



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 206841 - 2710892 - v2.0

03/03/2023

## Etat des lieux à l'international de la problématique des échauffements de terrils

## **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 équivalents 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 : GOMBERT Philippe

Vérification : GOUZY AURELIEN

Approbation : Document approuvé le 03/03/2023 par DUPLANTIER STEPHANE

## Table des matières

<b>1 PREMIERE PARTIE : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'AUTO-ECHAUFFEMENT ET LA COMBUSTION DES TERRILS DANS LE MONDE</b> .....	8
1.1 Occurrence des feux de terrils à travers le monde.....	8
1.1.1 En France .....	8
1.1.2 En Europe.....	9
1.1.3 Dans le reste du monde .....	11
1.2 Autoéchauffement et autocombustion .....	13
1.2.1 Généralités sur l'auto-échauffement et la combustion .....	13
1.2.2 Généralités sur l'auto-échauffement et la combustion des terrils houillers .....	14
1.3 Analyse des risques liés aux échauffements de terrils houillers .....	17
1.3.1 Mécanismes initiateurs .....	17
1.3.2 Causes externes.....	17
1.3.3 Causes internes.....	18
1.3.4 Facteurs aggravants .....	19
1.4 Evènements redoutés.....	20
1.4.1 Présence de zones chaudes .....	20
1.4.2 Emission de gaz et de fumées .....	21
1.4.3 Mouvements de terrain .....	23
1.4.4 Néof ormation de produits potentiellement polluants .....	24
1.5 Phénomènes dangereux ou impactants.....	25
1.5.1 Effets thermiques.....	26
1.5.2 Explosions .....	26
1.5.3 Instabilités.....	26
1.5.4 Subsidence .....	26
1.5.5 Effondrement localisé .....	27
1.5.6 Glissement de terrain .....	27
1.5.7 Emissions atmosphériques.....	28
1.5.8 Pollution des eaux et des sols .....	30
1.5.9 Nuisances diverses .....	32
1.6 Principales méthodes de mitigation.....	34
1.6.1 Généralités .....	34
1.7 Note sur l'arrosage intensif d'un terril en combustion avec de l'eau .....	35
<b>2 SECONDE PARTIE : ACQUISITION DE NOUVELLES DONNEES SUR L'AUTOECHAUFFEMENT DES TERRILS HOUILLERS</b> .....	37
2.1 Synthèse des données bibliographiques.....	37
2.2 Documents consultés .....	37
2.3 Effectif mondial de terrils houillers en autoéchauffement ou en combustion .....	37
2.4 Dimension moyenne d'un terril houiller .....	39
2.5 Synthèse des réponses au questionnaire envoyé.....	39
2.5.1 Préparation et envoi du questionnaire.....	39
2.5.2 Occurrence d'autoéchauffement d'un terril houiller.....	40
2.5.3 Fréquence et gravité des phénomènes induits .....	41

2.5.4	Méthodes de mitigation .....	44
<b>3</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>Bibliographie</b> .....	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>Annexes</b> .....	<b>54</b>

## Table des figures

Figure 1. Localisation des bassins houillers en France et nombre de terrils (Paquette et Degas, 2016)	9
Figure 2. Localisation des terrils en combustion en Silésie, Pologne (Nádudvari et al., 2020a)	10
Figure 3. Localisation des terrils en combustion du Donbass en Ukraine (Nádudvari et al., 2020a)	11
Figure 4. Gisements de charbon et localisation des feux de charbon en Chine (Zhang et al., 2017)	12
Figure 5. Localisation des feux de charbon en 2001 en Pennsylvanie (Stracher et Taylor, 2004)	13
Figure 6. Paramètres influant sur le phénomène d'auto-échauffement (Evanno, 2005)	14
Figure 7. Paramètres influant sur l'auto-échauffement d'un tas de charbon pur (Zeyang et al., 2014)	15
Figure 8. Courbes d'évolution possible de la température d'un tas de matière organique en auto-échauffement au cours du temps (Jendruš, 2016)	16
Figure 9. Modèle conceptuel de la combustion du terril de la mine Eliška à Žacléř, en Tchéquie (d'après Sýkorová et al., 2018)	16
Figure 10. Représentation simplifiée d'une séquence accidentelle	17
Figure 11. Mise en combustion de terrils par des feux accidentels (Paquette et Degas, 2016)	18
Figure 12. Résultats de l'autoéchauffement de deux terrils de 15 m de haut de charbon pur (A = bitumineux australien, B = subbitumineux indonésien) (d'après Pak et al., 2015)	20
Figure 13. Image thermique d'un terril en combustion en Afrique du Sud (Phillips et al., 2009)	21
Figure 14. Principaux processus physicochimiques en jeu dans un terril houiller en combustion (Misz-Kennan et Fabiańska, 2011)	22
Figure 15. Compositions moyennes représentatives des gaz émis en fonction de l'état d'échauffement des terrils de Wełnowiec en Pologne (Fabiańska et al., 2019)	23
Figure 16. Exemples de glissement de terrils en combustion (Monjoie et Schroeder, 2001)	24
Figure 17. Zones en combustion sous la surface de terrils houillers (Paquette et Degas, 2016)	26
Figure 18. Vue du terril n°6 d'Auchel à Calonne-Ricouart avant (à g.) et après (à d.) son écroulement	27
Figure 19. Glissement du flanc du terril de Petite Bacnure photographié en 2010 (Nyssen et al., 2012)	28
Figure 20. Evolution des émissions d'équivalent-CO <sub>2</sub> en fonction (à gauche) de la température de surface des terrils et (à droite) de leur teneur en charbon (Carras et al., 2009)	30
Figure 21. Vues du terril de la carrière Simon à Schœneck et des brouillards matinaux de fumées (Paquette et al., 2002)	33
Figure 22. Limitation de visibilité due aux fumées récurrentes d'un terril en feu aux Etats-Unis (Sussman et Mulhern, 1964)	33
Figure 23. Traitement en rizière d'un terril de charbon en combustion (McNay, 1971)	36
Figure 24. Pays les plus référencés en matière d'autoéchauffement ou de combustion du charbon	37
Figure 25. Terrils en autoéchauffement ou en combustion par pays (par rapport à l'effectif total)	38
Figure 26. Dimensions caractéristiques des terrils houillers en autoéchauffement ou en combustion	39
Figure 27. Nombre de réponses obtenues parmi les pays contactés	40
Figure 28. Classement global de la fréquence (en haut) et de la gravité (en bas) des principaux types de phénomènes	42
Figure 29. Analyse en composantes principales des relations entre pays (en noir) et phénomènes (en rouge)	43
Figure 30. Classement hiérarchique des méthodes de mitigation employées	44
Figure 31. Scénarios de risques liés à l'auto-échauffement ou à la combustion d'un terril houiller	45

## Résumé

L'empilement de matériaux poreux et combustibles peut conduire à leur autoéchauffement du fait des processus exothermiques d'oxydation et d'hydratation. Dans le cas des résidus houillers, il s'agit de l'oxydation du charbon et/ou de la pyrite au contact de l'air, et de l'hydratation du charbon. La température atteinte résulte d'un équilibre entre la chaleur produite en interne et celle perdue à l'interface terril-atmosphère. Si la chaleur s'accumule, la température va augmenter et, en cas d'emballement, les résidus peuvent entrer en autocombustion, ce qui se manifeste en surface par des dégagements de gaz, de fumées et/ou de flammes. A ces mécanismes autogènes s'ajoutent des facteurs externes susceptibles d'enclencher directement le processus de combustion, comme les incendies (naturels ou accidentels), la foudre, les courts-circuits, etc.

Plus en détails, l'intensité de l'autoéchauffement dépend principalement du flux d'air entrant qui favorise les phénomènes d'oxydation mais aussi le refroidissement du terril. Certains facteurs aggravants peuvent être identifiés, tantôt de nature interne (granulométrie des résidus, teneur en eau, teneur en soufre), de nature externe (hauteur et forme du terril, compaction des matériaux, âge du terril) ou bien encore climatologiques (précipitations, humidité de l'air, rôle du vent, température ambiante). Ces différents facteurs sont abordés par une nombreuse littérature mais il ne semble pas encore avoir de consensus sur leur priorisation dans le déclenchement et la propagation du processus d'autoéchauffement d'un terril houiller.

Il existe plusieurs milliers de terrils houillers en autoéchauffement ou en combustion de par le monde. Cela a probablement été le cas de la plupart des anciens terrils, du fait de la granulométrie grossière des résidus qui les constituent, alors que seuls quelques pourcents des terrils modernes sont en combustion visible.

En situation de combustion de terril, les principaux événements redoutés sont la brûlure des personnes, l'instabilité du terril, son explosion, la pollution de l'air (ou les nuisances olfactives) et la pollution des sols ou des eaux alentour : ils sont ainsi à l'origine de graves problèmes sécuritaires (brûlures, explosions, instabilités), sanitaires (pollution de l'air, nuisances olfactives) et/ou environnementaux (relargage de composés organiques ou minéraux (éco)toxiques, brouillards acides).

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

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Livrable de la sous-opération 1.3.B du programme d'appui SIT05, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 206841 - v2.0, 03/03/2023.

### **Mots-clés :**

Autoéchauffement, combustion, terril, charbon, résidu houiller.

## Introduction

Le stockage en vrac, sur une hauteur suffisante, d'un solide combustible divisé (en poudre, en grains, en blocs, etc.) peut conduire à son auto-échauffement du simple fait de son oxydation qui résulte de la mise en place d'une ou de plusieurs réactions exothermiques (Evanno, 2005 ; Janès et Vignes, 2018). Ainsi, si le solide possède une grande surface spécifique (s'il est suffisamment divisé) et une faible conductivité thermique, la production de chaleur peut s'accélérer jusqu'à déclencher localement une entrée en combustion des résidus, laquelle s'accompagne alors d'une forte émission thermique, d'une incandescence et parfois de flamme et de fumées. Dans le cas des terrils houillers, qui contiennent en moyenne de 15 à 35 % de matériaux combustibles (blocs de charbon, schistes houillers, bois, etc.) et de matières oxydables (sulfures de fer), d'autres processus exothermiques peuvent également entrer en action et renforcer l'auto-échauffement du charbon, comme son hydratation ou l'oxydation de la pyrite<sup>1</sup> (Paquette et Laversanne, 2003). Il existe aussi des facteurs déclenchants de la combustion externes comme la foudre ou des feux à la surface du terril. Néanmoins, pour Sinha et Singh (2005), 70 % des feux de charbon dans le monde seraient issus d'un auto-échauffement et, pour Paquette et Laversanne (2003), la moitié des 300 terrils édifiés dans le bassin minier Nord-Pas-de-Calais sont déjà entrés en combustion.

Ce travail vise à dresser un état des lieux du phénomène d'auto-échauffement et de combustion de terrils houillers en France et à l'international afin de disposer d'un large échantillon de situations. On y traite ainsi de l'auto-combustion résultant de l'emballement d'un auto-échauffement d'origine interne (réactions d'oxydation, d'hydratation...) mais aussi de combustion d'origine externe (incendie, foudre...). Il s'agit de présenter une vision globale de la problématique en termes d'accidentologie, en tenant compte des facteurs internes ou externes aux terrils. On passe également en revue les principales méthodes de remédiation, qui ne sont toutefois que succinctement abordées car elles sont fortement dépendantes du contexte local du site (topographie, climat, urbanisation...) et du pays dans lequel il se trouve.

Le présent document est subdivisé en deux grandes parties :

- la première est une analyse bibliographique visant à dresser un panorama des connaissances disponibles dans le monde sur les échauffements et combustions de terrils, d'identifier leurs mécanismes initiateurs et de lister les principaux phénomènes dangereux qui en résultent ;
- la seconde synthétise les données chiffrées issues de la bibliographie ainsi que les résultats d'un questionnaire qui a été envoyé en 2021 auprès de nos homologues européens, gestionnaires des situations d'après-mine ; son objectif était de recueillir des informations complémentaires sur cette problématique afin de mieux estimer la fréquence d'auto-échauffement et d'entrée en combustion des terrils et de caractériser les aléas associés.

Note : les feux de couches superficielles de charbon, les feux souterrains en mines et les feux de stocks de charbon pur ne sont pas traités ici ; toutefois, des travaux concernant ces derniers ont parfois été cités car les mécanismes d'auto-échauffement et d'auto-combustion y ont été très étudiés pour des raisons de sécurité, et ces situations sont considérées comme de bons analogues des terrils houillers.

---

<sup>1</sup> Les terrains encaissants des veines de charbon sont souvent riches en sulfures, en particulier en pyrite FeS<sub>2</sub>,

# 1 PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'AUTO-ECHAUFFEMENT ET LA COMBUSTION DES TERRILS DANS LE MONDE

## 1.1 Occurrence des feux de terrils à travers le monde

A titre introductif, précisons qu'un terril est un ouvrage de dépôt de résidus miniers. Les terrils houillers, issus de l'extraction du charbon, renferment principalement des éléments de roches encaissantes (schistes, grès, argile...), des restes de charbon ainsi parfois que divers résidus d'origine minière (bois de mine, huiles de carter, carcasses métalliques...).

Par ailleurs, les terrils ont diverses appellations de par le monde, à commencer par le terme wallon « terris » ou « tèris » qui daterait du 14<sup>e</sup> siècle et qui serait à l'origine du nom français (Thiery, 2013), lequel est d'ailleurs encore orthographié « terri » dans le nord de la France. Dans le sud, on parle plutôt de « crassier » (Thomas, 2016). Le terme terril a donné le russe « terricone » à la suite de la venue d'ingénieurs français en Russie au début du 20<sup>e</sup> siècle. En anglais, les appellations les plus classiques sont « *heap* », « *slagheap* » (Angleterre, Pays de Galles), « *dump* », « *spoil* », « *waste tip* » mais on trouve également « *bing* » en Ecosse ainsi que dans les pays nordiques, ou encore « *gob* », « *culm* » ou « *boney* » aux Etats-Unis.

On trouvera en Annexe 2 plusieurs exemples illustrés de terrils en combustion dans le monde.

### 1.1.1 En France

En France, il existerait un millier de terrils houillers, dont environ un tiers se trouve dans le bassin minier Nord-Pas-de-Calais (Figure 1). Dans ce bassin, la moitié des terrils se serait déjà consommée, soit plus d'une centaine d'entre eux (Paquette et Degas, 2016). Ces combustions ont pu apparaître dès la constitution des terrils (dépôt de cendres chaudes issues des machines à vapeur, auto-échauffement des matériaux fraîchement déposés) ou après, notamment au contact d'une source de chaleur externe ou à la suite de modifications déclenchant un auto-échauffement (emprunt de matériaux ou ravinement favorisant la pénétration de l'air et de l'eau). Plusieurs terrils y sont d'ailleurs encore en combustion active ou l'ont été au cours des dernières années : celui d'Avion (Nord) qui brûle depuis 1987, celui de Fouquières-les-Lens (Pas-de-Calais) en combustion au moins depuis 2001 ou ceux d'Haveluy (Nord). Ailleurs en France, on peut signaler les terrils de La Ricamarie (Loire), de La Taupe (Haute-Loire), de Champclauzon (Gard), de Rochebelle (Gard), de Gardanne (Bouches-du-Rhône), de Ronchamp (Haute-Saône), de Freyming-Merlebach (Moselle), etc. (Masalehdani et al., 2005 ; Thiery, 2013).



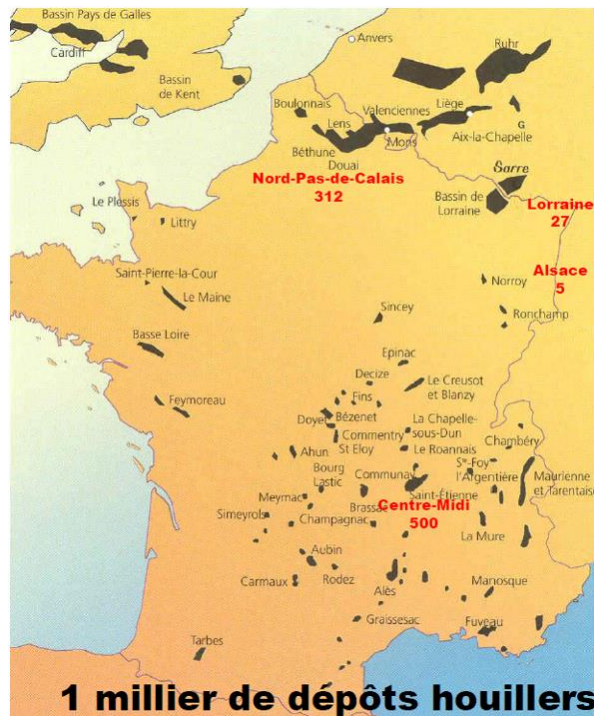


Figure 1. Localisation des bassins houillers en France et nombre de terrils (Paquette et Degas, 2016)

On détaille ci-après quelques-uns de ces terrils en combustion :

- à la Ricamarie (Loire), le terril Saint-Pierre a été édifié des années 1940 jusqu'à l'abandon de l'exploitation minière en 1983 ; il a commencé à brûler dès son édification et le feu est encore actif de nos jours ; il a ensuite été partiellement exploité pour récupérer le clinker<sup>2</sup> ;
- à Ronchamp (Haute-Saône), le terril du puits Saint-Charles, qui datait de l'extraction des années 1850-1880, a pris feu en 1993 après qu'on a fait brûler divers matériaux à sa base<sup>3</sup> ;
- à Saint-Jean-de-Valérisclé (Gard), environ 2 000 m<sup>2</sup> du terril du Parc à Bois, dont le volume est évalué à 850 000 m<sup>3</sup>, sont entrés en combustion en 2019 à la suite du brûlage de bois et de déchets divers à sa surface (Alard, 2020 ; Lefevre, 2020) ; il a fallu creuser une tranchée pour désolidariser sa partie saine de celle qui était en combustion, puis aplanir le terril afin de faciliter son refroidissement ; cette remédiation a duré plus d'un an ;
- à Alès (Gard), le terril de Rochebelle, d'un volume de 450 000 m<sup>3</sup>, est entré en combustion en 2004 à la suite d'un feu de forêt (Daum, 2004) ; la combustion s'est alors propagée au terril voisin du Ricateau, d'un volume de 1 750 000 m<sup>3</sup>, pourtant édifié plus tardivement avec des matériaux plus fins et mieux triés, donc potentiellement moins combustibles ; après une tentative d'extinction par des Canadiens qui effectueront 60 largages d'eau, il a été décidé de « défourner » ce terril, c'est-à-dire de mettre à nu ses zones en combustion (ARIA, 2004).

### 1.1.2 En Europe

Des exemples de terrils en combustion en Europe sont présentés dans ce paragraphe (voir également en Annexe 2).

**En Belgique (Wallonie)**, il existe environ 360 terrils dont une vingtaine sont ou ont été en combustion (Nyssen et al., 2012).

<sup>2</sup> roches cuites par la combustion du terril, généralement de teinte rouge brique, parfois appelées « schiste rouge », utilisables en remblais.

<sup>3</sup> Voir [POST SCRIPTUM \(sylvain-post.blogspot.com\)](https://sylvain-post.blogspot.com) et [Les terrils du bassin houiller de Ronchamp \(abamm.org\)](https://abamm.org), sites consultés en 2022.

**En Espagne (Cantabrie)**, l'intense activité d'extraction du charbon à El Bierzo a généré 571 terrils qui couvrent une superficie de 5 300 ha (Ribeiro et al., 2019). Les résidus miniers ont subi des altérations naturelles par des processus physiques, chimiques et biologiques, qui ont été à l'origine du développement d'un drainage acide minier et de la combustion spontanée de certains terrils.

**En Pologne (Silésie)**, la combustion des terrils houillers pose un grave problème, surtout lorsque les teneurs en matière organique (de 7 à 15 % mais localement au-dessus de 30 %) et en sulfures (de 0,3 à 2,8 %) génèrent des conditions favorables au déclenchement d'un auto-échauffement (Nádudvari et al., 2020a). Parmi les 220 terrils de Haute-Silésie, au moins 21 incendies ont été observés de 2000 à 2010 et 15 terrils en échauffement ont été signalés de 2007 à 2013 (Misz et al., 2007 ; Kruszewski, 2013 ; Ciesielczuk, 2015a ; Białecka et Grabowski, 2016 ; Nádudvari et al. 2020a ; Figure 2). Cependant, d'après Nádudvari et al. (2020a), presque tous les terrils de Haute-Silésie auraient en fait subi un auto-échauffement, même s'il n'a pas été visible. Le problème semble moins grave en Basse-Silésie où les signalements d'auto-échauffement sont en diminution. Aujourd'hui, des mesures appropriées sont prises lors de la mise en place des terrils, avec le mélange de boues et de divers matériaux anti pyrogènes aux résidus houillers (Ciesielczuk, 2015b). Dans le reste du pays, sur les 83 Mt de résidus houillers déposés en 1999, 50 Mt étaient alors en auto-combustion.



Figure 2. Localisation des terrils en combustion en Silésie, Pologne (Nádudvari et al., 2020a)

**Au Portugal**, dans le bassin houiller du Douro, il existe au moins 20 terrils dont 6 sont ou ont été soumis à un processus d'autocombustion (Ribeiro et al., 2020).

