni, Etats-Unis	Akinshipe et Kornelius (2017), Nichol et Tovey (1998), McNay (1971), Harrington et Heast (1948), Hadden et Rein (2011)	Non
Refroidissement/Inertage avec des gaz inertes (CO ₂)	Pologne	Gogola et al. (2020), Nalbandian (2010)	Oui (notamment en combinaison avec d'autres traitements) cf. § 3.5.3.2
Surveillance et restrictions d'accès			Oui (notamment en combinaison avec d'autres traitements)
Isolation des flancs du terril	Pologne, Chine, France	Gogola et al. (2020), China (2013), Paquette et al. (2002)	
Brûlage contrôlé des terrils par post-combustion	Pologne, Chine	Ciesielczuk (2015), Gogola et al. (2020), Misz-Kennan et Tabor (2015)	

4 Conclusions

L'auto-échauffement des terrils est un processus physico-chimique qui dépend de nombreux paramètres (volume de matériaux, géométrie du terril, granulométrie, composition, ...) et dont le traitement est généralement couteux, complexe voire incertain. Un terril, sans traitement adéquat, peut entrer et rester en combustion pendant plusieurs décennies et ainsi générer des risques importants (toxicité des fumées, pollution, risques corporels, mouvements de terrains, ...).

Des méthodes de gestion et de mitigation peuvent, voire doivent, alors être mises en place sur ces terrils en combustion. Ces méthodes ont été décrites sur la base d'une étude bibliographique et de visites de sites en Pologne et en République Tchèque, les principaux éléments marquants à retenir sont :

- La surveillance (visuelle, monitoring et/ou satellitaires) et les restrictions d'accès sont les mesures les plus simples à mettre en place. Elles peuvent même être suffisantes dans le cas d'échauffements modérés (si par exemple la quantité de charbon résiduel dans le terril est faible) ou après la phase critique de combustion (si par exemple celle-ci a été favorisée).
- Des méthodes de mitigation plus élaborées peuvent être mises en œuvre. Le succès et l'atteinte des objectifs d'extinction de ces phénomènes de combustion de terril requiert le plus souvent :
 - de mettre en œuvre et de combiner plusieurs méthodes différentes de mitigation. L'exemple du terril Skalny, en Pologne, illustre parfaitement ce point ;
 - même après l'arrêt de la combustion, de poursuivre un entretien et un suivi du site pour s'assurer de l'absence de reprise de l'auto-échauffement.
- Le recouvrement de terril par des matériaux inertes peut contribuer à la mitigation des combustions de terrils sous réserve :
 - d'une épaisseur suffisante dépendant de nombreuses spécificités (nature des matériaux, températures des terrains, pentes...) mais généralement d'au moins 1 m ;
 - d'une mise en place très rigoureuse ;
 - d'une gestion efficace des crevasses / fissures / craquelures de cette couverture (à la faveur des précipitations, de sécheresse, de mouvements de terrain ou de glissement...) par un entretien régulier.
- L'isolation des parties en feu d'un terril peut être réalisée en creusant des tranchées, éventuellement remplies d'un coulis ou de matériaux inertes, mais leur efficacité dépend de leur dimensionnement (au moins 1 à 2 m d'épaisseur et plus de 3 m de profondeur).
- Des traitements plus simples peuvent être mis en œuvre notamment pour des petits terrils (ou des parties de terrils isolées), comme leur démantèlement / défournement, accompagné de différents traitements de type refroidissement par pulvérisation d'eau, incorporation de matériaux inertes ou encore compactage.
- Dans certains cas, l'injection d'eau peut aider à abaisser la température d'un terril, mais le nombre de cas où cela s'est avéré contre-productif semble important.
- La possibilité d'utiliser la chaleur de l'auto-échauffement d'un terril peut être étudiée dans certains cas (Nguyen, 2025), si les risques associés sont faibles (phase de combustion stabilisée) et en présence d'utilisateurs à proximité. Dans d'autres cas, la valorisation des matériaux constitutifs du terril en échauffement pourrait s'envisager, mais les contraintes associées restent importantes (responsabilité du site après exploitation, risque d'emballement de la réaction d'oxydation, ...).

On rappellera pour finir qu'en terme de taux de succès et de méthode ou de condition de mise en œuvre, les travaux de mitigation des combustions de terrils sont très variables, et qu'ils restent fortement « site dépendant ». Ainsi, sur les 10 terrils en combustion observés lors des visites de sites en Pologne et en République Tchèque, au moins 8 auraient subi des tentatives de traitement, mais celles-ci auraient été complètement efficaces pour seulement 3 terrils (Bytom, Warny-Las et Skalny). Ces traitements efficaces consistent principalement à remodeler le terril et à la recouvrir de matériaux inertes et compactés.