**Au Royaume-Uni**, le centre de l'Écosse et de l'Angleterre présente des terrils datant pour les plus vieux de la fin du 18<sup>e</sup> siècle (Denoël, 1949). En Ecosse, où l'on comptait autrefois 560 terrils, des protestations se sont multipliées à cause des nuisances causées par la combustion spontanée des terrils de charbon (Sheail, 2005). En 1938, une conférence s'est tenue à Glasgow pour adopter une résolution exprimant l'inquiétude face à « la grave menace que représente pour la santé publique la combustion des terrils de charbon..., ainsi que le sérieux préjudice porté à l'agrément du pays ». Mais le traitement de ce problème a surtout pris de l'ampleur au cours de la Seconde Guerre Mondiale, lorsqu'il a été constaté que les terrils en feu constituaient des points de repères pour les bombardiers allemands : en 1941, 24 terrils brillaient la nuit et 64 autres le faisaient par vent fort. Ces terrils ont donc été traités en priorité et (officiellement) éteints. Toutefois, en 1946, on dénombrait 662 feux de terrils en Angleterre et en Ecosse, dont 422 sans fumée, 197 avec de légères fumées et 45 avec beaucoup de fumées (Denoël, 1949). En 1967, sur les 2000 terrils gérés par le National Coal Board, 15 % avaient déjà brûlé et plus de la moitié étaient encore en combustion (Richards et al., 1993).

**En Tchéquie**, on trouve une quantité importante de terrils de tailles et d'âges divers (Žáček et Roman, 2015). Beaucoup d'entre eux se sont spontanément enflammés, notamment ceux situés dans les bassins sédimentaires du Carbonifère, près de Prague en Bohême centrale et près de la frontière polonaise en Bohême orientale. Parmi les terrils les plus étudiés du pays figurent :

- le terril de la mine de charbon et d'uranium de Novátor qui est entré partiellement en autocombustion entre 1959 et 1970 (Žáček et Roman, 2015) ;

- le terril de la mine d'Eliška, fermée dans les années 1920-1930, qui a brûlé intensément dans les années 1960 et 1980 ; aujourd'hui encore, on y observe des cheminées actives d'où s'échappent de l'air chaud et de la vapeur d'eau (Sykorová et al., 2018) ;
- le terril de Heřmanice, édifié dès 1838 à l'est de Prague, qui totalise 17 Mm<sup>3</sup> de résidus miniers répartis sur 110 ha (Barcyté et al., 2018 ; ses premiers signes d'activité thermique ont été observés dans les années 1950 puis, à partir de 1995, un incendie souterrain a affecté toute la partie sud-est du terril dont le traitement a été décidé en 2005 par les autorités de l'Etat.

**En Ukraine**, près de 95 % des gisements de charbon se trouvent dans le Donbass (Nádudvari et al., 2020a) où le nombre de terrils varie de 1 200 à plus de 1 500 (Sleptsov, 2020). Environ 355 d'entre eux sont en combustion, l'ont été ou risquent de l'être (Panov et al. 1998 ; Figure 3).

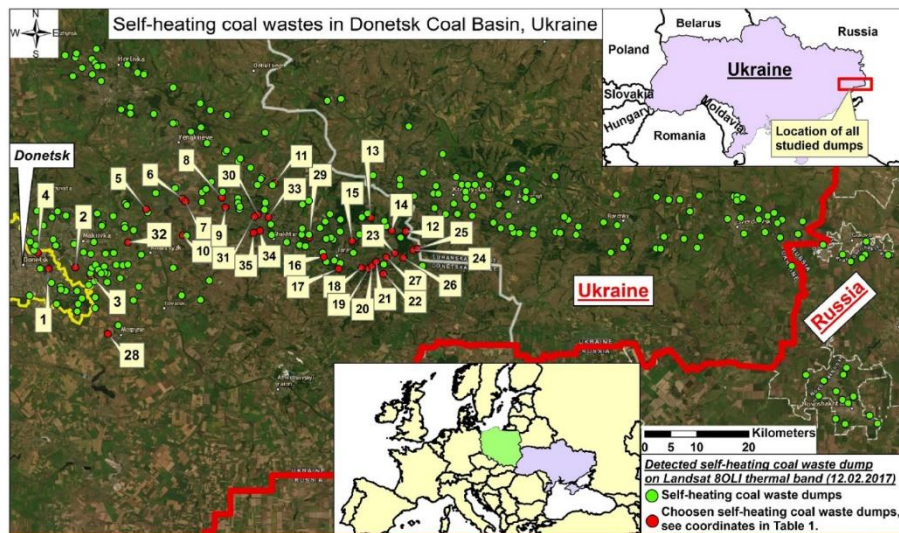


Figure 3. Localisation des terrils en combustion du Donbass en Ukraine (Nádudvari et al., 2020a)

### 1.1.3 Dans le reste du monde

Note : divers cas sont illustrés en Annexe 2.

#### 1.1.3.1 Afrique du sud

En Afrique du Sud, de nombreux terrils houillers en combustion spontanée produisent de la fumée et des flammes, entraînant une pollution atmosphérique, une contamination des eaux souterraines, et altérant la beauté des paysages (Falcon, 1986). Dans la plus grande mine de charbon du pays, située à Grootegeeluk (Limpopo), plusieurs terrils sont en combustion spontanée depuis leur édification en 1980 (Adamski, 2003). Cela provient du fait que les schistes houillers qu'ils renferment peuvent s'enflammer aussi spontanément que le charbon (Phillips et al., 2009).

#### 1.1.3.2 Brésil

A l'extrême sud du Brésil, le grand nombre de terrils en feu a un impact sur l'environnement (Civeira et al., 2016). A Criciúma, Urussanga et Siderópolis, des résidus de combustion provenant de l'exploitation du charbon ont été accumulés pendant des années sans aucun contrôle : bien qu'aucune flamme n'ait été visible pendant presque 30 ans, il s'y est développé une autocombustion interne avec des impacts sanitaires sur les habitants et des impacts environnementaux, notamment sur les sédiments fluviaux, les sols, les eaux de surface et les eaux souterraines.

#### 1.1.3.3 Chine

La Chine est le premier producteur mondial de charbon depuis une trentaine d'années<sup>4</sup>. Le pays a déjà accumulé près de 5 000 Mt de résidus houillers qui occupent plus de 15 000 km<sup>2</sup> de terres, et cette quantité continue d'augmenter puisque l'exploitation du charbon s'y développe toujours au rythme moyen de plus de 3 000 Mt par an (Zhao et al. 2008 ; Querol et al., 2011 ; Zhai et al., 2017). Plus de

<sup>4</sup> <https://atlasocio.com/classements/economie/ressources-naturelles/classement-etats-par-production-charbon-monde.php>



1 500 terrils appartiendraient aux mines d'état, dont 237 (Nyssen et al., 2012) à 389 (Zhai et al., 2017) seraient en combustion spontanée (Figure 4). Zhao et al. (2008) citent quant à eux 237 terrils déjà brûlés et 134 encore en combustion. Bien qu'ils ne contiennent que quelques pourcents de charbon, ces énormes terrils représentent une quantité importante de combustible (Rosema et al., 1999).

Au nord de la Chine, la région de Wuda (Mongolie Intérieure) est l'une des plus gravement touchées par les feux de couches de charbon (Song et al., 2015). Toutefois, en tentant de lutter contre ces feux par dynamitage et excavation des couches en combustion, il a été observé le déclenchement de feux de terrils. En outre, les tas de résidus résultant des opérations de dynamitage, d'excavation et d'exploitation minière à ciel ouvert, sont également entrés en combustion spontanée.

Dans la province de Shanxi, à l'ouest de Pékin, l'exploitation minière intensive a commencé il y a plus d'un siècle, entraînant l'accumulation de 1 100 Mt de résidus miniers répartis en 108 terrils (Zhao et al., 2008 ; Querol et al, 2011 ; Gogola et al., 2020). En 2008, 43 terrils étaient en combustion mais leur impact environnemental n'était pas surveillé et aucune tentative d'extinction n'était menée bien que le gaz émis aient un impact significatif sur la qualité de l'air, y compris jusqu'à Pékin. Ce n'est que peu avant les Jeux olympiques de 2008, qui se sont justement tenus à Pékin, que des mesures ont été prises pour lutter contre la forte pollution atmosphérique induite dans la capitale. En 2009, la plupart des terrils houillers étaient ainsi compactés et recouverts d'une couche de sol.

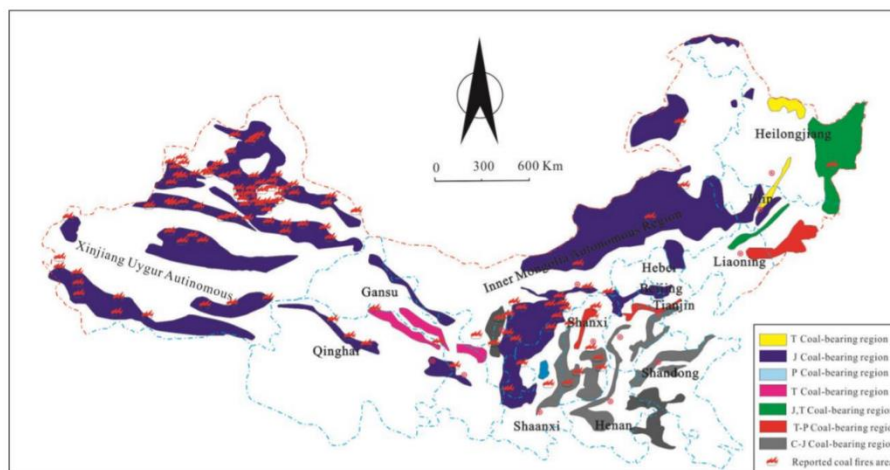


Figure 4. Gisements de charbon et localisation des feux de charbon en Chine (Zhang et al., 2017)  
(Note : la plupart de ces feux sont des feux de couche ou de mine)

#### 1.1.3.4 Etats-Unis d'Amérique

A ce jour, les 12tats-Unis sont le 2<sup>e</sup> producteur mondial de charbon<sup>4</sup>. En 1963, 488 terrils étaient en combustion dans 15 états, dont 72 % en Virginie de l'Ouest et en Pennsylvanie (Sussman et Mulhern, 1964). Dans ce dernier état, certains terrils brûlaient déjà depuis plus de vingt ans.

En 1968, le Bureau Fédéral des Mines a examiné le cas de 292 terrils en feu dans la moitié des 26 états charbonniers du pays (McNay, 1971). Il a conclu que les deux tiers des terrils devaient avoir subi un autoéchauffement mais on ne peut exclure un tel phénomène pour les autres sites.

Dans le seul état de Pennsylvanie, on dénombrait 140 feux souterrains et 58 feux de terrils en 2001 (Stracher et Taylor, 2004 ; Figure 5) et, en 2015, Malinconico (2015) en signalait encore 80, toutes origines confondues.

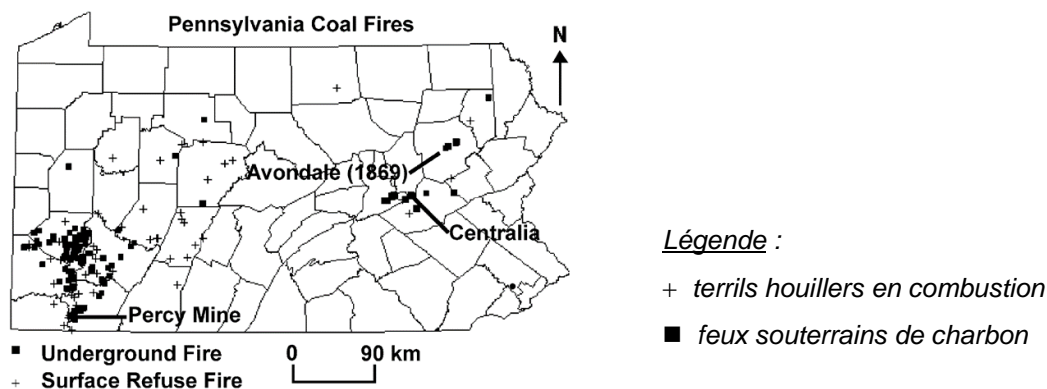


Figure 5. Localisation des feux de charbon en 2001 en Pennsylvanie (Stracher et Taylor, 2004)

### 1.1.3.5 Myanmar

Au Myanmar (ex Birmanie), au moins un terril de charbon brûle sporadiquement depuis 2015 à Ban Chaung, dans le district de Dawei (Phenrat, 2020). Ses fumées toxiques affectent une communauté indigène locale. En 2017, lors de l'arrêt de la mine, il a été recouvert de terre et de gravier à l'occasion pour stopper la combustion spontanée, mais ce traitement s'est avéré insuffisant puisqu'il continuait de brûler et de dégager des fumées en 2019.

### 1.1.3.6 Russie

Bien que le pays dépende fortement du charbon (6<sup>e</sup> producteur mondial en 2018), les données sur les feux de terrils y sont très fragmentaires. En 2018, on y totalisait 7 300 Mt de résidus houillers dont la moitié dans la seule région de Kemerovo, au sud de la Sibérie (Levbresse et Nevskaya, 2021). Toutefois, les seuls cas cités dans ce bassin houiller sont celui d'un terril créé il y a quarante ans qui a commencé à s'enflammer spontanément en 2015, dégageant d'importantes des fumées toxiques à proximité du village d'Apanas, et d'un terril du village de Chagan-Uzun (Altaï) qui a brûlé dans les années 1990 (Kadnikov et al., 2018). En 2020, s'est produit à Apanas une forte explosion due à la pénétration, au sein du foyer de combustion, d'eau issue d'un lac formé en amont du terril. Dans le même secteur, dans le bassin de Tchelyabinsk, certains terrils ont brûlé pendant 30 à 50 ans (Thiery, 2013). Une étude récente fait état de plusieurs terrils en combustion dans le secteur de Tcheremkhovo, près d'Irkoutsk, depuis la fin des années 1970 qui a coïncidé avec l'ouverture des mines de charbon à ciel ouvert (Akulov et Akulova, 2020). Enfin, le Donbass Oriental<sup>5</sup> renferme plus de 200 terrils de charbon dont au moins 16 sont en feu aux alentours de Rostov-sur-le-Don (Batugin et al., 2017).

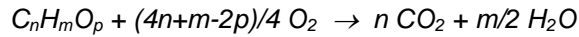
*À retenir : un terril houiller est un entassement à ciel ouvert de résidus miniers issus de l'extraction du charbon qui renferme des roches encaissantes, des restes de charbon et parfois divers autres déchets d'origine minière. Il en existe plusieurs milliers dans le monde, en activité ou abandonnés, dont près d'un millier en France. Une grande partie d'entre eux, surtout les plus anciens, sont ou ont été en autoéchauffement, voire sont entrés en combustion.*

## 1.2 Autoéchauffement et autocombustion

### 1.2.1 Généralités sur l'auto-échauffement et la combustion

Tout solide combustible et oxydable (bois, papier, charbon, tourbe, produit agroalimentaire, matière plastique...) peut entrer en auto-échauffement dès lors qu'il est stocké, manutentionné ou traité dans un environnement et dans des conditions physicochimiques adéquates (Evanno, 2005). La mise en place de ce mécanisme dépend de paramètres tels que la composition chimique du matériau, sa masse, son état de division, son humidité, la présence d'impuretés ou de substances pouvant jouer un rôle catalytique, la teneur en oxygène, la température ambiante, la durée de stockage, etc. (Figure 6). La réaction générique de la matière organique avec l'oxygène de l'air est la suivante :

<sup>5</sup> Zone russe située en face du bassin houiller ukrainien du Donbass.



En ce qui concerne l'auto-échauffement, des réactions de combustion peuvent se mettre en place dès que la production de chaleur au sein du tas devient plus rapide que sa dissipation, ce qui engendre une montée en température du matériau (Figure 6).

L'auto-échauffement conduit à une augmentation de la température qui accroît en retour la vitesse d'oxydation selon la loi d'Arrhenius et donc, par conséquent, le dégagement de chaleur. Selon la morphologie et la composition du tas, on peut rester dans un état stationnaire où toute la chaleur produite est évacuée vers l'extérieur, ou évoluer vers un emballement qui conduit à l'auto-combustion lorsque les réactions exothermiques ne sont pas freinées par manque d'oxygène ou d'eau.

Les incendies qui en découlent sont généralement difficiles à éteindre car ils peuvent toucher d'importants volumes de combustibles et, du fait qu'ils se développent au sein même du tas, ils sont souvent détectés tardivement. La combustion peut se produire avec ou sans flamme, ce dernier cas pouvant évoluer en combustion avec flamme selon la nature du produit et des conditions locales de ventilation et de diffusion d'air. Lorsque des gaz inflammables sont générés (par pyrolyse, fermentation ou oxydation partielle), le risque d'explosion est également à considérer. Dans le cas des terrils houillers, ces gaz peuvent être du monoxyde de carbone produit par une oxydation incomplète ou du « gaz à l'eau », mélange explosif de monoxyde de carbone et d'hydrogène résultant d'une arrivée massive d'eau (pluie, arrosage du terril) sur un foyer incandescent, selon la réaction suivante (Monjoie et Schroeder, 2001 ; Paquette et Degas, 2016) :

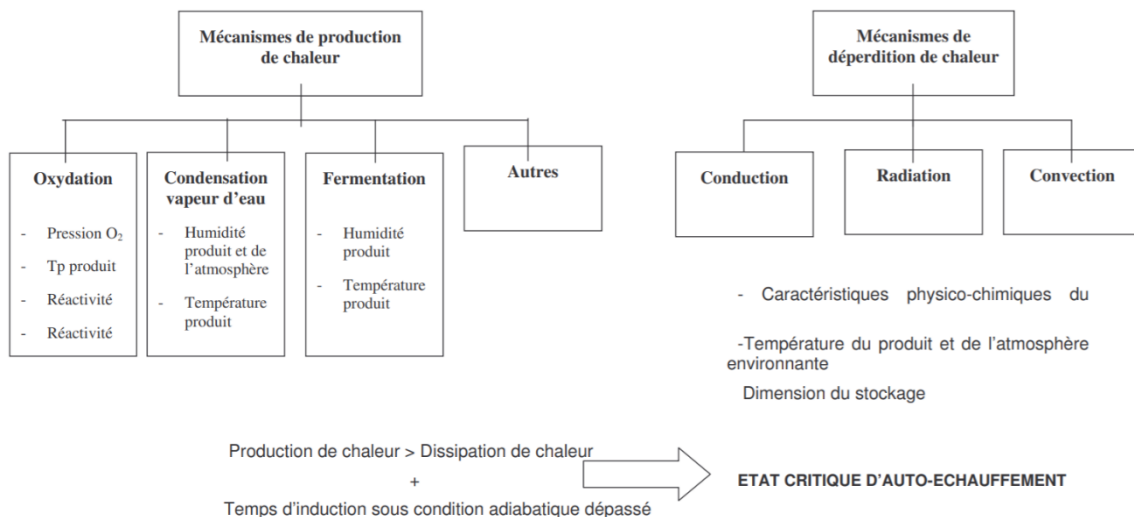
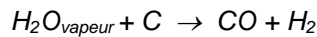


Figure 6. Paramètres influant sur le phénomène d'auto-échauffement (Evanno, 2005)

### 1.2.2 Généralités sur l'auto-échauffement et la combustion des terrils houillers

Les mécanismes liés à l'auto-échauffement ont été particulièrement étudiés pour les tas de charbon pur pour des raisons de sécurité. Ainsi, l'approche de Zeyang et al. (2014) est intéressante pour comprendre les mécanismes en action, car ils sont globalement les mêmes que dans l'auto-échauffement d'un terril houiller (Figure 7). Ces auteurs listent ainsi divers facteurs déclenchants ou aggravants, liés aux caractéristiques intrinsèques du charbon (réactivité, taille des particules, teneur en humidité, teneur en sulfures...), aux paramètres du tas (hauteur, forme, porosité, angle de pente...) et aux conditions météorologiques survenant au cours du stockage (radiation solaire, vitesse du vent, température ambiante, humidité...).

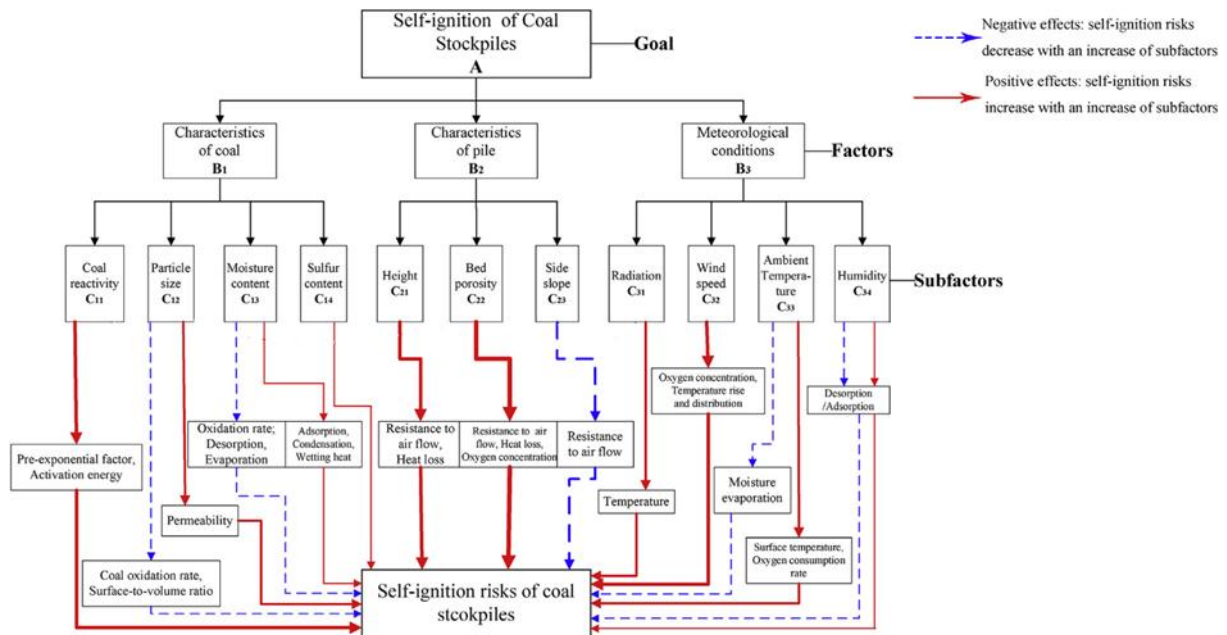


Figure 7. Paramètres influant sur l'auto-échauffement d'un tas de charbon pur (Zeyang et al., 2014)

Sur le plan cinétique, le processus de combustion lié à l'auto-échauffement des résidus houillers se déroule en plusieurs étapes successives (Misz et al., 2007 ; Misz-Kennan et Tabor, 2015 ; Jendrus, 2016 ; Sasaki et Sugai, 2011 [voir Annexe 1]) (Figure 13) :

- une étape d'incubation pendant laquelle la température n'atteint pas une valeur critique ou lorsque, après l'avoir atteinte, il existe des conditions favorables à la dissipation de la chaleur ; dans ce cas, le mécanisme d'auto-échauffement est interrompu avant l'entrée en combustion, et un refroidissement peut s'enclencher ;
- une étape d'auto-échauffement pendant laquelle la température augmente progressivement, en général selon la loi d'Arrhénius<sup>6</sup> ;
- une étape d'auto-combustion lorsque se produit une accumulation de chaleur qui conduit au dépassement de la température critique d'auto-inflammation du charbon.

Cette température critique varie de 60 à 80°C selon le type de charbon (Misz-Kennan et Tabor, 2015 ; Jendrus, 2016). Tant que la température n'atteint pas globalement cette valeur ou qu'elle est localement atteinte mais que des conditions favorisent la dissipation de la chaleur produite, le processus d'auto-échauffement s'interrompt avant l'entrée en combustion du charbon, et un refroidissement du matériau s'enclenche. Au-delà, on observe habituellement une augmentation rapide de la température jusqu'au stade de l'auto-inflammation du charbon qui est de l'ordre de quelques centaines de degrés (voir plus loin). Ensuite, si l'apport en oxygène est optimal, la température du charbon en combustion peut atteindre voire dépasser 1 000°C.

<sup>6</sup> Établie en 1889 par le chimiste suédois Svante A. Arrhenius, cette loi empirique stipule que lorsque la température monte de 10°C, la vitesse d'une réaction chimique augmente d'un facteur 2 à 3.

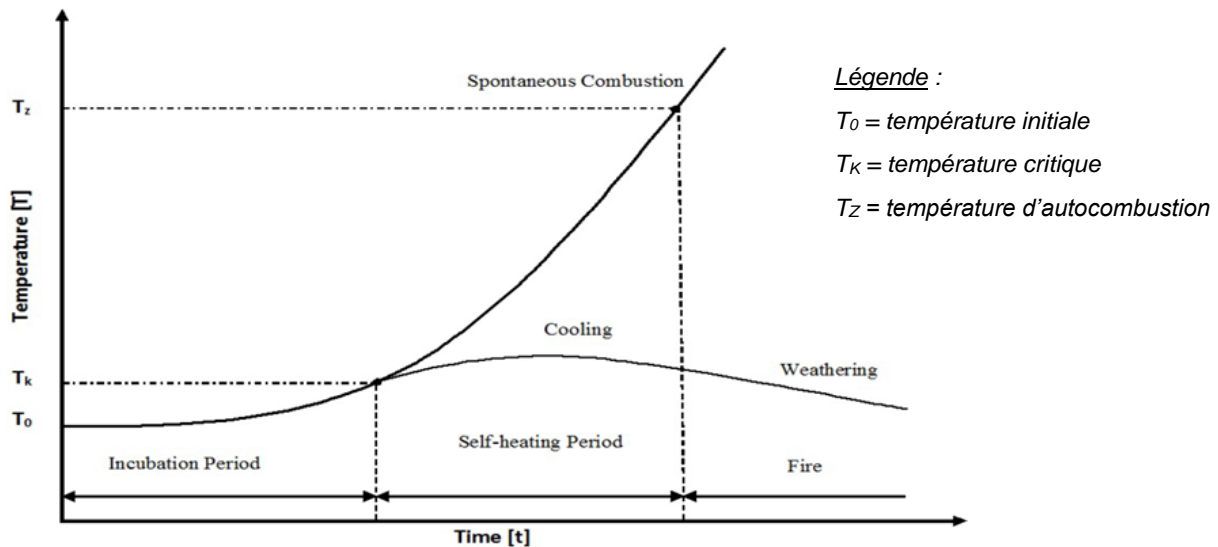


Figure 8. Courbes d'évolution possible de la température d'un tas de matière organique en auto-échauffement au cours du temps (Jendruš, 2016).

Dans le cas de l'auto-combustion du terril de la mine Eliška à Žacléř, en Tchéquie, Sýkorová et al. (2018) ont proposé un modèle conceptuel en trois stades (Figure 9) :

A. Stade précoce : la combustion commence sur les pentes du terril exposées au vent et progresse irrégulièrement vers l'intérieur du terril ; les premiers produits de la pyrolyse du charbon s'accumulent à la surface du terril ;

B. Stade principal : la combustion progresse vers la surface et l'intérieur du terril ; les premiers condensats d'hydrocarbures (HCC) sont convertis en coke<sup>7</sup> ou en condensats à la surface du terril ; les gaz, les produits volatils de la combustion du charbon, ainsi parfois que du mercure sont libérés dans l'atmosphère ; en raison de l'intensité irrégulière de la combustion, il subsiste de nombreux blocs de charbon ou de coke à moitié brûlés à l'intérieur du terril ;

C. Stade final : la température diminue progressivement à la surface du terril et, en raison de la combustion incomplète de la matière organique à l'intérieur (due à des conditions d'accès limitées à l'oxygène), la volatilisation des produits de pyrolyse du charbon et leur condensation et oxydation en superficie du terril entraînent la formation de condensats d'hydrocarbures qui s'accumulent à la surface du terril ; en outre, la réaction de la vapeur riche en  $H_2SO_4$  sur certains minéraux provoque la formation de néominéraux argileux comme la jarosite  $KFe_3(OH)_6(SO_4)_2$  ou l'alunite  $KAl_3(OH)_6(SO_4)_2$ .

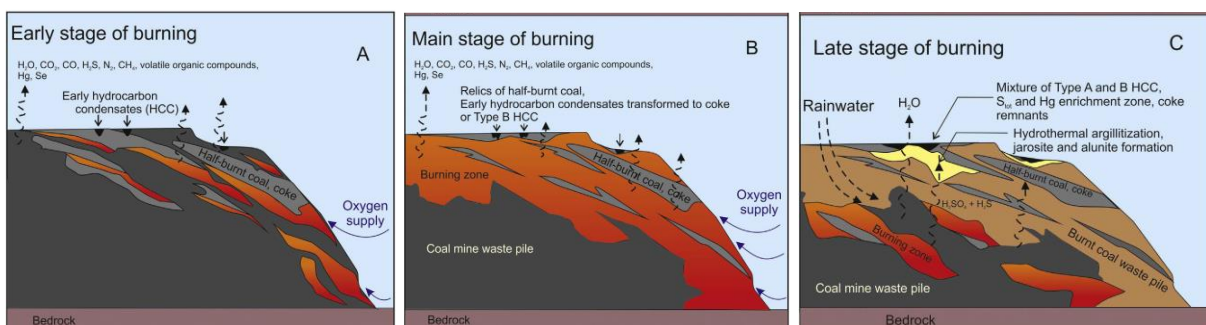


Figure 9. Modèle conceptuel de la combustion du terril de la mine Eliška à Žacléř, en Tchéquie (d'après Sýkorová et al., 2018)

<sup>7</sup> Résidu carboné résultant de la pyrolyse du charbon à l'abri de l'air.



À retenir : l'empilement d'un solide combustible et oxydable comme le charbon peut produire un auto-échauffement du fait des réactions exothermiques d'oxydation du charbon et de la pyrite, et d'hydratation du charbon. Selon la morphologie et la composition du tas, on peut rester dans un état stationnaire si toute la chaleur produite est évacuée vers l'extérieur (auto-échauffement) ou évoluer vers un emballement thermique si la production de chaleur au sein devient plus rapide que sa dissipation (auto-combustion).

### 1.3 Analyse des risques liés aux échauffements de terrils houillers

Une analyse des risques est le plus souvent représentée sous la forme d'une séquence accidentelle simplifiée qui fait intervenir (Figure 10) :

- un événement redouté central (ERC), conventionnellement défini au centre de la séquence accidentelle ;
- un ou plusieurs mécanisme(s) initiateur(s), situé(s) en amont de l'événement redouté et qui en constitue(nt) la cause ;
- un ou plusieurs phénomène(s), résultant de l'événement redouté, susceptible(s) de porter atteinte aux personnes (phénomène dangereux), aux biens ou à l'environnement (phénomène impactant).



Figure 10. Représentation simplifiée d'une séquence accidentelle

#### 1.3.1 Mécanismes initiateurs

Les terrils houillers peuvent être soumis à deux mécanismes d'inflammation (Kim et Chaiken, 1993) :

- des causes externes qui déclenchent une combustion forcée du charbon par apport d'énergie externe (foudre, feu, court-circuit...);
- des causes internes (réactions exothermiques) qui créent un auto-échauffement pouvant aboutir à l'auto-combustion du charbon.

On traitera rapidement des causes externes qui ne dépendent pas de la nature du charbon ou de son mode de stockage mais seulement de l'environnement du terril, pour se focaliser sur les causes internes qui sont plus fréquentes et plus insidieuses car elles agissent sur le long terme.

#### 1.3.2 Causes externes

Les causes externes susceptibles d'amener à la combustion forcée du charbon sont d'ordre accidentel (Richards et al., 1993 ; Masalehdani et Potvin, 2004 ; Sheail, 2005) : foudre, court-circuit de câbles électriques souterrains, incendie accidentel (feu de broussailles ou de forêt, feu de bâtiment, ...) ou volontaire (barbecue, feu de joie, feu de véhicule, ...), mise en exploitation du terril (dans un but de récupération des matériaux brûlés ou clinker), déversement de cendres chaudes... Elles ne dépendent ni de la nature du charbon ni de son mode de stockage mais de l'environnement du terril et de l'occupation des sols à proximité. L'état de l'art montre que ces causes sont généralement minoritaires dans le déclenchement de la combustion d'un terril houiller. Toutefois, les incendies (volontaires ou naturels) font partie des causes externes les plus fréquemment citées (Figure 11). Paquette et Degas (2016) mentionnent ainsi plusieurs exemples en France :

- en 1985, l'incendie de forêt de Portes (Gard) a concerné 4 000 ha sur lesquels se trouvaient plus de 40 terrils, ce qui en a allumé 10 dont 3 à proximité d'agglomérations ;
- en 1988, un feu de déchets de scierie a embrasé le remblai houiller du stade de La Machine (Nièvre) ;
- en 2004 près d'Alès (Gard), les terrils de Rochebelle et de Ricateau ont pris feu à la suite d'un incendie de forêt pour le premier, et par contact avec ce terril en feu pour le second ;
- en 2003, l'incendie d'une voiture volée a mis le feu au Terril Wendel (Moselle) ;

- en 2013, un écobuage a déclenché la combustion d'un terril à Commentry (Allier).

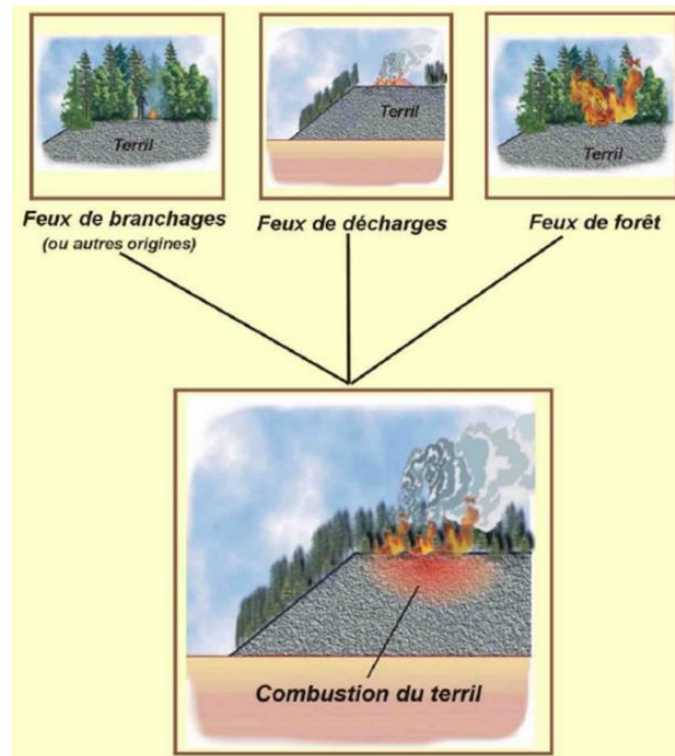


Figure 11. Mise en combustion de terrils par des feux accidentels (Paquette et Degas, 2016)

### 1.3.3 Causes internes

Il est admis depuis longtemps que le phénomène d'auto-échauffement, peut résulter de trois grands types de réactions exothermiques (Corey et al., 1956 ; Carres et Saghafi, 1998) :

- l'oxydation du charbon par formation d'un complexe charbon-oxygène mais également l'oxydation des autres matériaux charbonneux (schistes, siltstones, mudstones), moins réactifs que le charbon mais présents en bien plus grande quantité dans un terril ;
- l'adsorption d'humidité par le charbon (hydratation) et la condensation de la vapeur d'eau dans sa structure poreuse, notamment dans le cas de charbons secs déposés sur des terrains humides ou subissant une forte pluie ;
- l'oxydation des sulfures (notamment la pyrite) présents dans les roches encaissantes, qui est une réaction très exothermique.

#### Oxydation du charbon

En laboratoire, Beier (1994) a enfermé dans des boîtes des grains de matériaux combustibles (bois, tourbe, charbon) et constaté que le phénomène d'oxydation se déclenchait spontanément et qu'il se poursuivait encore 32 ans après avec émission d'oxydes de carbone. Le charbon réagit donc spontanément avec l'oxygène dès qu'il entre en contact avec l'air, même à température ambiante (IMTE, 2006), et peut adsorber jusqu'à 0,4 L<sub>o2</sub>/kg (Jendrus, 2016). La réaction de formation du complexe charbon-oxygène par chimisorption est exothermique, ce qui augmente la température et favorise la dessiccation du charbon qui devient alors de plus en plus inflammable. Si la chaleur ainsi libérée peut s'accumuler, la vitesse de la réaction va augmenter de manière exponentielle et la température monter de plus en plus haut. Lorsqu'on atteint la température d'inflammation ou d'ignition du charbon, celui-ci commence à brûler : c'est la combustion spontanée ou auto-combustion. Cette température varie de 150 à 500°C en fonction de la nature du charbon (voir détails en Annexe 3).

#### Hydratation du charbon

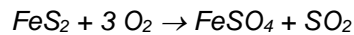
Toute matière poreuse peut adsorber l'humidité de l'air jusqu'à atteindre un équilibre avec la tension de vapeur ambiante (Evanno, 2005). La condensation de cette vapeur d'eau dans les pores s'accompagne d'une libération de chaleur principalement due à sa chaleur latente de condensation (582 cal/g à 25°C). A titre d'exemple, lorsque le taux d'humidité du matériau augmente de 1 %, cela se traduit (en conditions

adiabatiques) par une élévation de température de l'ordre 22°C pour un charbon standard. . Ce mécanisme peut donc échauffer le charbon jusqu'à une température où le relai pourra être pris par les réactions d'oxydation, et augmenter ainsi sa probabilité d'entrer en auto-échauffement (Kim et Chaiken, 1993, ; IMTE, 2006).

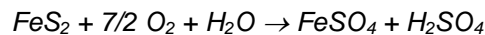
Toutefois, le taux d'humidité d'un charbon a en fait une influence plus complexe sur son auto-échauffement. Pour Shah (2017) et pour Pan et al. (2020), la chaleur de mouillage (heat of wetting) peut augmenter la température d'oxydation du charbon, accélérer son taux d'oxydation (jusqu'à six à huit fois) et faciliter sa combustion spontanée. Cependant, pour Zeyang et al. (2014), si un tas de charbon pur est en contact avec de l'eau liquide (par exemple à sa base), les molécules d'eau vont se fixer aux sites polaires de la surface du charbon par des liaisons hydrogène, réduisant ainsi l'accès de l'oxygène et donc le taux d'oxydation du charbon.

#### Oxydation des sulfures

Le soufre peut exister sous trois formes dans le charbon : pyrite, sulfates et sulfures organiques. La pyrite est la plus réactive et joue le rôle principal dans l'auto-échauffement car, bien que sa chaleur spécifique soit plus faible que celle du charbon, sa température augmente trois fois plus vite (Deng et al., 2015). Son oxydation au contact de l'atmosphère se déroule généralement selon la réaction suivante (Corey et al., 1956) :



En présence d'eau, on obtient (Stracher et Taylor, 2004) :



En l'absence d'air, une oxydation de la pyrite peut également se produire par le biais du fer trivalent  $\text{Fe}^{3+}$  (Jendrusí, 2016). Elle est alors due à la bactérie *Thiobacillus ferrooxidans* qui serait présente dans toutes les mines où l'on extrait de la houille ou des minerais sulfurés (Beier, 1994). Cette bactérie oxyde les sels de fer(II) en sels de fer(III), qui à leur tour oxydent le charbon, surtout lorsqu'il est humide.

Ces diverses réactions peuvent se produire à faible température et, comme elles sont toutes exothermiques, leur chaleur vient s'ajouter à celle due à l'oxydation du charbon. On notera toutefois que les avis divergent quant à l'importance de la pyrite dans l'auto-combustion du charbon :

- pour Zeyang et al. (2014), la tendance d'un charbon à l'auto-échauffement n'augmente pas si sa teneur en soufre est inférieure à 2 % mais le soufre facilite ce processus lorsque sa teneur est supérieure à 3 % ;
- pour Shah (2017), la pyrite agit surtout lorsque sa teneur dépasse 2 % et lorsque le charbon est à l'état très finement divisé ;
- pour Jendrusí (2016), l'échauffement du charbon peut être initié par la pyrite lorsque sa teneur est supérieure à 5 % et si elle est fragmentée et dispersée dans l'ensemble du terril, avec une humidité suffisamment élevée ;
- pour Deng et al. (2015), l'impact de la pyrite sur l'auto-échauffement et l'auto-combustion d'un charbon pur augmente jusqu'à une teneur de 7 % puis devient ensuite plus modéré.

D'autre part, l'oxydation de la pyrite joue également un rôle de délitement du charbon car son produit de réaction a un volume plus important que la pyrite elle-même, ce qui a pour conséquence d'exposer ainsi une plus grande surface de charbon à l'air et donc à l'oxydation (Jendrusí 2016 ; Shah, 2017).

#### Autres réactions exothermiques

Jendrusí (2016) mentionne, sans toutefois les retenir comme causes significatives, deux autres processus susceptibles d'expliquer en partie l'auto-échauffement du charbon :

- la fermentation bactérienne, issue d'observations de combustion spontanée de substances organiques (foin, paille, laine, sciure, céréales, huiles...);
- la présence de phénols, du fait de la capacité d'absorption d'oxygène (qui est une réaction exothermique) par les phénols insaturés.

### 1.3.4 Facteurs aggravants

L'emballlement du processus d'auto-échauffement d'un terril houiller et son passage au stade de combustion dépendent de plusieurs facteurs aggravants de nature intrinsèque et extrinsèque, résumés dans le Tableau 1 (d'après Sussman et Mulhern, 1964 ; Falcon, 1986 ; Carres et Saghafi, 1998 ;

Rosema et al., 1999 ; Misz et al., 2007 ; Zeyang et al., 2014 ; Misz-Kennan et Tabor, 2015 ; Akinshipe et Kornelius, 2017 ; Shah, 2017). Ces différents facteurs sont par ailleurs détaillés en Annexe 3.

Tableau 1. Facteurs aggravants du processus d'autoéchauffement d'un terril houiller

Facteurs intrinsèques liés à la nature du charbon	Facteurs extrinsèques	
	- liés aux conditions de dépôt	- liés aux conditions climatiques
Nature et rang	Hauteur du terril	Température ambiante
Taille des résidus	Forme du terril	Humidité ambiante
Teneur en humidité	Compaction des résidus	Vitesse du vent
Présence de pyrite	Présence d'autres déchets (bois...)	Précipitations
Teneur en cendres		

Si un consensus existe sur leur rôle dans le déclenchement ou la facilitation des processus d'auto-échauffement et d'auto-combustion, leur ordre de priorité varie d'un auteur à l'autre :

- la nature du charbon, à travers sa composition macérale, pour Falcon (1986), Carres et Saghafi (1998), Misz et al. (2007), Zeyang et al. (2014), Misz-Kennan et Tabor (2015) ;
- le taux de réaction avec l'oxygène, par le biais de la surface de charbon exposée à l'air et du rôle du vent, pour Carres et Saghafi (1998), Rosema et al. (1999), Smith et Glasser (2005).