5 Références

- Aditya RLS, 2015. Man made disasters-coal fire. TMBA/13-06: 28 p.
- Akinshipe O, Kornelius G, 2017. The quantification of atmospheric emissions from complex configuration sources using reverse dispersion modelling. International journal of Environmental Science and Technology · March 2017, DOI: 10.1007/s13762-017-1316-0.
- ARIPPA, 2015. Coal Refuse. <https://environmental.pasenategop.com/wp-content/uploads/sites/34/2015/06/Brisini-Testimony3.pdf> (consulté le 29/01/2024).
- Carpenter D, 2016. Spontaneous Combustion: A History of Coal Pile Maintenance. <https://blog.midwestind.com/spontaneous-combustion-coal-pile-maintenance/> (consulté le 29/01/2024).
- Chalekode PK, Blackwood TR, 1978. Source Assessment: Coal Refuse Piles, Abandoned Mines and Outcrops, State of the art. EPA-600/2-78-004v, July 1978: 52 p.
- China, 2013. Waste dump extinguishing method. Patent CN102500077A, <https://patents.google.com/patent/CN102500077A/en> (consulté le 25/01/2024).
- Ciesielczuk, 2014. The cause and progress of the endogenous coal fire in the remediated landfill in the city of Katowice, 10p.
- Ciesielczuk J, 2015. Coal Mining and Waste Dumps in Poland. In: Coal and Peat Fires: A Global Perspective, 3/16: Case Studies – Coal Fires: 463-473, Edited by Glenn B. Stracher, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59509-6.00016-8>.
- Donnelly LJ, Bell FG, 2011. Geotechnical and environmental problems: coal and spontaneous combustion. In: Coal and Peat Fires: A Global Perspective (GB Stracher, A Prakash and EV Sokol, editors), 1/5: Coal - Geology and combustion: 584-100.
- Evanno S, 2005. Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA 35) - Connaissance des phénomènes d'auto-échauffement des solides combustibles. Rapport d'étude INERIS DRA-2005-46055, 111 p.
- Gogola K, Rogala T, Magdziarczyk M, Smolinski A, 2020. The Mechanisms of Endogenous Fires Occurring in Extractive Waste Dumping Facilities. Sustainability 2020, 12, 2856; doi:10.3390/su12072856.
- Gombert, 2023. Rapport Etat des lieux à l'international de la problématique des échauffements de terrils. Ineris - 206841 - v2.0.
- Hadden R, Rein G, 2011. Burning and water suppression of smoldering coal fires in small-scale laboratory experiments. In: Coal and Peat Fires: A Global Perspective, 1/18: Coal - Geology and combustion: 317-326, Edited by Glenn B. Stracher, Anupma Prakash and Ellina V. Sokol.
- Harrington D, Heast Jr. JH, 1948. Burning refuse dumps at coal mines. United States Department of the Interior, Bureau of Mines, Information Circular IC 7439, March 1948, 28 p., <https://books.google.fr/books?id=kYiDIKVd7DcC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false> (consulté le 25/01/2024).
- IMC, 2016. Coal stockpile spontaneous combustion early detection. <https://www.imcontrol.com.au/white-papers/coal-stockpile-combust/> (consulté le 29/01/2024).
- Leitch R.D, 1940. Some information on extinguishing an anthracite refuse-bank fire near Mahanoy City, Pennsylvania — Technical Report, U.S. Bureau of Mines, <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015078534628&seq=3>.
- Liu Y, Qi X, Luo D, Zhang Y, Qin J, 2023. Detection of Spontaneous Combustion Areas of Coal Gangue Dumps and Comprehensive Governance Technologies: A Case Study. ACS Omega. 2023 Dec 8; 8/50: 47690-47700, doi: 10.1021/acsomega.3c05942.
- Mahananda AR, 2014. Studies on spontaneous heating liability of some Indian coals and its protective measures. Thesis of Master of Technology, Department of Mining Engineering, National Institute of Technology, Rourkela-769008, 1189 p.
- McNay LM, 1971. Coal Refuse Fires, An Environmental Hazard. U.S. Bureau of Mines, Information Circular 8515, 38 p.