Note : Sussman et Mulhern (1964) ainsi que Stracher et Taylor (2004) mentionnent également la présence de pyrite comme facteur aggravant mais ce paramètre, considéré ici comme un mécanisme initiateur, a été traité au chapitre précédent.

## 1.4 Evènements redoutés

L'entrée en autoéchauffement d'un terril passe souvent inaperçue jusqu'au développement de la combustion qui émet alors des fumées visibles. C'est pourquoi l'autoéchauffement ne pose généralement pas de problème (sauf l'émission d'oxydes de carbone), contrairement à la phase de combustion qui peut provoquer plusieurs évènements redoutés (Monjoie et Schroeder, 2001) :

- présence de zones chaudes à très chaudes en surface ou à faible profondeur ;
- émission de gaz et de fumées dont certains sont nocifs, inflammables ou explosifs ;
- mouvements de terrain liés à la perte de matière par combustion ou à des travaux d'excavation ;
- apparition de polluants néoformés susceptibles d'être lessivés ou lixiviés.

### 1.4.1 Présence de zones chaudes

La température mesurée à la surface des terrils en autoéchauffement peut atteindre 50 à 70°C dans des terrils expérimentaux de charbon pur d'origine sud-africaine (Adamski, 2003), australienne ou indonésienne (Pak et al., 2015 : Figure 12).

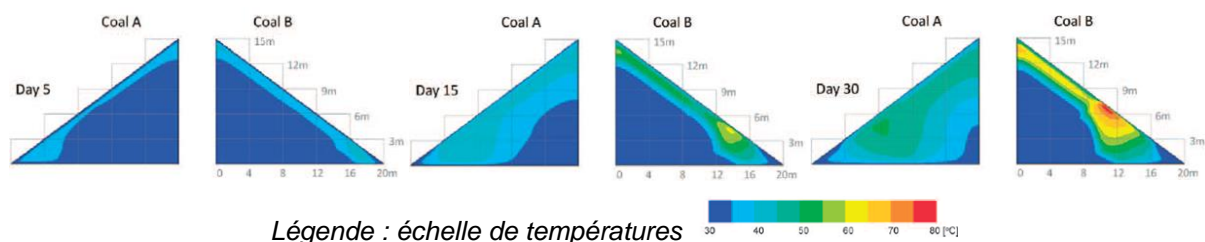


Figure 12. Résultats de l'autoéchauffement de deux terrils de 15 m de haut de charbon pur (A = bitumineux australien, B = subbitumineux indonésien) (d'après Pak et al., 2015)

En ce qui concerne un terril en combustion, des températures atteignant 100°C ont été mesurées par imagerie thermique en Afrique du Sud, (Phillips et al., 2009 : Figure 13).

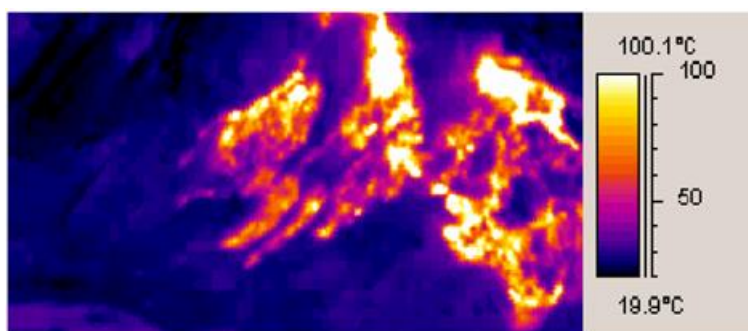


Figure 13. Image thermique d'un terril en combustion en Afrique du Sud (Phillips et al., 2009)

Cependant, en profondeur, la température peut atteindre plusieurs centaines de degrés : 300°C à 5 m de profondeur à Shirebrook au Royaume-Uni (Donnelly et Bell, 2011), 600°C dans le côté exposé au vent du terril de Rymer Cones en Pologne (Misz-Kennan et Adam, 2015), 600 à 900°C dans des points chauds découverts lors du démantèlement du terril de Barnsley au Royaume-Uni (Donnelly et Bell, 2011). En outre, si les résidus houillers chauffés se transforment en coke, leur température peut même localement atteindre 1200 à 1300°C (Misz et al., 2007).

#### 1.4.2 Emission de gaz et de fumées

La nature des gaz émis par des terrils houillers en combustion a été étudiée par de nombreux auteurs : aux Etats-Unis par Sussman et Mulhern (1964), McNay (1971), Stracher et Taylor (2004) ou Kim (2011), en Afrique du Sud par Falcon (1986) ou Akinshipe et Kornelius (2017), en Chine par Liu et al. (1998), Zhao et al. (2008) ou Querol et al. (2011), au Royaume-Uni par Nichol et Tovey (1998) ou Torrance et al. (2017), en France par Paquette et al. (2002), Masalehdani et Potvin (2004) ou Masalehdani et al. (2005), au Portugal par Misz Kennan et Fabiańska (2011) ou Ribeiro et al. (2012), en Inde par Mahananda (2014), en Pologne par Kruszewski et al. (2018), Fabiańska et al. (2019) ou Nádudvari et al. (2020b), en Ukraine par Nádudvari et al. (2020a) ou encore au Myanmar par Phenrat (2020).

On rappelle en outre que la décomposition thermique de l'eau en oxygène et hydrogène à haute température peut créer du « gaz à l'eau », explosif et inflammable, sans compter le risque d'explosion de vapeur si l'eau est apportée en grande quantité, par exemple lors d'une tentative d'extinction (Ciesielczuk, 2015a ; IMTE, 2006).

En Pologne (Haute-Silésie), les composés présents dans les produits volatilés sont (Misz Kennan et Fabiańska, 2011 ; Nádudvari et al. 2018) : le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, l'ammoniac, les oxydes de soufre, les oxydes d'azote, le chlorhydrate, l'hydrofluorure, l'hydrosulfure, des alcools, des métaux lourds (Hg, As, Pb et Se) et des Composés Organiques Volatils (COV). En ce qui concerne plus précisément ces derniers, on trouve (Fabiańska et al., 2013) :

- des hydrocarbures aliphatiques allant des phases légères (C1-C4), majoritairement du méthane et de l'éthane, à de petites quantités d'alcane supérieurs (C5-C12) (Ribeiro et al., 2010) ;
- des hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP dont le benzène, le toluène, l'éthylbenzène, les xylènes, l'éthyltoluène et le triméthylbenzène qui forment plus de la moitié des COV émis et dont les concentrations varient fortement selon le site étudié ;
- des hydrocarbures halogénés, tels que le bromométhane, l'iodométhane et le trichlorométhane qui présentent toutefois les plus faibles concentrations de tous les COV ;
- des composés hétérocycliques oxygénés, tels que les dérivés du furane ou du soufre (thiophène), ou azotés, comme la pyridine et la pyrazine (Ribeiro et al., 2010).

En ce qui concerne les composés soufrés, leur teneur totale peut atteindre 0,2-0,7 ppm, formés à 95 % par de l'H<sub>2</sub>S, 2-3 % par du CS<sub>2</sub>, et 0,4-0,8 % par du SO<sub>2</sub> et du thiophène (Kruszewski et al., 2018).



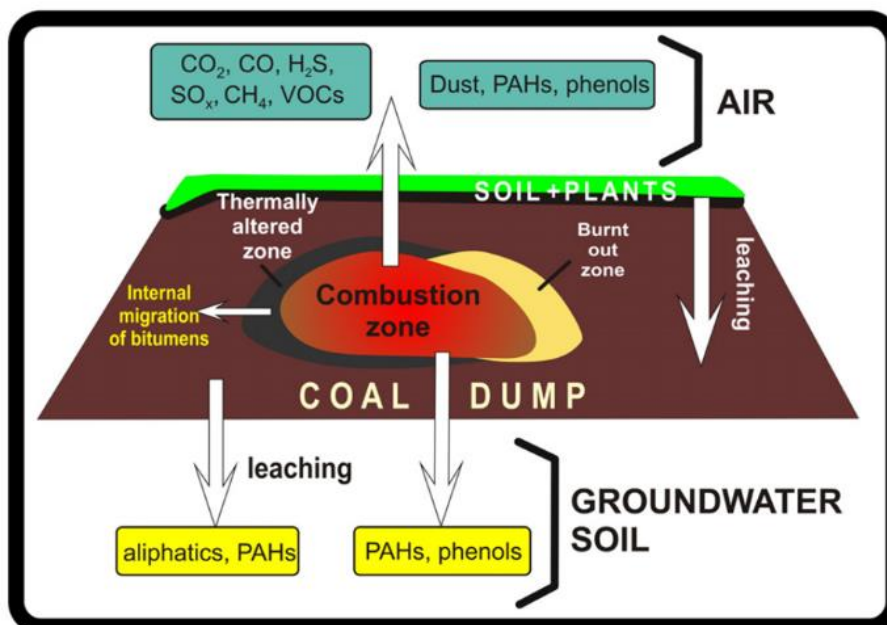


Figure 14. Principaux processus physicochimiques en jeu dans un terril houiller en combustion (Misz-Kennan et Fabiańska, 2011)

En Chine, Liu et al. (1998) estiment que 1 t de résidu houiller peut générer 0,84 kg de  $\text{SO}_2$ , 0,61 kg de  $\text{H}_2\text{S}$ , 0,03 kg de  $\text{NO}_x$ , 100 kg de  $\text{CO}$  et 0,45 kg de fumées. En Ukraine, les terrils houillers du Donbass émettent chaque année plus de 50 000 t de gaz nocifs dans l'atmosphère dont 15 000 t de  $\text{CO}_2$  et 5000 t de  $\text{CO}$  (Nádudvari et al., 2020a).

En ce qui concerne les métaux traces, l'analyse des émissions d'une vingtaine de terrils en Chine a montré que plus de la moitié du sélénium, du mercure et du plomb renfermés dans les résidus est relâchée dans l'atmosphère au cours de la combustion (Zhao et al., 2008).

Cependant, sur un même terril, les émissions ne sont pas stables dans le temps, ni quantitativement (émissions pulsatoires) ni qualitativement. Elles varient notamment selon le stade d'échauffement avec, en fonction de l'élévation de la température, la succession de différents gaz :  $\text{CO}$  à  $110^\circ\text{C}$ ,  $\text{H}_2$  à  $170^\circ\text{C}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  à  $240^\circ\text{C}$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$  à  $300^\circ\text{C}$ , etc. Elles varient également en fonction de l'apport en oxygène :

- en milieu peu oxygéné, la carbonisation produit tout d'abord une distillation des hydrocarbures volatils (COV) et semi-volatils, puis une pyrolyse de ces vapeurs qui aboutit à des hydrocarbures plus légers (Fabiańska et al., 2013) ;
- en milieu plus oxygéné, d'autres gaz peuvent également être émis ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  et, s'il existe aussi du bois parmi les matériaux stockés, formaldéhyde ( $\text{CH}_2\text{O}$ ), acide formique ( $\text{CH}_2\text{O}_2$ ), acide acétique ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ ), éthanedial ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_2$ )...).

Les teneurs en gaz émis par des terrils en combustion montrent également une grande variabilité spatiale comme cela a été montré en Silésie (Pologne) par Fabiańska et al. (2019). Les émissions les plus fortes se produisent sur des terrils thermiquement très actifs, alors qu'elles sont des centaines de fois plus faibles sur ceux qui présentent une activité thermique faible à nulle (Figure 15).

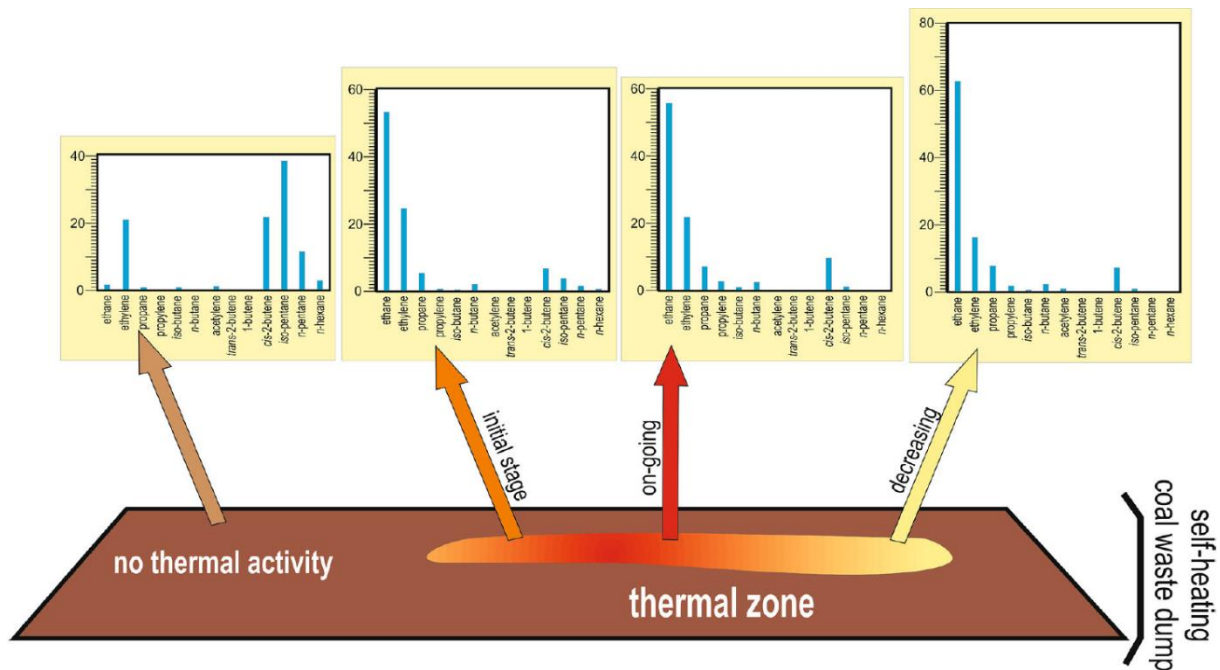


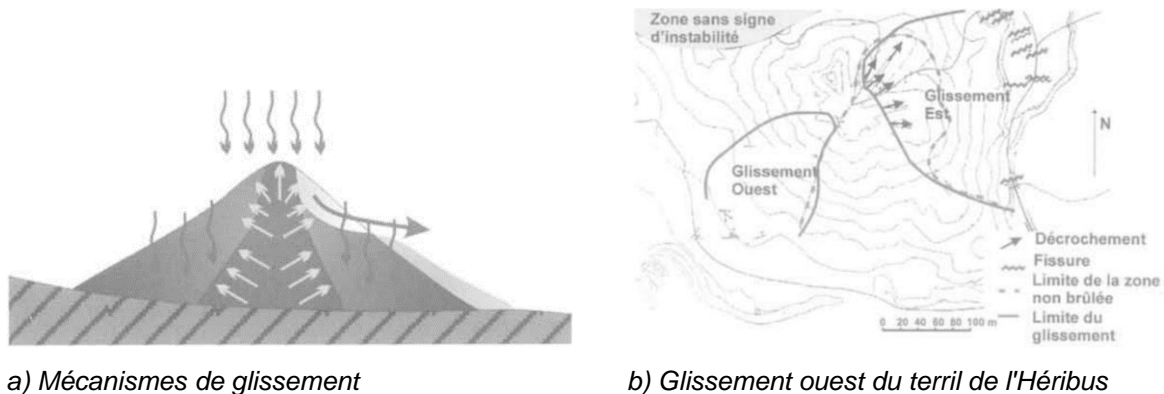
Figure 15. Compositions moyennes représentatives des gaz émis en fonction de l'état d'échauffement des terrils de Welnowiec en Pologne (Fabiańska et al., 2019)

### 1.4.3 Mouvements de terrain

La combustion des terrils s'accompagne d'une perte de matière qui provoque des réajustements de matériaux. Le principal type de mouvement de terrain susceptible d'affecter un terril est le glissement, c'est-à-dire le mouvement d'une masse de terrain le long d'une zone de rupture (Ineris, 2018), mais il existe d'autres types d'instabilités liés à la combustion interne des schistes et charbons résiduels (Monjoie et Schroeder, 2001). En France, par le passé, cela a parfois affecté des constructions ou des voiries édifiées sur des remblais houillers, voire directement sur des plateformes de terrils, ce qui a pu conduire à des tassements différentiels (Paquette et Laversanne, 2003). En Belgique, il a été constaté que presque toutes les instabilités de versants des terrils en combustion survenaient lors de fortes pluies (Figure 16a), en raison de :

- l'augmentation de densité des matériaux superficiels non brûlés qui se saturent en eau ;
- la diminution de succion et de résistance au cisaillement due à la saturation en eau ;
- l'apparition d'une nappe phréatique temporaire qui augmente les pressions interstitielles, et dont l'écoulement peut créer des forces déstabilisantes ;
- la vaporisation des eaux de pluie qui pénètrent dans le terril en combustion, induisant une pression de vapeur qui agit sur la face inférieure de la partie non brûlée et la déstabilise.

La surface de discontinuité séparant les terrains brûlés et non brûlés constitue une surface de glissement en raison des caractéristiques mécaniques différentes des matériaux situés de part et d'autre : les schistes brûlés sont en effet plus résistants que les schistes imbrûlés, du fait de la cuisson prolongée du matériau et de l'augmentation de compacité qui en découle. A titre d'exemple, Monjoie et Schroeder (2001) citent le glissement de 2 000 m<sup>3</sup> du terril de la petite Bacnure (Belgique) qui s'est produit le long d'une surface de glissement en limite des schistes brûlés, ou celui du terril de l'Héribus survenu lors de fortes pluies estivales sous l'effet de la pression de vapeur exercée sous la surface de discontinuité entre les schistes brûlés et imbrûlés (Figure 16b).



a) Mécanismes de glissement

b) Glissement ouest du terril de l'Héribus

Figure 16. Exemples de glissement de terrils en combustion (Monjoie et Schroeder, 2001)

Il peut également apparaître des instabilités localisées, d'extension métrique, si la combustion migre de la surface vers l'intérieur du terril (Misz-Kennan et Tabor, 2015). On les appelle des « fosses à loup » (« wolf's pits »). Ce sont des cavités qui se forment dans les secteurs où la combustion est complète, et qui peuvent s'effondrer naturellement ou au passage d'une personne ou d'un engin. C'est malheureusement un type d'accident qui a été noté sur plusieurs terrils en combustion (voir plus loin).

#### 1.4.4 Néoformation de produits potentiellement polluants

La combustion déclenche une pyrolyse, c'est-à-dire une destruction thermique de la matière organique, qui conduit à la formation de nouveaux produits (Misz Kennan et Fabiańska, 2011 : voir Figure 10) :

- des produits liquides et semi-liquides, mélanges complexes de substances bitumineuses ;
- des produits solides qui sont des matières organiques fortement altérées thermiquement, des résidus plus ou moins complètement brûlés voire des minéraux néoformés.

La nature des matières organiques et minérales peut être modifiée lorsque les terrils subissent une combustion intense (Misz-Kennan et al., 2015a). L'ampleur de ces modifications dépend des propriétés des résidus (composition macérale et rang des matières organiques), de l'historique de l'échauffement (vitesse et durée), ainsi que du degré d'accès des matériaux à l'air et à l'humidité. On peut trouver des zones où la matière minérale est inchangée et d'autres où elle est complètement transformée, avec parfois l'apparition de phases minérales caractéristiques d'un métamorphisme à haute température (diopside, mullite, indialite). Soumis à l'altération climatique, d'autres phases minérales peuvent apparaître plus tardivement comme le gypse et d'autres sulfates.

Des minéraux néoformés peuvent également apparaître comme en Espagne (Leon) où il a été observé de la tschermigite  $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)\cdot 12\text{H}_2\text{O}$  ou de la boussingaultite  $(\text{NH}_4)_2\text{Mg}(\text{SO}_4)\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  en réponse à des interactions entre l'ammoniac libéré par la combustion de la matière organique, le soufre et l'eau (Ribeiro et al., 2016). Dans d'autres terrils houillers en combustion, on a trouvé du salammoniac ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), du gypse ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), de l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) et des sulfates hydratés de fer comme la coquimbite  $\text{AlFe}_3(\text{SO}_4)_6(\text{H}_2\text{O})_{12}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . En Ukraine, Panov et al. (1998) signalent la formation de chlorure d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), de réalgar (AsS) et de sulfates de magnésium et de fer. Il s'agit pour la plupart de minéraux solubles dans l'eau et donc susceptibles de donner des ions sulfates et/ou ammonium, potentiellement lessivables ou lixiviables.

En ce qui concerne les éléments traces métalliques, il est possible de citer l'exemple du terril de Bogside, édifié de 1860 à 1931 en Ecosse, et qui est entré en combustion en 2008 (Torrance et al, 2017). Actuellement, environ 45 % du terril a brûlé et il a été noté une tendance à un enrichissement des résidus en éléments traces métalliques à l'exception du chrome (Tableau 2).



Tableau 2. Analyse des éléments traces métalliques dans les résidus non brûlés (BOG1) et brûlés (DOD1-5) du terril de Bogside en Ecosse (Torrance et al., 2017)  
(les valeurs maximales atteinte pour chaque élément sont en gras)

	As ppm	Cd ppm	Cr ppm	Cu ppm	Fe ppm	Hg ppm	Mn ppm	Ni ppm	Pb ppm	Se ppm	Zn ppm
<b>BOG1</b>	<3	<5	<b>113</b>	49	35,000	bdl	184	37	20	bdl	93
<b>DOD1</b>	<b>63.4</b>	<b>6.3</b>	81.7	<b>71.1</b>	<b>56,632</b>	bdl	<b>205</b>	<b>37.2</b>	<b>328</b>	4.7	58
<b>DOD2</b>	2.3	3.9	77.6	39.0	28,303	<b>60.6</b>	171	26	55	29	100
<b>DOD3</b>	8.1	2.2	52	45	20,049	2.2	72.2	20.9	116	<b>224</b>	89
<b>DOD4</b>	1.8	2.9	50.9	21.7	25,774	0.6	191	22.1	26.2	3.4	<b>122</b>
<b>DOD5</b>	1.9	1.7	36	30.8	15,502	bdl	179	25.4	74.5	bdl	122

Le même constat a été fait au Portugal par Ribeiro et al. (2020) qui ont mis en évidence un enrichissement significatif des matériaux brûlés en certains éléments traces métalliques dont principalement As, Co, Cr, Cs, Li, Mo, Ni, Pb et V.

Dans les lysimètres<sup>8</sup> de suivi du terril en combustion de la mine d'Eliška (Pologne), on a observé la libération de petites quantités d'éléments traces métalliques, en particulier plomb et arsenic, lors de la dissolution des minéraux néoformés du groupe alunite-jarosite (Sýkorová et al., 2018). La jarosite est en effet abondante et instable dans les conditions qui prévalent après la combustion, induisant sa dissolution lente et sa conversion progressive en Fe-(hydro)oxydes solubles dans la couche superficielle du terril.

En Tchéquie, des tests de lixiviation réalisés sur des échantillons de charbon ont montré que les concentrations d'éléments potentiellement dangereux dans les lixiviats peuvent être très élevées, notamment en fonction du degré de combustion atteint (Křibek et al., 2017) : c'est ainsi le cas du cadmium et du plomb pour les lixiviats de charbon non brûlé, mais aussi du mercure pour ceux du charbon semi-brûlé, et des fluorures, des sulfates et du sélénium pour ceux de charbon brûlé.

En Chine, Zhao et al. (2008) a constaté un fort enrichissement du clinker par rapport aux résidus houillers imbrûlés en V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Sb, Tl, and U (avec un facteur d'enrichissement de 1,5 à 4,4), et un enrichissement modéré en Be, Se, Pb et Th : en revanche, le clinker est appauvri en F, Sn et Hg qui sont des éléments émis dans les fumées de combustion.

En Ukraine, la teneur moyenne des résidus houillers en mercure est de 0,185 mg/kg mais, lorsque ceux-ci brûlent, elle devient dix fois plus élevée (Panov et al., 1998).

Enfin, en Espagne (Cantabrie), des échantillons d'eau prélevés dans des ruisseaux en aval des terrils houillers d'El Bierzo ont révélé que Fe, K, Na, S, Ti, Nb, Re, Ta, Te et W sont enrichis dans les matériaux brûlés, tandis que Ca, Mg, P, Cd, Cu, Mn, Zn et les terres rares sont appauvris (Ribeiro et al., 2019).

## 1.5 Phénomènes dangereux ou impactants

Ces évènements redoutés peuvent conduire à des phénomènes dangereux pour les personnes ou les biens, ou impactants pour l'environnement. Dès les années 1970, McNay (1971) signale des accidents en lien avec des terrils en combustion : explosions en cours d'excavation, éboulements de versants, effondrements de cavités, brûlures, asphyxie... Il cite également des cas de pollution atmosphérique (nuisances olfactives, dégâts sur des arbres, formation de smog) et de pollution des cours d'eau qui coulent à proximité de tels terrils. Plus récemment, Paquette et Degas (2016) ont listé les nuisances et impacts potentiels liés à la combustion des terrils houillers :

- effets thermiques (brûlure de piétons, brûlure de petits animaux, inflammation de gaz de pyrolyse, incendie du couvert végétal) ;
- explosions et projections dues à l'inflammation de poussières et de gaz ;
- instabilités (éboulement de talus chauds avec épandage dynamique de type « nuées ardentes », tassement et affaissement de constructions implantées sur des remblais en combustion) ;

<sup>8</sup> Dispositif servant à mesurer et analyser les flux d'eau dans un sol .

- émanations de gaz asphyxiants et toxiques (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, NO<sub>x</sub>), de vapeurs acides corrosives (HCl, HF, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), d'odeurs (mercaptans, hydrocarbures, gaz sulfureux), présence d'éléments traces métalliques ou organiques dans les fumées (Hg, As, Pb, Zn, Cu, COV, HAP, BTEX dont benzène et toluène).

### 1.5.1 Effets thermiques

Le risque de brûlure directe existe mais il est rare. Il est dû à la présence de zones en combustion vive à faible profondeur sous la surface du terril (Figure 17). C'est ce qui est arrivé à deux enfants qui ont été sérieusement brûlés aux jambes en s'aventurant sur un terril en combustion en 1974 au Chambon-Feugerolles (Haute-Saône), l'un des deux étant décédé à la suite de ses blessures (Paquette et Degas, 2016). L'une des personnes-ressources contactées par le biais du questionnaire a également signalé, en Pologne, le risque de mort par brûlure ou intoxication de petits animaux tels que des rongeurs ou des gastéropodes (voir chapitre 2.5).

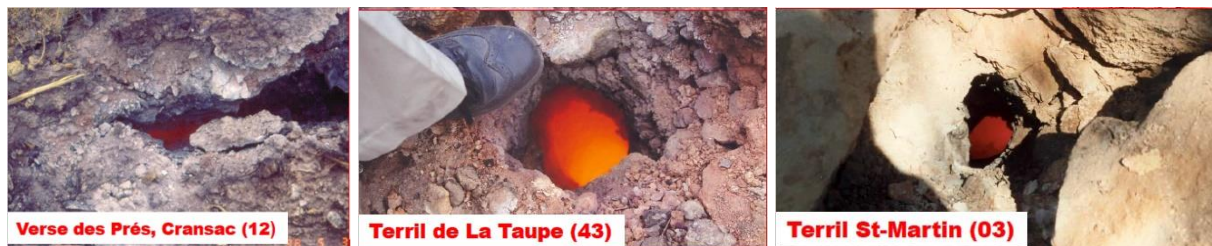


Figure 17. Zones en combustion sous la surface de terrils houillers (Paquette et Degas, 2016)

### 1.5.2 Explosions

Plusieurs explosions de terrils en combustion se sont déjà produites, notamment aux Etats-Unis où elles ont eu le plus souvent des conséquences graves (Harrington et Heast, 1948 ; McNay, 1971) : 13 morts lors d'une explosion à Sagamore (Virginie de l'Ouest), 9 morts dans deux explosions à Oakwood (Virginie de l'Ouest), 6 morts et 17 blessés dans l'Iowa suite à deux explosions, 2 morts en Alabama après l'éboulement d'un terril suite à une explosion, 1 blessé et des dégâts sur des habitations à Amherstdale après l'explosion puis l'effondrement d'un terril en combustion (Virginie de l'Ouest), etc.

En France, des explosions ont également été signalées sur plusieurs sites du Nord-Pas de Calais :

- dans l'arrondissement minéralogique de Douai, en 1962, une explosion s'est produite sur un terril plat en échauffement ; un chasseur fut grièvement brûlé et décéda ultérieurement ; on a supposé que la victime avait dû percer une cavité remplie de gaz pauvres en oxygène en marchant dessus, amenant ainsi une venue d'air frais qui a provoquant une déflagration ;
- Richards et al. (1993) citent plusieurs explosions sur le terril de la fosse 5 d'Auchel en 1930 (1 mort et 4 blessés graves), à Bruay-en-Artois en 1962 (1 mort), à Blignièrès en 1968 (7 blessés) et dans la Fosse 3 d'Auchel en 1973 (2 blessés) ;
- sur l'ancien terril houiller n°6 d'Auchel (avant la catastrophe de 1975 décrite au chapitre suivant), De Oliveira (1975) signale qu'il se produisait de temps en temps de petites explosions.

Ces explosions peuvent résulter de plusieurs causes : formation de gaz à l'eau, explosion de poussières créées par dynamitage (pour l'exploitation du clinker), percement par une excavatrice d'une poche de gaz explosifs, explosion d'une telle poche de gaz à la suite d'un éboulement, etc.

### 1.5.3 Instabilités

La combustion des matériaux se traduit par une réduction de volume qui peut atteindre 40 à 60 % lorsque la totalité du terril a brûlé. Ceci crée une subsidence, des fissures en surface ou des cavités en subsurface, à l'origine de diverses instabilités qui sont à l'origine de problèmes au cours de la réhabilitation de ces terrils (Mahananda, 2014).

### 1.5.4 Subsidence

A Brymbo, au nord du Pays de Galles (Royaume-Uni), un dépôt de résidus de charbon de plusieurs kilomètres de longueur et d'une dizaine de mètres de hauteur s'est formé depuis la fin du 19<sup>e</sup> siècle en bordure d'une voie ferrée qui servait à transporter du charbon depuis des mines (Nichol et Tovey, 1998).

Ce dépôt est en combustion depuis 1991, ce qui a créé une subsidence qui a atteint 1,2 m et provoqué l'instabilité de la route qui le traverse.

En France, à Fouquières-les-Lens (62), des instabilités se sont développées dans le terril n°83 autour des zones en combustion active, avec notamment l'apparition en surface d'une subsidence, d'affaissements circulaires et de fractures de tension (Masalehdani et Potvin, 2004). Dans le Nord, le terril 162 de la fosse Renard, à Denain, a été affecté par un tassement de 5 % du sommet de son cône, et par l'apparition de crevasses sous l'effet de la combustion (Paquette et Degas, 2016).

### 1.5.5 Effondrement localisé

Ce risque apparaît lorsque le feu consume localement beaucoup de matière charbonneuse et que les débris résiduels ne peuvent plus supporter le poids des couches susjacentes (Kim et Chaiken, 1993). L'expression d'un feu souterrain peut se traduire en surface par une légère dépression ou par un effondrement plus ou moins important, dont la taille varie de quelques centimètres à quelques mètres (voir Figure 17). Le danger réside surtout dans le risque de chute d'une personne ou d'un animal domestique dans l'orifice ainsi créé.

### 1.5.6 Glissement de terrain

Aux Etats-Unis, McNay (1971) liste 11 glissements de terrain survenus sur des terrils en combustion. Selon lui, environ 10 % des terrils de charbon étudiés représentent un danger potentiel pour les installations minières ou publiques proches, dans le cas où leur stabilité se détériorerait, car ils renferment pour la plupart plus de 400 000 m<sup>3</sup> de matériaux.

En Ukraine, un important glissement de terrain s'est produit en 1966 dans un terril de charbon en combustion de la ville de Nakhlovka dans la région du Donbass (Nádudvari et al., 2020a). Une partie du terril s'est ouverte et les matériaux se sont effondrés sur les zones habitées à la manière d'une éruption volcanique, ont déclaré les témoins. Plusieurs accidents similaires se sont également produits dans le bassin houiller de Donetsk.

Dans le Pas-de-Calais, Richards et al. (1993) citent plusieurs glissements de terrain à la suite d'une explosion de gaz sur le terril de la fosse 5 d'Auchel en 1930 (1 mort et 4 blessés graves), à Blignières en 1968 (7 blessés), dans la Fosse 3 d'Auchel en 1973 encore suite à une explosion de gaz (2 blessés). Mais c'est le glissement de terrain, suivi d'une explosion, qui s'est produit en 1975 sur l'ancien terril houiller n°6 d'Auchel qui a été le plus catastrophique (Masalehdani, 2013 ; De Oliveira, 1975). Ce terril était en cours d'exploitation pour l'extraction des schistes brûlés lorsque le creusement de son pied (Figure 18 à gauche) a provoqué le glissement de la masse sommitale instable au niveau de la discontinuité entre les matériaux brûlés et imbrûlés. Il s'en est suivi l'écroulement de plus de 11 000 m<sup>3</sup> de blocs de schistes et de cendres incandescentes, ce qui a créé un épandage de 0,30 à 1 m d'épaisseur sur 3 ha, tuant 5 personnes d'une zone résidentielle proche et en blessant 2 autres (Figure 18 à droite). La même catastrophe s'était déjà produite dans le bassin de Donetsk (Ukraine) dans les années 1930 où des immeubles de 3 étages auraient même été partiellement ensevelis (Thiery et al., 2013).



Figure 18. Vue du terril n°6 d'Auchel à Calonne-Ricouart avant (à g.) et après (à d.) son écroulement (Noter, sur la photo de gauche, la masse sommitale compacte de résidus brûlés, de couleur rougeâtre, à l'interface de laquelle s'est produit l'écroulement)



En Belgique, Nyssen et Vermeersch (2010) ont étudié les glissements de terrain de 6 terrils et constaté que pour 5 d'entre eux, ils étaient liés à des zones en combustion. Ce phénomène présente un danger potentiel pour les résidents locaux et les visiteurs (Nyssen et al., 2012). L'infiltration d'eau de pluie crée de la vapeur sous pression qui, combinée aux fortes pentes, peut déclencher des glissements de terrain. C'est pourquoi une étude a été réalisée, portant les anomalies de température ( $>0,5^{\circ}\text{C}$ ) et sur le gradient de pente ( $\geq 28^{\circ}$ ), afin de définir des seuils de sensibilité. Les résultats sont bien corrélés aux glissements de débris déjà observés car, sur la plupart des terrils, les zones susceptibles d'être affectées par des glissements de terrain sont celles où la température est supérieure à la moyenne et où les pentes sont fortes. L'étude détaillée de 11 glissements montre que les zones affectées ont une superficie moyenne de  $566 \text{ m}^2$  et un volume moyen de  $540 \text{ m}^3$ . Nyssen et al. (2012) citent les quelques exemples suivants :

- en 1992, après un orage intense, un brusque glissement de terrain a affecté le terril de l'Héribus ; un autre glissement, plus lent, s'est ensuite produit en 1994 ;
- en 1999, après une forte pluie, un glissement de débris de  $1344 \text{ m}^3$  a affecté le versant en combustion du terril de la Petite Bacnure à Herstal (Figure 19) ;
- en 2002, un glissement de débris s'est produit dans une zone brûlée du sommet du terril du Hasard, à l'est de Liège ;
- à des dates non précisées, des glissements sont survenus sur le versant ouest du terril des Quatre Jean à La Queue-du-Bois, sur le versant sud du terril Nord de Gilly, ou encore sur le flanc sud du terril de Saint-Charles 2 à Ransart.



*Légende : la flèche noire sommitale matérialise le départ du glissement et le trait jaune sa trajectoire.*

Figure 19. Glissement du flanc du terril de Petite Bacnure photographié en 2010 (Nyssen et al., 2012)

### 1.5.7 Emissions atmosphériques

#### Sur le plan sanitaire

Ce risque a été parmi les premiers à avoir été signalé sur les terrils en combustion (Hebley, 1956). En Pennsylvanie aux Etats-Unis (Sussman et Mulhern, 1964) ou en Afrique du Sud (Falcon ; 1986), la combustion des terrils houillers constitue un problème de pollution de l'air depuis le début de l'exploitation du charbon. La combustion du charbon et la volatilisation par pyrolyse d'éléments issus du charbon et des minéraux associés sont en effet susceptibles d'émettre des polluants atmosphériques (Querol et al. 2011) parmi lesquels des gaz potentiellement toxiques ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HCN}$ ) et d'autres éléments émis sous forme gazeuse ou particulaire, notamment des métaux provenant de la sublimation de certains minéraux (phénols,  $\text{N}_2$ ,  $\text{Ar}$ , HAP,  $\text{CS}_2$ ,  $\text{Hg}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Se}$ ).

Ainsi, au Royaume-Uni, la combustion du terril de Brymbo émet des gaz qui irritent le système respiratoire, surtout par temps calme et dans les bas-fonds (Nichol et Tovey, 1998). On notera en outre que tous ces gaz sont potentiellement asphyxiants dès qu'ils sont à même de réduire la teneur en oxygène de l'air respiré .

#### Sur le plan environnemental

Aux Etats-Unis, les gaz soufrés issus de la combustion de certains terrils causent de gros dégâts aux arbres et à la végétation alentours, particulièrement les jours de brouillard où il se forme alors des aérosols d'acide sulfurique (Harrington et Heast, 1948). Il est ainsi rapporté des cas de destruction de la végétation des jardins, voire d'altération des peintures et des cadres métalliques des fenêtres, jusqu'à  $5 \text{ km}$  de distance.

Autour d'un terril qui a pris feu en 1942 en Pennsylvanie, des riverains ont signalé dès 1945 la présence d'un épais brouillard qui blanchissait les feuilles des arbres. Un projet de reforestation de pins situé à environ 6,5 km du terril a même été affecté par ces gaz émis.

Toujours aux Etats-Unis, McNay (1971) signale que les 292 terrils en feu situés dans la moitié des états charbonniers du pays produisent des gaz qui, outre le fait qu'ils menacent la santé des riverains, endommagent la végétation et provoquent la détérioration de certaines structures et bâtiments alentour. Des fumées toxiques renfermant du H<sub>2</sub>S peuvent impacter certaines espèces végétales, voire de petits animaux qui recherchent la chaleur dégagée par l'échauffement du terril (Kim et Chaiken, 1993). La combustion du terril de Brymbo, au Royaume-Uni, émet des gaz qui créent des dégâts considérables à la végétation (notamment aux arbres) et corrodent le métal (Nichol et Tovey, 1998).

#### Sur le plan des émissions de gaz à effet de serre

Le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) a reconnu que la combustion spontanée et l'oxydation à basse température des résidus de charbon représentaient une source potentiellement importante d'émissions de gaz à effet de serre (Carras et al., 2009). Toutefois, en raison de l'absence de méthode de mesure, ces émissions ont simplement été notées dans les lignes directrices du rapport (IPCC, 2007). Ainsi, malgré leur ampleur potentielle, il n'existe pratiquement aucune donnée sur les émissions de gaz à effet de serre provenant de l'auto-échauffement et de la combustion des terrils houillers car la mesure directe de ces émissions est difficile du fait de la nature diffuse des émissions et de la grande échelle des sites miniers. Cette problématique est également mentionnée dans plusieurs autres pays charbonniers comme la Pologne (Misz Kennan et Fabiańska, 2011 ; Fabiańska et al., 2013), la France (Masalehdani et Potdevin, 2004 ; Thiery et al., 2013) ou l'Inde (Mahananda, 2014).

Néanmoins, quelques mesures ont pu être réalisées en Australie, dans cinq sites miniers de la vallée de la Hunter et six sites miniers du bassin de Bowen, comprenant des terrils avec et sans combustion (Carras et al., 2009). Les flux mesurés sont très variables d'un terril à l'autre avec jusqu'à 264 mg/m<sup>2</sup>/s de CO<sub>2</sub> et 4,7 mg/m<sup>2</sup>/s de CH<sub>4</sub>. En convertissant le CH<sub>4</sub> en équivalent CO<sub>2</sub>, on obtient des émissions allant jusqu'à 287 mg/m<sup>2</sup>/s sur les terrils en combustion alors que les autres émettent à peu près autant qu'un sol naturel (Tableau 3).

*Tableau 3. Émissions de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>-équivalent (CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> converti) de quelques terrils houillers du bassin de Bowen en Australie (Carras et al., 2009)*

	CO <sub>2</sub> (mg s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	CH <sub>4</sub> (mg s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	CO <sub>2</sub> -e (mg s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )
<i>Category 1 – high emissions</i>			
Number of measurements=9			
Minimum	23	0.0	23
Maximum	264	4.7	287
Average	95	0.8	111
RMS deviation	69	1.4	92
<i>Category 2 – moderate emissions</i>			
Number of measurements= 15			
Minimum	0.1	0.0	0.1
Maximum	8.5	0.2	9.4
Average	3.1	0.03	3.8
RMS deviation	2.5	0.1	3.2
<i>Category 3 – low emissions</i>			
Number of measurements=47			
Minimum	0.0	0.0	0.0
Maximum	11.0	0.0	11.0
Average	1.5	0.0	1.5
RMS deviation	2.8	0.0	2.8

Note that the CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> values do not necessarily correspond; hence the CO<sub>2</sub>-e may not be the sum of the CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> shown.

Ces valeurs sont toutefois fonction de plusieurs paramètres dont la température de surface des terrils et leur teneur en matière carbonneuse (Figure 20). A l'échelle des 11 sites étudiés, les émissions mesurées et converties en équivalent-CO<sub>2</sub> représentent entre 101 kg/m<sup>2</sup>/an pour un terril en auto-échauffement et jusqu'à 3 500 kg/m<sup>2</sup>/an pour un terril en combustion active.