- Misz-Kennan M, Gardocki, Tabor, Magdalena MA, 2015b. Fire Prevention in Coal Waste Dumps: Exemplified by the Rymer Cones, Upper Silesian Coal Basin, Poland. In: Coal and Peat Fires, Chapter 13, 2015: 349-385, doi: 10.1016/B978-0-444-59509-6.00013-2.
- Misz-Kennan M, Tabor MA, 2015. The Thermal History of Select Coal-Waste Dumps in the Upper Silesian Coal Basin, Poland. In Coal and Peat Fires, Chapter 15, 2015: 431-462, DOI: 10.1016/B978-0-444-59509-6.00015-6.
- Nalbandian H, 2010. Propensity of coal to self-heat. IEA Clean Coal Centre, CCC/172, Oct. 2010, 47 p.
- Nguyen P. M. V., 2025. A Review of the Impact of Spontaneous Combustion on Slope Stability in Coal Mine Waste Dumps. *Applied Sciences*, 15(13), 7138. <https://doi.org/10.3390/app15137138>.
- Nichol D, Tovey NP, 1998. Remediation and monitoring of a burning coal refuse bank affecting the Southsea Looproad at Brymbo, North Wales. *Engineering Geology* 50 (1998): 309-318.
- NRW, 2017. Fire Prevention & Mitigation Plan Guidance – Waste Management. Guidance Note 16. Published by: Natural Resources Wales, 39 p.
- Paquette Y, Degas M, 2016. La combustion des dépôts houillers en France : mécanismes, risques environnementaux, méthodes d'investigation et d'analyse, moyens de lutte. Journée d'étude "Les terrils", Nov 2016, Namur, Belgique.
- Paquette Y, Tuleweit C, Audouin M, Lac C, 2002. Traitement d'un terril en combustion par confinement. Industrie minérale - Environnement, 2002 : 8-12.
- Pertile E, Dvorský T, Václavík V, Syrová L, Charvát J, Máčalová K, Balcařík L, 2023. The Use of Construction Waste to Remediate a Thermally Active Spoil Heap. *Applied Sciences*. 2023; 13(12):7123. <https://doi.org/10.3390/app13127123>.
- Phenrat T, 2020. Community Citizen Science for Risk Management of a Spontaneously Combusting Coal-Mine Waste Heap in Ban Chaung, Dawei District, Myanmar. *GeoHealth*, 3: 16 p., <https://doi.org/10.1029/2020GH000249>.
- Phillips H, Uludag S, Chabedi K, 2009. Prevention and control of spontaneous combustion. Best Practice Guidelines for Surface Coal Mines in South Africa. COALTECH Report: 129 p.
- Post S, 2014. Plusieurs dizaines de terrils continuent de brûler en France ; <https://sylvain-post.blogspot.com/2012/10/echauffements-de-schistiers-plusieurs.html> (consulté en 2024).
- POWER, 2013. Fire Protection Guidelines for Handling and Storing PRB Coal. <https://www.powermag.com/fire-protection-guidelines-for-handling-and-storing-prb-coal/> (consulté le 29/01/2024).
- POWER, 2016. The Coal Refuse Dilemma: Burning Coal for Environmental Benefits. <https://www.powermag.com/coal-refuse-dilemma-burning-coal-environmental-benefits/> (consulté le 29/01/2024).
- Querol X, Zhuang X, Font O, Izquierdo M, Alastuey A, Castro I, van Drooge BL, Moreno T, Grimalt JO, Elvira J, Cabañas M, Bartroli R., Hower JC, Ayora C, Plana F, López-Soler A, 2011. Influence of soil cover on reducing the environmental impact of spontaneous coal combustion in coal waste gob: A review and new experimental data. *International Journal of Coal Geology* 85/2011: 2–22, doi: 10.1016/j.coal.2010.09.002.
- Richards IG, Palmer JP, Barratt PA, 1993. Chapter 7 - Colliery Spoil Heap Combustion. In: *Studies in Environmental Science*, Elsevier, 56/1993: 213-232, [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)70744-1](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)70744-1).
- Shenghua C, Zhenqi H, Shengyan C, 2014. Construction of isolation layers for preventing spontaneous combustion of coal gangue dump and its effects. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*; Jan. 2014, 30/2: 235-243.
- Sinha A, Singh VK, 2005. Spontaneous Coal Seam Fires: A Global Phenomenon. In : Int. Res. For Sustainable Control and Management – Spontaneous coal seam fires: mitigating a global disaster. Int. Conf., Beijing, China, Nov. 29- Dec. 1, 2005: 42-66.
- Stracher GB, 2012. The rising global interest in coal fires. <https://www.earthmagazine.org/article/rising-global-interest-coal-fires/> (consulté le 29/01/2024).

Velly N, Pokryszka Z, 2001. Etude bibliographique sur les méthodes de prévention des échauffements par l'utilisation des substances antipyrogènes et retardatrices. Rapport Ineris DRS-01-20485/R21, 30 p.

Yong-Liang X, De-ming W, Lan-yun W, Xiao-xing Z, Ting-xiang C, 2012. Experimental research on inhibition performances of the sand-suspended colloid for coal spontaneous combustion. Safety Science 50 (2012) 822–827, doi: 10.1016/j.ssci.2011.08.026.

Zeyang S, Hongqing Z, Guowei J, Chaonan H, 2014. Comprehensive evaluation on self-ignition risks of coal stockpiles using fuzzy AHP approaches. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 32 (2014): 78-94, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2014.08.002>.

Zhai X, Wu S, Wang K, Drebesnstedt C, Zhao J, 2017. Environment influences and extinguish technology of spontaneous combustion of coal gangue heap of Baijigou coal mine in China. Energy Procedia 136 (2017) 66-72, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.326.