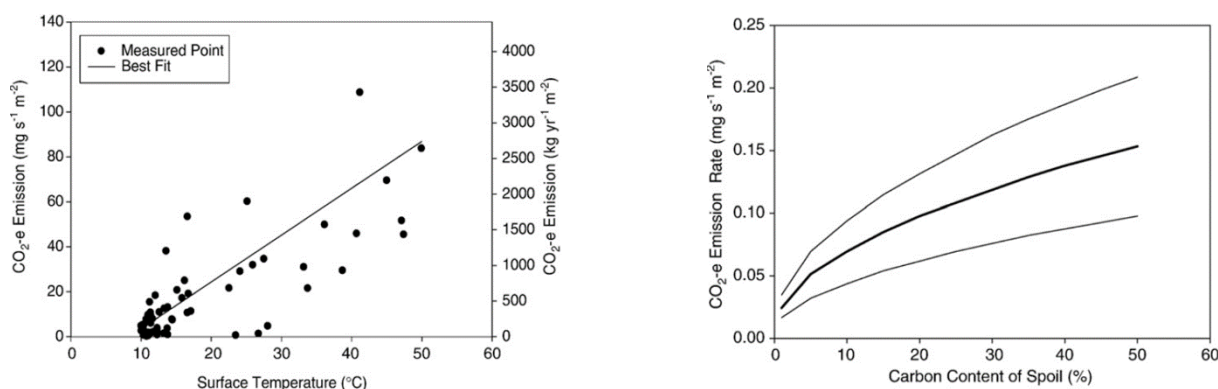


Figure 20. Evolution des émissions d'équivalent-CO<sub>2</sub> en fonction (à gauche) de la température de surface des terrils et (à droite) de leur teneur en charbon (Carras et al., 2009)

Aux Etats-Unis, les émissions de gaz à effet de serre ont été suivies sur des feux de mines souterraines de charbon du Wyoming mais aussi sur des feux de terrils de l'Alabama (Engle et al., 2012). Les feux de terrils les plus intenses émettent un flux moyen de CO<sub>2</sub> de 260 mg/s/m<sup>2</sup>, et les plus faibles autour de 3 mg/s/m<sup>2</sup> (Tableau 4), valeurs comparables à celles précédemment mentionnées pour l'Australie

Tableau 4. Comparaison des flux totaux de CO<sub>2</sub> émis par les feux de mines de charbon aux Etats-Unis et par les feux de terrils (gob piles) en Australie (Engle et al., 2012)

Fire	Area (ha)	Total CO <sub>2</sub> flux (mg/s/m <sup>2</sup> )	Estimate type	Notes	Coal rank	Source
Hotchkiss, Wyoming USA	4.7	0.90-1.1	Diffuse only	Mine fire	Subbituminous	This study
Welch Ranch, Wyoming, USA	1.7	1.9-6.0	Airborne and ground-based	Mine fire	Subbituminous	Engle et al. (2011)
Ankney, Wyoming, USA	0.58	25-780	Airborne and rate of fire advance	Outcrop fire	Subbituminous	This study
North, Colorado, USA	- 5.3	0.28-0.51	Subsidence rate, chimney modeling, and ground-based	Outcrop fire	High volatile bituminous (?)	Ide and Orr (2011)
Mulga, Alabama, USA	9.1	27-48	Diffuse only	Gob pile fire	Low volatile bituminous	Engle et al. (2011)
Combusting coal mine spoil with active gas venting	-	260 ± 290 <sup>a</sup>	Diffuse only	-	Bituminous	Carras et al. (2009)
Combusting coal mine spoil with no signs of venting	-	3.0 ± 4.1 <sup>a</sup>	Diffuse only	-	Bituminous	Carras et al. (2009)
Coal mine spoil with no signs combustion	-	0.4 ± 0.6 <sup>a</sup>	Diffuse only	-	Bituminous	Carras et al. (2009)

<sup>a</sup> Sum of diffuse CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>, in terms of equivalent CO<sub>2</sub> greenhouse impact.

### 1.5.8 Pollution des eaux et des sols

Les terrils en combustion sont susceptibles de renfermer des produits potentiellement polluants pour les eaux et les sols, que ce soit au cours de leur édification (schistes houillers, déchets divers d'origine non minière), de leur évolution (oxydation des sulfures, mise en place d'un drainage minier<sup>9</sup>) ou de leur combustion (minéraux néoformés). L'exemple le plus étudié est celui des sulfures métalliques, majoritairement de la pyrite, qui peuvent être oxydés en sulfates et/ou en acide sulfurique lors de l'infiltration et de la percolation des eaux météoriques : cette acidification peut alors lixivier des métaux lourds et les faire migrer vers les eaux de surface ou dans les sols ou les nappes phréatiques (Denimal et al., 2002).

En Pologne (Haute-Silésie), les nombreux terrils en combustion ont contribué à la pollution des sols, de la végétation et des eaux superficielles et souterraines. Au Portugal (Douro), l'impact environnemental associé aux terrils de charbon en combustion est dû aux HAP natifs qui, présents dans les résidus miniers, peuvent être libérés dans les sols, les sédiments, les eaux souterraines, les eaux de surface et dans l'environnement, affectant la biodiversité (Ribeiro et al., 2012). En France (Nord et Pas de Calais), il existe un risque que les produits issus des terrils en combustion polluent les sols et les nappes phréatiques (Masalehdani et Potdevin, 2004).

#### Impact sur les sols

Les sols sous-jacents aux terrils ou situés à proximité ont été peu étudiés. Pour Aditya (2015), leurs propriétés physicochimiques changent dans les zones de terrils en combustion où ils se transforment

<sup>9</sup> Apparition de lixiviats acides résultant de l'oxydation des sulfures par action de l'air et de l'eau.

en sols brûlés jaunis. Fragiles, ils s'effritent facilement, sont très pauvres en matière organique et ne renferment que peu de microorganismes vivants.

En Ukraine (Donbass), on observe une contamination des sols due au lessivage des sels solubles présents à la surface des terrils brûlés (Sleptsov, 2020). Cela représente un danger pour l'environnement car on y a identifié des éléments très toxiques (As, Sb, Hg, Be, Pb), moyennement toxiques (P, Cr, Co, Ni, Cu, V) et légèrement toxiques (F, Mn). Pour Panov et al. (1998), les terrils en combustion polluent les sols en Hg, As, Pb et Zn.

#### Impact sur les eaux superficielles

Pour Lewińska-Preis et al. (2020), il existe une relation nette entre l'activité thermique des terrils houillers de plusieurs régions du monde et les concentrations en éléments traces et en ions métalliques des eaux qui en sont issues. Par ailleurs, les eaux des terrils déjà brûlés seraient plus concentrées que celles des terrils en combustion active.

Aux Etats-Unis, 97 % des 118 terrils en feu dans les années 1970 ont pollué des cours d'eau qui coulaient à proximité (McNay, 1971). On mentionne le même phénomène en Chine où certains composés très solubles peuvent être lessivés lors des pluies avec un impact environnemental sur les sols et les eaux alentour (Querol et al., 2011) : il s'agit surtout de minéraux issus de la précipitation de condensats des émissions gazeuses provenant de la combustion du charbon, les plus importants étant les sulfates de calcium et d'ammonium, mais aussi le soufre et le chlorure d'ammonium, ainsi que des composés renfermant Hg, As, Pb et Se.

En Pologne (Haute-Silésie), Misz-Kennan et Fabiańska (2011) ont étudié les effets de la lixiviation sur la fraction bitumineuse des résidus issus de l'auto-échauffement. Des métaux lourds et des composés organiques (phénols et dérivés alkylphénoliques) sont susceptibles de se dissoudre dans l'eau et d'être exportés des terrils. C'est aussi le cas des hydrocarbures aromatiques qui sont cependant moins solubles dans l'eau, sauf le naphthalène et ses dérivés (méthyl-naphthalènes, diméthyl-naphthalènes, alkyl-naphthalènes), ainsi que des alkylphénanthrènes.

En Espagne (Cantabrie), des échantillons d'eau ont été prélevés dans la région d'El Bierzo dans des rivières recueillant des rejets de terrils houillers en combustion, dans un ruisseau influencé par d'autres infrastructures minières que les terrils et dans des ruisseaux non impactés par des activités minières (Ribeiro et al., 2019). Les concentrations les plus élevées de Al, Cd, Co, Cu, Mn, U, Y et Zn, ont été mesurées dans les échantillons prélevés à l'aval des eaux issues des terrils en combustion.

En Tchéquie (Oslavany), l'eau de pluie qui lessive les terrils brûlés interagit avec les minéraux néoformés et se charge en Ca, Mg, Ba, Mn, Zn, Na, K, SO<sub>4</sub> et, dans une moindre mesure, en Ba, Mn et Zn (Dokoupilova et al., 2007). En revanche, le fer est piégé dans des minéraux néoformés insolubles (goéthite, hématite), ce qui permet de limiter le développement d'un drainage minier acide.

Enfin, en Ukraine, des anomalies de concentration des eaux en mercure, en arsenic et en zinc sont signalées dans les zones où brûlent des terrils de charbon (Panov et al., 1998).

#### Impact sur les eaux souterraines

Les risques de pollution des eaux souterraines par des terrils en combustion sont mentionnés dans plusieurs pays charbonniers : Afrique du Sud (Falcon, 1986), France (Thiery et al., 2013), Pologne (Sýkorová et al., 2018), Ukraine (Sleptsov, 2020)... et plus globalement en Europe (Karamfilova, 2017).

Les tests de lixiviation réalisés en laboratoire en Tchéquie ont montré que, en référence à la directive européenne sur les déchets inertes (2003/33/CE), les valeurs médianes de relargage dans les lixiviats d'échantillons de charbon non brûlé dépassent les limites fixées pour le cadmium (6,6 mg/kg contre 0,04 mg/kg) et le plomb (1795 mg/kg contre 0,5 mg/kg) mais celles de l'échantillon semi-brûlé, la dépassent également pour le pH (5,09 contre  $\geq 6$ ) et le mercure (0,9 mg/kg contre 0,01 mg/kg), et celles des échantillons brûlés la dépassent en sulfates (>1500 contre 1000 mg/kg), fluorures (>23 mg/kg contre 10 mg/kg) et sélénium (30 mg/kg contre 0,1 mg/kg). Certains éléments dépassent même les limites fixées pour les déchets dits dangereux (voir Tableau 5), comme le cadmium, le plomb ou le sélénium. Sur le site de la mine d'Eliška (Tchéquie), des lixiviats de divers terrils ont été analysés par Sýkorová et al. (2018). Par rapport aux terrils non brûlés, ceux en combustion génèrent en effet des lixiviats acides (pH<6) avec des concentrations plus fortes en sulfates (jusqu'à 218 mg/L), aluminium (jusqu'à 38 mg/L), zinc (jusqu'à 236 µg/L) et manganèse (jusqu'à 337 µg/L). Des tests de lixiviation et de percolation réalisés en laboratoire sur ces résidus houillers ont atteint des pH inférieurs à 6, qui est la limite permise par la directive européenne 2003/33/CE, ainsi que des dépassements de ces mêmes limites pour le cuivre, le mercure ou le cadmium (Tableau 5). Toutefois, ce terril ayant pris feu dans les

années 1960, une partie des éléments toxiques a dû être mobilisée peu de temps après, ce qui expliquerait que la concentration de certains d'entre eux soit maintenant relativement faible dans les lixiviats échantillonnés, à quelques exceptions près (Cu, Cd, Hg). En revanche, la couche superficielle de ce terril, enrichie en condensats d'hydrocarbures, est maintenant devenue une source de phénols et de mercure, celui-ci ayant été libéré lors de la dissolution du cinabre (HgS).

*Tableau 5. Analyse des éléments traces métalliques des lixiviats des tests de percolation et de lixiviation des résidus du terril en combustion de la mine d'Eliška (mg/kg) (Sýkorová et al., 2018).*

Sample	Description/sampling depth (cm)	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
Batch leaching tests												
S-Kr-6	Hydrocarbon condensates-rich surface sample/0-10	0.06	0.02	2.6	0.7	0.1	0.07	0.004	0.003	0.6	0.02	0.7
S-Kr-7	Argilite/20-40	0.1	0.02	0.08	2.2	0.02	0.046	0.0008	0.07	0.5	0.0004	0.2
S-Kr-8	Clinker/70-80	0.008	0.03	0.08	0.7	0.007	0.027	0.002	0.005	0.8	0.0004	0.1
S-Kr-9	Clinker with coke particles/90-100	0.0002	0.08	0.02	0.9	0.0002	0.044	0.001	4.5	0.4	0.0004	0.03
Percolation leaching test												
PER-Kr-10	Hydrocarbon condensates-rich surface sample/0-25	0.01	0.02	0.03	0.3	0.1	0.07	0.01	0.003	0.3	1.3	0.03
European Union limit values for inert waste.		0.5	0.4	2	4	0.5	0.1	0.5	0.04	20	0.01	0.5
European Union limit values for hazardous waste.		70	40	100	200	25	7	30	5	300	2	50

### 1.5.9 Nuisances diverses

Deux types de nuisances sont cités par les riverains des terrils en combustion : les nuisances olfactives et les brumes et brouillards induits par les fumées. Ces deux phénomènes sont souvent liés car ils proviennent tous deux de l'insuffisante dispersion des gaz et fumées aux alentours d'un terril.

En ce qui concerne les odeurs, la combustion des résidus houillers produit également des distillats de charbon, des mercaptans ou de l'hydrogène sulfuré qui sont des composés odorants (Kim et Chaiken, 1993). Ainsi, dès 1945, les riverains d'un terril houiller de Pennsylvanie (Etats-Unis) signalent la présence d'un brouillard « irrespirable » à cause de son odeur nauséabonde jusqu'à 5 km de distance (Harrington et Heast, 1948). C'est pourquoi le Département de la Santé de Pennsylvanie a mentionné les odeurs comme des nuisances liées aux terrils en combustion (Sussman et Mulhern, 1964). A la même époque, les mêmes types de plaintes sont enregistrées au Royaume-Uni ou en Pologne (Misz Kennan et Fabiańska, 2011).

En 2014 en Pennsylvanie (Etats-Unis), la fumée et l'odeur d'un terril d'antracite en feu ont atteint plusieurs villes dont Simpson et Carbondale dont les habitants se sont plaints (The Associated Press, 2019). Cependant, lorsque les responsables de la protection de l'environnement sont venus réaliser des mesures, ils ont déclaré que la qualité de l'air était bonne<sup>10</sup>.

Aux Etats-Unis, dans les années 1970, les terrils situés à flanc de relief représentaient 60 % des terrils en feu à l'époque, et leurs émissions pouvaient incommoder des habitants situés jusqu'à 8 km de distance (McNay, 1971). Cependant, les cas les plus graves concernaient les terrils en feu édifiés en fond de vallée, soit 32 % de l'effectif. C'est ce type de phénomènes qui s'est produit au terril de la carrière Simon à Schœneck (Moselle) dont les abondantes fumées de combustion ont envahi les bas-fonds adjacents lors des périodes hivernales d'inversion thermique<sup>11</sup> (Paquette et al., 2002). Cela a plusieurs fois créé un brouillard matinal, chargé de fumées de combustion nauséabondes, qui débordait de la carrière et s'étendait alentour (Figure 21). Pour y mettre un terme, il a fallu confiner l'intégralité du terril.

<sup>10</sup> C'est ce qui différencie les nuisances olfactives de la pollution atmosphérique, les composés les plus nocifs comme le CO ou les HAP étant souvent inodores (Misz Kennan et Fabiańska, 2011).

<sup>11</sup> Phénomène météorologique par lequel une couche d'air froid se trouve au ras du sol sous une couche d'air plus chaud. Certains polluants peuvent être piégés sous l'air chaud et s'accumuler dans l'air froid.





a) Le terril en arrière-plan et la carrière au 1er plan      b) Envahissement de la carrière par les fumées

Figure 21. Vues du terril de la carrière Simon à Schœneck et des brouillards matinaux de fumées (Paquette et al., 2002)

En ce qui concerne les fumées, Denoël (1949) cite le cas d'un terril de 4 ha en combustion au Royaume-Uni qui a été traité par recouvrement de cendres : cela a permis de supprimer les flammes mais pas les fumées qui, par moments, ont réduit la visibilité sur une grande route voisine. Aux Etats-Unis, ce phénomène est mentionné comme une nuisance par le Département de la Santé de Pennsylvanie (Sussman et Mulhern, 1964). Il est ainsi signalé le cas d'une autoroute bordant une zone de terrils où de nombreux accidents sont survenus à cause de la fumée dégagée (Figure 22). En outre, pendant les périodes de précipitations ou de forte humidité atmosphérique, la formation de smog a pu gêner la circulation routière et créer un danger pour la sécurité des automobilistes (McNay, 1971). C'est ainsi qu'en Alabama (Etats-Unis), après qu'un terril houiller ait pris feu en 2006, plusieurs accidents sont survenus à cause des brouillards matinaux occasionnés par les fumées (Stracher, 2010). Pour résoudre ce problème, le terril a dû être recouvert par 1 m de terre.

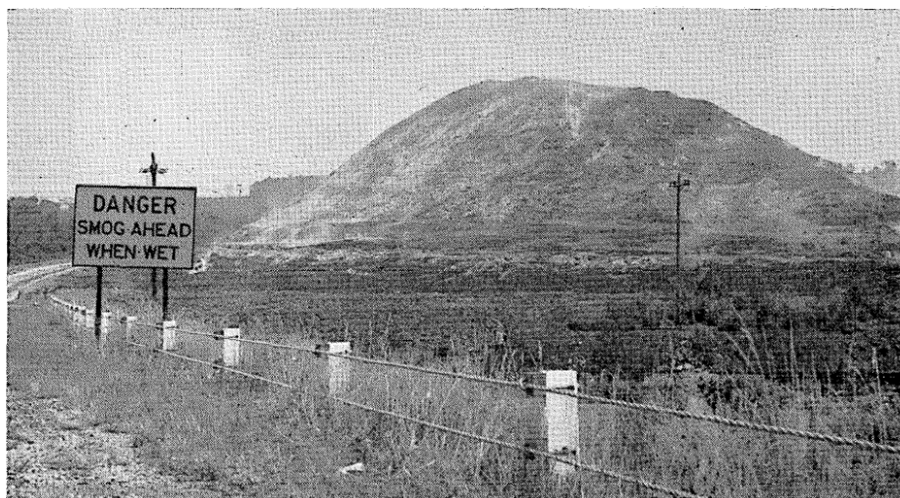


Figure 22. Limitation de visibilité due aux fumées récurrentes d'un terril en feu aux Etats-Unis (Sussman et Mulhern, 1964)

(Le panneau mentionne : « Danger, risque de SMOG en période humide »)

**À retenir :** Les mécanismes initiateurs de l'autoéchauffement d'un terril houiller peuvent être de nature externe (foudre, feu, court-circuit...) ou internes (réactions exothermiques d'oxydation et d'hydratation), et aggravés par des facteurs intrinsèques (nature du charbon, teneur en pyrite) ou extrinsèques (hauteur et forme du terril, conditions météorologiques). Ils peuvent conduire à des événements redoutés comme l'apparition de zones chaudes, l'émission de gaz et de fumées, des mouvements de terrain ou la néoformation de produits potentiellement polluants. Ces événements peuvent ensuite conduire à des accidents (brûlures, intoxication, asphyxie, explosion, ensevelissement), à des pollutions (air, eau, sol, gaz à effet de serre) ou à diverses nuisances (odeurs, fumées).

## 1.6 Principales méthodes de mitigation

### 1.6.1 Généralités

Le Tableau 6 et l'Annexe 4 recensent les principales méthodes de mitigation préconisées et qui ont porté leur fruit dans le cadre de l'extinction de terrils en combustion. Il s'agit :

- du recouvrement ou encapsulation du terril avec des matériaux destinés à réduire le flux d'air entrant (Zhai et al., 2017) ; il doit s'agir de matériaux ininflammables (argiles, loess, cendres volantes, poussières de calcaire ou de schistes...) ou antipyrrogéniques (NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MnCl<sub>2</sub>...), disponibles en grandes quantités et à faible coût ;
- de l'isolation des parties en feu par le creusement de tranchées qui peuvent être remplies de l'un des matériaux précédemment cités (généralement un mélange eau-cendres, éventuellement des argiles humides) ; cette méthode serait surtout efficace dans le cas des petits terrils plats (Ciesielczuk, 2015a) ;
- de la mise à nu des zones en combustion, appelée « défournement », voire du démantèlement complet du terril ;
- de l'injection profonde, via des sondages, 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...), dans le but de combler les crevasses et les vides, et de réduire l'accès à l'air des zones en combustion ;
- de l'aspersion ou de la pulvérisation d'eau à la surface du terril, en excluant tout apport rapide et massif d'eau (voir ci-dessous) ; l'objectif est ici de refroidir la surface (éventuellement pour permettre la circulation d'engins) et d'y former peu à peu une croûte étanche à l'air ;
- du déplacement des matériaux en combustion sur un autre site, suivi de leur compactage (éventuellement en y incorporant des matériaux ininflammables, voire en les refroidissant à l'eau) ; pour les petits terrils, le compactage *in situ* est une variante de cette méthode ;
- de diverses autres méthodes qui ont eu un certain succès sur quelques sites comme le refroidissement et/ou l'inertage des zones en combustion par l'injection de gaz inertes (CO<sub>2</sub>), l'isolation des flancs du terril avec ensemencement de la végétation, ou encore le brûlage contrôlé des terrils par post-combustion ; concernant cette dernière méthode, elle n'est à employer qu'en dernier ressort, après l'échec des méthodes précédentes, car il s'agit tout bonnement de laisser brûler le terril tout en maîtrisant les gaz et fumées émis (par exemple en réoxygénant le terril par un système de tuyaux puis en l'enserrant dans un sarcophage).

On notera en outre qu'il est possible de prendre les mesures suivantes en cours d'édification d'un terril pour limiter le risque d'autoéchauffement :

- intercalation de matériaux incombustibles (cendres volantes) au sein des résidus houillers ;
- mise en place de tuyaux afin de permettre le refroidissement du terril avec un gaz neutre.

Tableau 6. Méthodes préconisées d'extinction ou de contrôle des terrils en combustion

Méthode	Pays	Référence
Recouvrement /Encapsulation du terril avec des matériaux ininflammables ou antipyrrogéniques	Pologne, Chine, Afrique du Sud, Etats-Unis, Royaume-Uni, Chine, Inde, Espagne, Pologne, France	Ciesielczuk (2015a), 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), Ciesielczuk (2015a), Paquette et al. (2002)
Isolation des parties en feu par creusement de tranchées, éventuellement remplies d'un coulis	Pologne, Chine, Royaume-Uni, Etats-Unis	Ciesielczuk (2015a), Zhai et al. (2017), Gogola et al. (2020), Nichol et Tovey (1998), Harrington et Heast (1948), Richards et al. (1993), Paquette et Degas (2016)
Mise à nu des zones en combustion (défournement) ou démantèlement complet du terril	Pologne, Chine, Afrique du Sud, Etats-Unis, Royaume-Uni, France	Ciesielczuk (2015a), 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)
Injection profonde d'un coulis en forages	Pologne, Chine, Afrique du Sud, Royaume-Uni, Etats-Unis, Allemagne, France	Ciesielczuk (2015a), 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)
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)
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)
Refroidissement/Inertage avec des gaz inertes (CO <sub>2</sub> )	Pologne	Gogola et al. (2020), Nalbandian (2010)
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 (2015a), Gogola et al. (2020), Misz-Kennan et Tabor (2015)

## 1.7 Note sur l'arrosage intensif d'un terril en combustion avec de l'eau

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. Dans le cas des feux de terrils, hormis lorsqu'ils n'affectent que de petits terrils, cette méthode s'est généralement avérée inefficace, lorsqu'elle n'a pas été un facteur aggravant en raison notamment de la formation de gaz à l'eau, explosif et inflammable, ou du risque d'explosion de poches de vapeur d'eau (Ciesielczuk, 2015a ; IMTE, 2006). En outre, l'eau envoyée sous pression risque de provoquer l'érosion de la surface des terrils, ce qui facilite alors l'entrée d'air. 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, mais sans succès (ARIA, 2004).

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) ;
- 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 23).

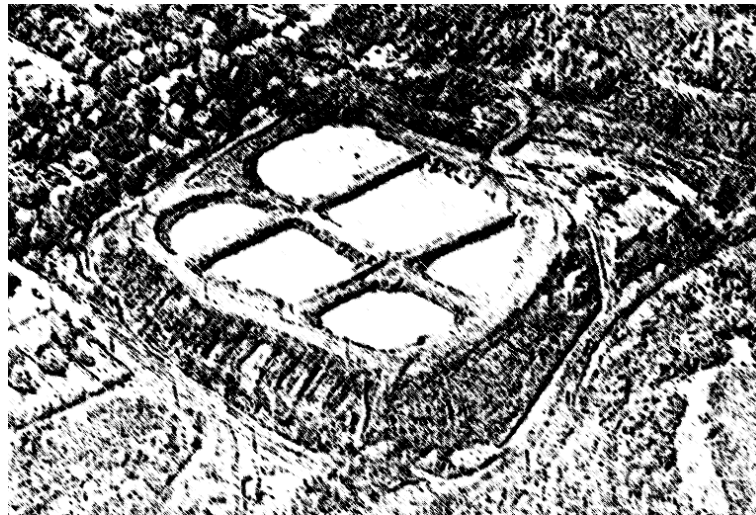


Figure 23. Traitement en rizière d'un terril de charbon en combustion (McNay, 1971)

*À retenir : la tentative d'extinction d'un feu de terril par des moyens classiques (aspersion massive d'eau) est généralement vouée à l'échec et peut même s'avérer dangereuse. Selon les sites, diverses méthodes de mitigation ont fait leurs preuves : recouvrement par des matériaux peu perméables et ininflammables, isolation des parties en feu par des tranchées, injection profonde de divers produits liquides, pulvérisation d'eau à la surface du terril pour y former une croûte, ou encore défournement total ou partiel.*

## 2 SECONDE PARTIE : ACQUISITION DE NOUVELLES DONNEES SUR L'AUTOECHAUFFEMENT DES TERRILS HOUILLERS

Ce chapitre présente des données chiffrées concernant la problématique d'autoéchauffement ou de combustion des terrils houillers dans le monde. Ces données proviennent de l'analyse bibliographique précédemment réalisée, qui porte sur 280 documents issus de 22 pays, et des réponses obtenus à l'envoi d'un questionnaire à 140 personnes-ressources résidant dans 29 pays.

### 2.1 Synthèse des données bibliographiques

### 2.2 Documents consultés

La recherche bibliographique a porté sur les mots-clés suivants :

- « terril » et ses nombreuses traductions anglaises « heap », « dump », « spoil », « gob », « slag » ;
- « charbon », « houille », « lignite » et leur traduction anglaise « coal » et « lignite » ;
- « feu », « combustion », « échauffement » et leur traduction anglaise « fire », « heating », « combustion » (ainsi que « autoéchauffement », « autocombustion », « self-heating » et « self-combustion »).

Les documents ont été recherchés directement sur internet ainsi que sur les bases de données d'articles scientifiques disponibles à l'Ineris. Au total, 242 documents ont été trouvés concernant 22 pays – parmi les 70 pays charbonniers existant dans le monde – plus 38 traitant d'études internationales, comme des résultats de modélisation ou d'expériences de laboratoire (Figure 24). Il a finalement été pris en compte environ une centaine de documents concernant des autoéchauffements ou combustions de terrils houillers et, quelquefois, de tas de charbon pur.

Les pays les plus représentés dans ce domaine sont la Pologne (75 références), la Chine (37 références), la France (24 références) et les Etats-Unis (19 références). Malgré sa place modeste dans le concert des états charbonniers, la France est bien représentée du fait de sa forte implication dans l'après-mine, dont le devenir des terrils représente un volet.

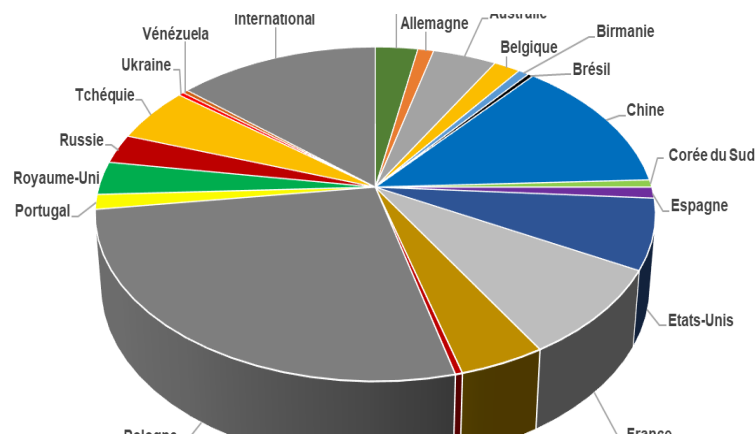


Figure 24. Pays les plus référencés en matière d'autoéchauffement ou de combustion du charbon

### 2.3 Effectif mondial de terrils houillers en autoéchauffement ou en combustion

Au final, ce travail a permis de recenser plus de 4 000 terrils houillers en autoéchauffement ou en combustion dans les pays étudiés qui ne représentent qu'un tiers des pays charbonniers du monde (Figure 25 et Annexe 5). En première approximation, on pourrait donc évaluer à environ 12 000 le



nombre total de terrils houillers en autoéchauffement ou en combustion connus dans le monde. En réalité il doit en exister – ou en avoir existé – plus que cela car la synthèse bibliographique nous apprend que tout empilement d'une certaine hauteur de matériaux poreux et combustibles entre fatalement en autoéchauffement, même si cela ne débouche pas forcément sur une combustion visible. Ainsi, la quasi-totalité des anciens terrils ont probablement dû brûler, car ils étaient mal triés et mal édifiés, et quelques pourcents des terrils modernes sont actuellement en combustion connue, le chiffre de ceux en autoéchauffement « invisible » étant probablement supérieur.

La plupart des terrils étudiés ou cités se trouvent dans des pays qui ont abandonné l'exploitation du charbon ou sont en voie de le faire, comme le Royaume-Uni (34 % des terrils recensés), l'Espagne (14 %) ou la France (12 %). En revanche, les données font souvent défaut dans les pays actuellement producteurs de charbon comme la Chine (1<sup>er</sup> producteur mondial de charbon mais seulement 9 % des terrils recensés ici) ou les Etats-Unis (3<sup>e</sup> producteur mondial mais seulement 14 % des terrils recensés). Il en va de même de l'Inde, de l'Australie, de l'Indonésie, de la Russie, de la Pologne ou de l'Allemagne qui sont dans le top 10 des producteurs mondiaux mais qui ne comptabilisent chacun tout au plus que 1 % des terrils recensés dans ce travail.

Il est donc difficile d'estimer le nombre de terrils existants dans le monde, et encore plus le nombre de ceux qui sont en autoéchauffement ou en combustion. Le cas de la France et de la Belgique, qui furent d'anciens pays charbonniers mais peu producteurs, est intéressant : ces deux pays renferment environ un millier de terrils chacun, alors que la Pologne, qui a extrait environ dix fois plus de charbon, n'en aurait que 226 ou que la Chine, qui en a extrait près de cent fois plus, en compterait à peine plus de 1 500 (Zhao et al., 2008). Ainsi, pour estimer le nombre réel de terrils houillers existants dans le monde, on peut se baser sur deux exemples :

- celui, bien étudié, des bassins miniers du Nord-Pas de Calais (France) et du Royaume-Uni où un terril a été édifié en moyenne tous les 6 Mt de charbon extrait depuis le 19<sup>e</sup> siècle ;
- celui de la Chine où Zhao et al. (2008) considèrent que les résidus miniers représentent 10 à 15 % de la production de charbon, laquelle est de l'ordre de 800 à 1 200 Mt par an ; par ailleurs, ces auteurs citent le cas de la province du Shanxi où 108 terrils houillers représentent 1,1 Gt de résidus, soit environ 10 Mt par terril

Sachant que la production mondiale de la dernière décennie a été de 7 900 Mt/an en moyenne, ce rythme équivaldrait à l'édification de 790 à 1 300 nouveaux terrils par an, dont près de la moitié pour la seule Chine. En prenant une fourchette de 1 à 10 % de terrils en autoéchauffement ou en combustion, on aurait quelques dizaines à centaines de terrils affectés par an, c'est-à-dire quelques milliers à dizaines de milliers sur un siècle.

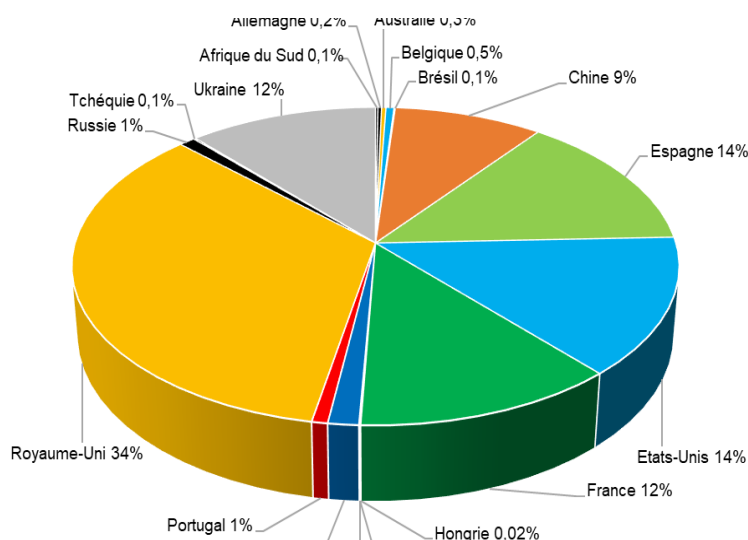


Figure 25. Terrils en autoéchauffement ou en combustion par pays (par rapport à l'effectif total)

## 2.4 Dimension moyenne d'un terril houiller

La base de données ne renferme que 172 terrils houillers (en autoéchauffement ou en combustion) dont les dimensions sont mentionnées. Leurs caractéristiques moyennes sont les suivantes :

- une hauteur de 54 m avec des extrêmes allant de 1 à 134 m ;
- une surface de 25 ha avec des extrêmes allant de 0,02 à 134 ha ;
- un volume de 5 Mm<sup>3</sup> avec des extrêmes allant de 0,3 à 42 Mm<sup>3</sup> ;
- une masse de 8 Mt (sur la base d'une densité de 1,6) avec des extrêmes allant de 0,5 à 65 Mt.

Ces valeurs ne sont toutefois que des ordres de grandeur car les histogrammes montrent que leurs distributions ne sont pas normales, avec une surreprésentation des premières classes de chaque paramètre (Figure 26). Ainsi, il apparaît que la hauteur la plus fréquente d'un terril houiller serait plutôt inférieure à 20 m pour une surface inférieure à 20 ha et une masse inférieure à 2 Mt.

Note : le faible effectif des classes ne permet pas d'obtenir une meilleure précision.

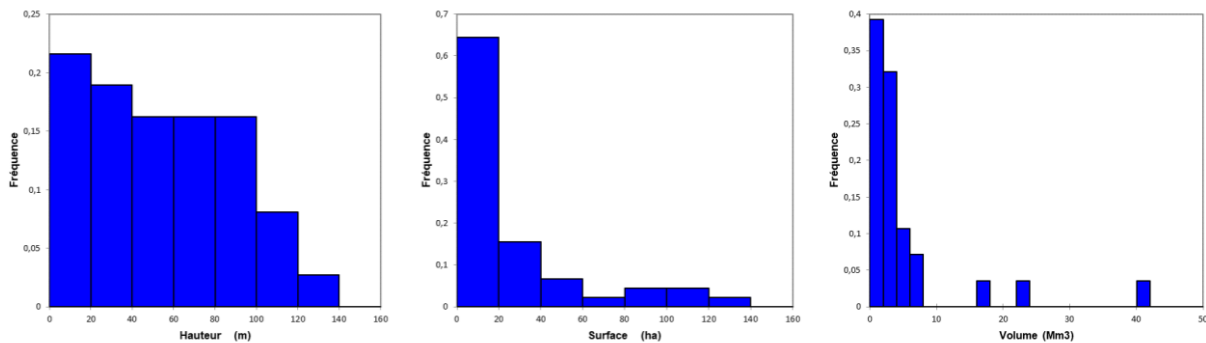


Figure 26. Dimensions caractéristiques des terrils houillers en autoéchauffement ou en combustion

*À retenir : l'analyse bibliographique d'articles scientifiques et de rapports a concerné une vingtaine de pays, soit environ le tiers des pays charbonniers du monde. Les plus représentés sont la Pologne, la Chine, la France et les Etats-Unis (le cas de la France étant lié à sa forte implication dans l'après-mine). Ce travail a recensé plus de 4000 terrils houillers en autoéchauffement ou en combustion, ce qui permet d'évaluer leur nombre total à environ 12 000 dans le monde. Ils mesurent en moyenne 54 m de hauteur pour une surface au sol de 25 ha, soit une masse unitaire d'environ 8 Mt.*

## 2.5 Synthèse des réponses au questionnaire envoyé

### 2.5.1 Préparation et envoi du questionnaire

Lors de la première phase de ce travail, en 2021, un document intitulé « Questionnaire concernant la problématique des terrils houillers en autoéchauffement » a été rédigé puis traduit en anglais. Afin de pouvoir être rapidement lu, renseigné et renvoyé, il était réduit aux trois questions suivantes (accompagnées d'une vingtaine d'items à cocher) :

- Question 1: Combien y a-t-il de terrils houillers en autoéchauffement ou en autocombustion 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?

Ce questionnaire a été envoyé en juillet 2021 à 140 personnes-ressources résidant dans 29 pays charbonniers (voir Annexe 6). Ces personnes sont majoritairement des chercheurs ayant publié dans ce domaine, ainsi que des industriels miniers et quelques homologues des services des mines (voir Annexe 7). En décembre 2021, à la date de clôture de l'enquête, 23 questionnaires avaient été reçus, issus de 12 pays, ce qui correspond à un taux de retour de 16 % (Figure 27).

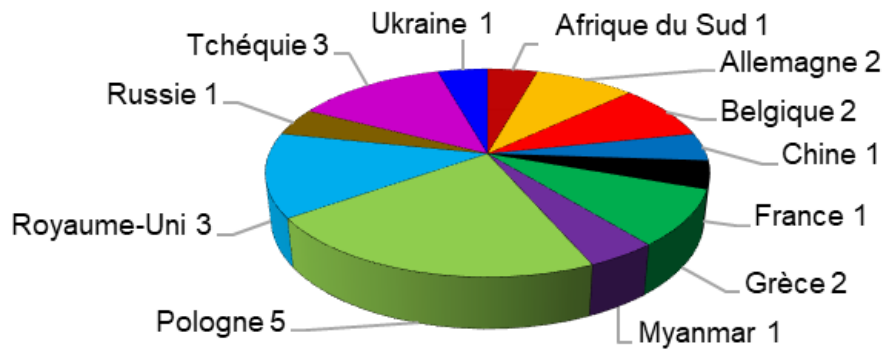


Figure 27. Nombre de réponses obtenues parmi les pays contactés

### 2.5.2 Occurrence d'autoéchauffement d'un terril houiller

Il résulte de ces informations que plus de 9 000 terrils houillers seraient présents dans les 12 pays dont au moins un représentant a répondu au questionnaire. Parmi ces terrils, environ un millier sont ou ont été en autoéchauffement ou en combustion, ce qui représente autour de 10 % de l'ensemble des terrils signalés (Tableau 7). Cette proportion moyenne est cependant très variable :

- à la fois dans l'espace, c'est-à-dire d'un pays ou d'un bassin minier à l'autre<sup>12</sup> ; il existe en effet des pays où la plupart des terrils sont en autoéchauffement ou l'ont été depuis leur édification (Afrique du Sud, Grèce), d'autres où leur proportion est significative (33 % en Ukraine, 40 % en Pologne), et d'autres enfin où le phénomène est considéré comme minoritaire avec seulement quelques pourcents de terrils officiellement concernés (Allemagne, Chine, Royaume-Uni, Tchéquie...);
- et dans le temps, du fait du mode d'édification des anciens terrils (blocs plus grossiers, charbon mal trié) qui entraînent de ce fait plus facilement en autoéchauffement, alors que les terrils modernes y sont moins sujets.

<sup>12</sup> À titre de comparaison, on rappelle qu'en France environ la moitié des terrils se serait déjà consommée dans le plus grand bassin houiller, celui du Nord-Pas-de-Calais (Paquette et Degas, 2016) ;



Tableau 7. Synthèse du nombre de terrils houillers en autoéchauffement ou en combustion par pays

Pays	Zone concernée	Nombre total de terrils houillers	Proportion de terrils en autoéchauffement ou en combustion
Afrique du Sud	Witbank Coal Field	Beaucoup	La plupart
Allemagne	Rhénanie-du-Nord-Westphalie, bassins de Ruhr et Sarre	Plus de 50	Environ 5
Belgique	Wallonie	Un millier	1 à 2 %
Chine	Chine	Peut-être des milliers	Difficile à dire par manque de surveillance. Probablement plusieurs %
France	Basin du Nord-Pas-de-Calais	Environ 150	>1
Grèce	Péloponnèse central, Macédoine de l'Ouest	Plusieurs terrils de lignite à faible valeur calorifique	C'est arrivé au moins une fois à chaque terril et 2 fois au cours des 20 dernières années
Myanmar	Myanmar	Beaucoup	>1
Pologne	Silésie, Région de Lublin	Environ 226	Environ 90 terrils en combustion dont une trentaine a fini de brûler
Royaume-Uni	Angleterre, Pays de Galles, Écosse,	Plus de 5000 terrils abandonnés	Il reste très peu de terrils en combustion de charbon au Royaume-Uni (< 1%).
Russie	Donbass de l'Est (région de Rostov)	202	33
Tchéquie	Bohême, Moravie, Silésie	30 à 60	3 autour d'Ostrava dont 1 directement en ville (terril Ema)
Ukraine	Donbass	Plus de 1500	Plus de 500

### 2.5.3 Fréquence et gravité des phénomènes induits

Cinq types de phénomènes dangereux ou impactants ont été pris en compte dans le questionnaire envoyé (voir Annexe 6) : 1) brûlure des personnes, 2) instabilité du terril, 3) incendie ou explosion, 4) pollution de l'air ou nuisances olfactives, 5) pollution des sols ou des eaux. L'ensemble des réponses obtenues montre que les fréquences et gravités moyennes de ces phénomènes sont considérées comme nulles à peu importantes, à l'exception de la pollution de l'air qui peut être cotée comme grave (Figure 28).

Par ailleurs, le questionnaire étant ouvert, d'autres phénomènes ont parfois été mentionnés par les personnes-ressources, comme la présence de composés mercuriels dans les gaz et fumées émis (Pologne), la mort par brûlure ou intoxication de petits animaux tels que des rongeurs ou des gastéropodes sur les terrils (Pologne), la destruction des sols sous les terrils en combustion (Ukraine) ou des dégâts sur la végétation aux alentours (Allemagne).

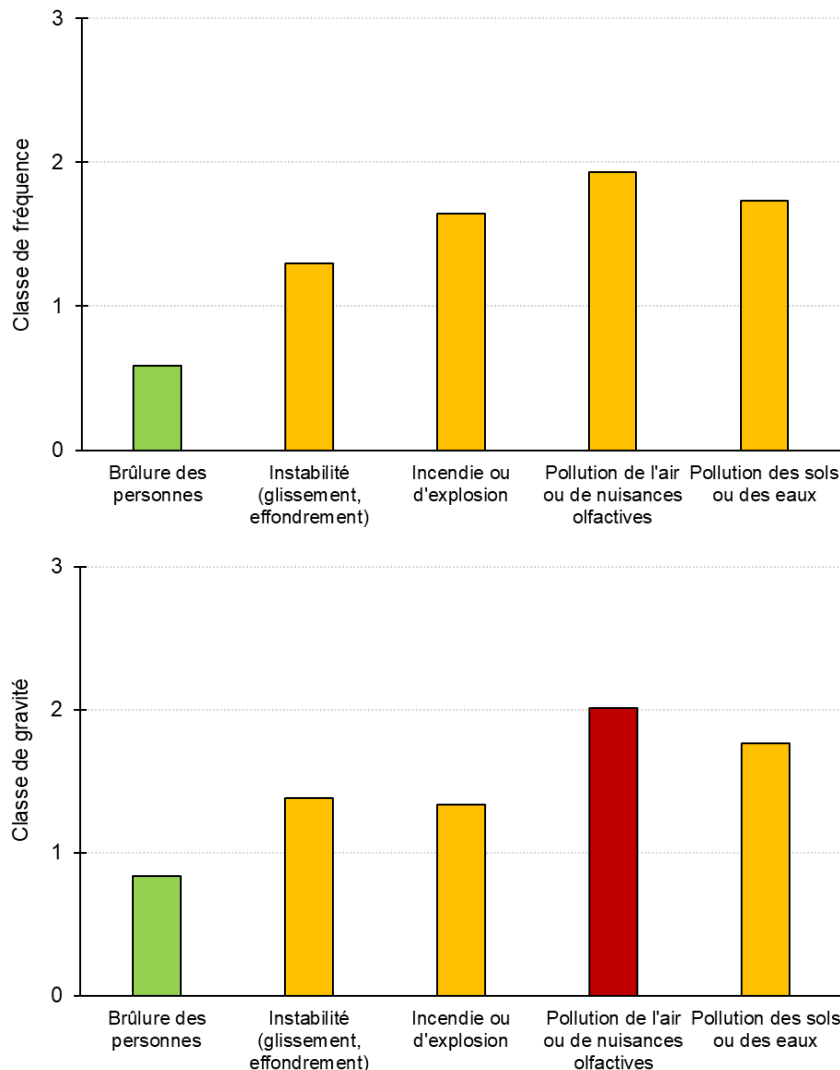


Figure 28. Classement global de la fréquence (en haut) et de la gravité (en bas) des principaux types de phénomènes

**Légende** : 0 = non ou rarement signalé (en vert), 1 = peu fréquent / peu grave (en orange), 2 = fréquent / grave (en rouge), 3 = très fréquent / très grave (non représenté ici)

Ces résultats ont ensuite été interprétés à l'aide d'une méthode d'analyse statistique multidimensionnelle appelée « Analyse en Composantes Principales » ou ACP<sup>13</sup> (Figure 29).

<sup>13</sup> Cette méthode permet de projeter sur un plan dit « factoriel », un nuage multidimensionnel de points. Il s'agit ici des intensités des cinq types de phénomènes, obtenues en faisant la moyenne de leur fréquence et de leur gravité. La validité statistique de cette projection repose sur le pourcentage de la variance totale de l'échantillon initial qu'elle permet d'expliquer : plus ce pourcentage est élevé, plus la projection est fiable. Dans le cas présent, elle permet d'expliquer 65 % de l'information totale renfermée dans l'échantillon multidimensionnel initial. Le plan factoriel est choisi automatiquement par le programme comme étant la combinaison linéaire de paramètres qui explique au mieux la variance totale de l'échantillon initial. Le graphique d'interprétation est conçu de manière à ce que les relations entre les paramètres (ici, les types de phénomènes dangereux ou impactants) et les individus (ici, les pays concernés) apparaissent de la manière la plus visuelle possible. Ici, on peut considérer que l'axe factoriel horizontal représente principalement l'intensité des phénomènes (faible à gauche, forte à droite), et l'axe factoriel vertical plutôt les différents types de phénomènes. Pour les individus (pays), l'interprétation est basée sur la proximité des symboles qui les représentent (losanges bleus) et, pour les paramètres (phénomènes), sur l'angle entre les vecteurs qui les matérialisent (flèches rouges).

Cette méthode met tout d'abord en évidence trois classes de phénomènes (Figure 29) :

- une première classe qui regroupe les phénomènes « pollution de l'air » et « explosion / incendie » et qui peut s'interpréter par le fait que les terrils en forte combustion génèrent à la fois des risques d'explosion et de pollution de l'air ou de nuisances olfactives ;
- une deuxième classe qui regroupe les phénomènes « pollution des sols ou des eaux » et « instabilité » et qui pourrait traduire l'existence d'un facteur commun, comme de fortes précipitations engendrant à la fois des instabilités et des pollutions par lessivage ou lixiviation ;
- une troisième classe qui correspond au phénomène « brûlures de personnes », relativement indépendant des deux classes précédentes.

Elle permet également de distinguer trois groupes de pays (Figure 29) :

- en rouge, des pays plutôt impactés par la première classe de phénomènes (Russie, Chine, Pologne, Afrique du Sud, Myanmar) ;
- en mauve, des pays plutôt impactés par la deuxième et/ou la troisième classe de phénomènes (Ukraine, Tchéquie, Royaume-Uni) ;
- en vert, des pays globalement peu impactés par ces phénomènes (Grèce, Allemagne, France, Belgique) ; il s'agit le plus souvent de pays qui ont renoncé à l'exploitation du charbon.

Par ailleurs, il est intéressant de noter l'indépendance statistique<sup>14</sup> entre les phénomènes « pollution de l'air » et « pollution des eaux et des sols » qui ne semblent donc pas résulter d'un même mécanisme : on peut supposer que le premier est lié aux conditions de site (géomorphologie, inversions de température, influence du vent) alors que le second dépend des précipitations et de leur rôle lessivant et/ou lixiviant. De même, le phénomène « brûlures » apparaît relativement indépendant de tous les autres, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'il est directement lié à la présence de personnes sur les terrils, et non à l'impact de ces derniers aux alentours comme c'est le cas pour les autres phénomènes. Il convient néanmoins de garder à l'esprit que cette analyse repose sur les réponses subjectives d'un petit nombre de personnes-ressources appartenant à chaque pays concerné : elle doit donc être considérée comme une première approche de la perception du risque lié à l'échauffement des terrils.

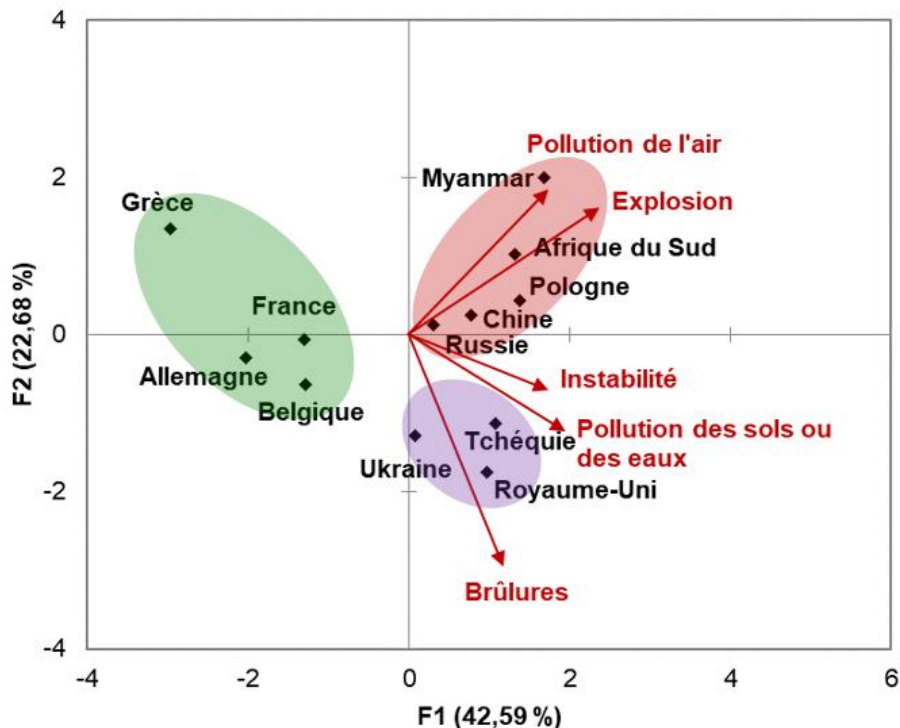


Figure 29. Analyse en composantes principales des relations entre pays (en noir) et phénomènes (en rouge)

<sup>14</sup> Matérialisée par l'angle entre les vecteurs représentatifs de ces deux phénomènes qui se rapproche ici de 90° ; de ce fait leur corrélation (correspondant au cosinus de cet angle) est quasiment nulle.

## 2.5.4 Méthodes de mitigation

La méthode de mitigation la plus fréquemment citée par les personnes-ressources est l'étanchéification des terrils par recouvrement ou par compaction (Figure 30). Vient ensuite un panel d'autres méthodes employées préférentiellement dans certains pays, comme l'excavation du terril pour récupération du clinker (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.

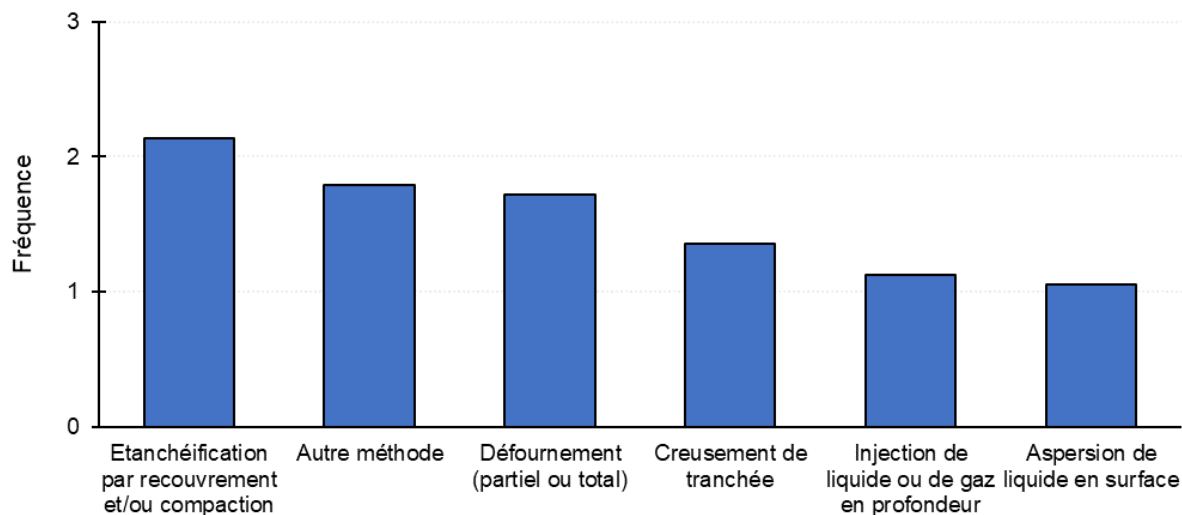


Figure 30. Classement hiérarchique des méthodes de mitigation employées

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

*À retenir* : un questionnaire a été envoyé à plus d'une centaine de personnes dans plusieurs pays charbonniers mais les réponses obtenues ne concernent qu'une dizaine de ces pays. Elles font état d'environ 9000 terrils houillers charbonniers dont un millier sont ou ont été en autoéchauffement 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<sup>er</sup> 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'autoéchauffement 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.

### 3 Conclusion

Tout empilement d'une certaine hauteur de matériaux poreux, combustibles et oxydables, tels que les résidus houillers, conduit inévitablement à leur auto-échauffement. 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. La température atteinte au sein d'un terril résulte toutefois d'un compromis entre le taux de chaleur produite en interne et celle perdue à l'interface terril-atmosphère. 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. 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). A 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 synthèse bibliographique réalisée montre que la combustion d'un terril houiller peut engendrer des événements redoutés de type sécuritaire (brûlures, explosions, instabilités), sanitaire (pollution 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. En 2021, un questionnaire a été envoyé à plus d'une centaine de personnes-ressources réparties dans plusieurs pays charbonniers dans le monde afin d'estimer la fréquence et la gravité de ces aléas. A partir de la vingtaine de réponse reçues, on peut les considérer comme nulles à peu importantes, à l'exception de la pollution de l'air qui apparaît localement grave. Cela permet de synthétiser les principaux scénarios de risques liés à l'auto-échauffement ou à la combustion d'un terril houiller selon le graphe de la Figure 31.

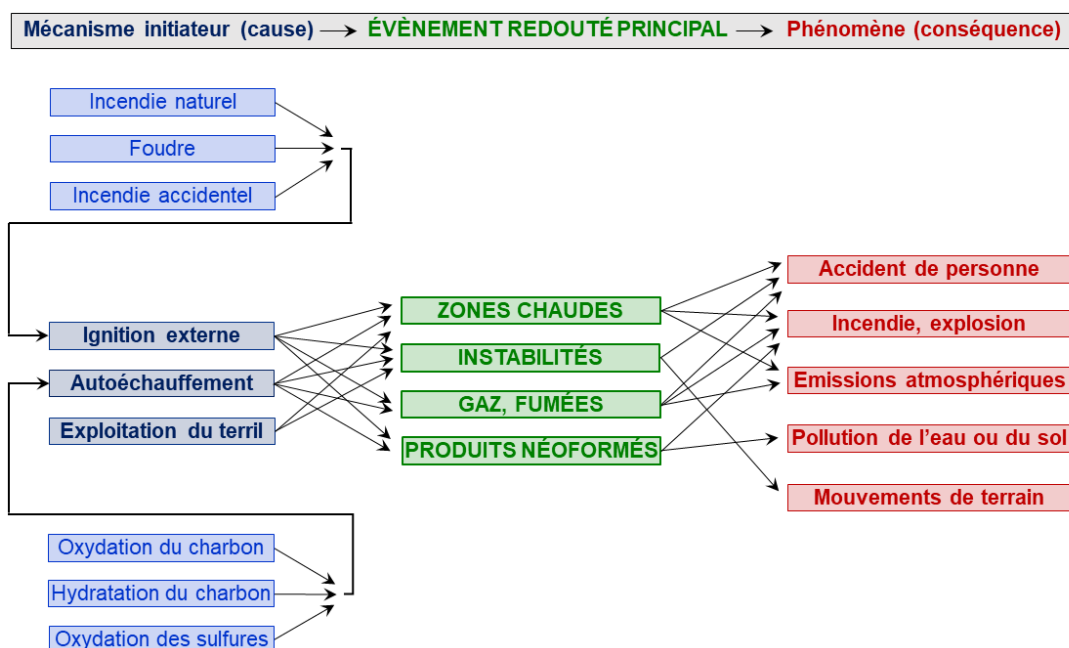


Figure 31. Scénarios de risques liés à l'auto-échauffement ou à la combustion d'un terril houiller



Les phénomènes les plus étudiés concernent la pollution atmosphérique, qui s'étend parfois à des kilomètres de distance, la pollution des eaux superficielles (par lessivage) ou souterraines (par lixiviation) et les mouvements de terrain induits par l'instabilité des zones en combustion ou déjà brûlées. En revanche, bien que cette combustion soit à l'origine de l'apparition de nombreux composés néoformés par pyrolyse ou par calcination, l'impact de ces derniers sur les sols et les eaux alentour n'a été que peu abordé à ce jour. Enfin, un autre enjeu environnemental, encore peu étudié mais mentionné par le GIEC, concerne l'émission de gaz à effet de serre.

En ce qui concerne la mitigation de ces phénomènes, la méthode la plus efficace semble être le démantèlement partiel ou total du terril, appelé « défournement », ou du moins l'isolation des zones en combustion par creusement de tranchée. Une autre méthode, citée par une majorité de personnes-ressources, est l'étanchéification des terrils vis-à-vis de l'air et de l'eau, soit par recouvrement de terre soit par compaction à l'aide d'engins. Quelques résultats intéressants ont en outre été obtenus par aspersion d'eau à la surface des terrils ou par injection en profondeur de différents fluides (eau, coulis de ciment, mousse, gaz neutre). En revanche, les essais d'extinction par l'usage massif d'eau se sont presque toujours soldés par des échecs, notamment du fait de la formation de gaz à l'eau qui est un composé inflammable et explosif. On notera enfin que dans certains pays, lorsqu'il n'y a pas d'enjeu à proximité, on laisse simplement le terril se consumer tout en assurant une surveillance plus ou moins continue.

Pour aller plus loin, il faudrait tout d'abord poursuivre le recensement des terrils houillers dans le monde, en mettant l'accent sur ceux qui sont ou ont été en auto-échauffement ou en combustion. Ensuite, il conviendrait de mieux étudier certains phénomènes impactants, notamment ceux liés à l'impact des composés néoformés sur les eaux, ainsi qu'à la quantification des émissions de gaz à effet de serre des terrils en auto-échauffement.

## 4 Bibliographie

- Adamski SA, 2003. Prevention of spontaneous combustion of backfilled plant waste material. Safety in Mines Research Advisory Committee. Project Report Number: COL 713, June 2003, 52 p.
- Aditya TLS, 2015. Man made disasters-coal fires. <https://fr.slideshare.net/Vij1/coal-fire-tmba-1306> (consulté le 14/04/2021).
- 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.
- Akulov NI, Akulova VV, 2020. Pyrolysis of Technogenic-Redeposited Coal-Bearing Rocks of Spoil Heaps. Geosciences 2020, 10, 122. <https://doi.org/10.3390/geosciences10040122>
- Allard T, 2020. Dans les Cévennes, un terril en combustion inquiète les riverains. <https://www.objectifgard.com/2020/09/29/fait-du-jour-dans-les-cevennes-un-terril-en-combustion-inquiete-les-riverains/> (consulté le 02/12/2022).
- ARIA, 2004. Incendie de terrils. Bulletin n° 27877, 26/07/2004, <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/27877/> (consulté le 04/01/2022).
- Barcytė D, Nedbalová L, Culka A, Košek F, Jehlička J, 2018. Burning coal spoil heaps as a new habitat for the extremophilic red alga *Galdieria sulphuraria*. Fottea, 18(1), 19-29. doi: 10.5507/fot.2017.015
- Batugin A, Musina V, Golovko I, 2017. Analysis of Geodynamical Conditions of Region of Burning Coal Dumps Location. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2017), IOP Publishing, IOP Conf. Series: Earth and Env. Science 95 (2017) 042023 doi :10.1088/1755-1315/95/4/042023.
- Beamish BB, Barakat MA, St George JD, 2001. Spontaneous-combustion propensity of New Zealand coals under adiabatic conditions, International Journal of Coal Geology, 45:217-224.
- Beier E, 1994. Long-term studies on the oxidation of coal and other substances in air. Fuel 1994, 73/7: 1179-1183.
- Bell FG, Bullock SET, Hälbich TFJ, Lindsay P, 2001. Environmental impacts associated with an abandoned mine in the Witbank Coalfield, South Africa. Int. Journal of Coal Geology 45/2001: 195-216.
- Białecka B, Grabowski J, 2016. Mercury contamination of the surface layer of thermally active coal mining waste dumps. Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM; 2016/2: 561-568.
- Carras JN, Day SJ, Saghafi A, Williams DJ, 2009. Greenhouse gas emissions from low-temperature oxidation and spontaneous combustion at open-cut coal mines in Australia. International Journal of Coal Geology 78 (2009) 161–168, doi:10.1016/j.coal.2008.12.001
- Carres JN, Saghafi A, 1998. Predicting spontaneous combustion in spoil piles from open cut coal mines, in Naj Aziz and Bob Kininmonth (eds.), Proceedings of the 1998 Coal Operators' Conference, Mining Engineering, University of Wollongong, 18-20 February 1998, <https://ro.uow.edu.au/coal/234>
- China, 2013. Waste dump extinguishing method. Patent CN102500077A, <https://patents.google.com/patent/CN102500077A/en> (consulté le 12/02/2021).
- Ciesielczuk J, 2015a. 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>
- Ciesielczuk J, 2015b. Coal Mining and Combustion in the Coal Waste Dumps of Poland. In Coal and Peat Fires, Chapter 16, 2015: 463-473, DOI: 10.1016/B978-0-444-59509-6.00016-8
- Ciesielczuk J, Bzowska P, Justyna Grażyna M, 2015. Mineral Transformations and Actinide Transport: Combustion Metamorphism in the Wojkowice Coal-Waste Dump, Upper Silesian Coal Basin, Poland. In Coal and Peat Fires. Chapter 17, 2015: 475-491
- Civeira MS, Pinheiro RN, Gredilla A, Ortiz de Vallejuelo SF, Oliveira MLS, Ramos CG, Taffarel SR, Kautzmann RM, Madariaga JM, Silva, LFO, 2016. The properties of the nano-minerals and hazardous elements: Potential environmental impacts of Brazilian coal waste fire. Science of The Total Environment, 544/2016: 892-900, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.026>

- Corexenos P, 2000. Evaluation des risques que présentent les terrils. Le cas du terril de Bernalmont. 25 p., <http://terrilsdeliege.11vm-serv.net/terril.pdf> (consulté le 13/04/2021).
- Corey RC, Foster JJ, Engdahl RB, Garvey JR, Rose HC, 1956. The Disposal of Coal Refuse, Journal of the Air Pollution Control Association, 6:2, 105-110, DOI: 10.1080/00966665.1956.10467733
- Daum P, 2004. Alès brûle d'un feu intérieur. [https://www.liberation.fr/terre/2004/11/06/ales-brule-d-un-feu-interieur\\_498503/](https://www.liberation.fr/terre/2004/11/06/ales-brule-d-un-feu-interieur_498503/) (consulté le 04/01/2022).
- Deng JL, Yaqing L, Zhang Y, 2015. Effects of the pyrite on the spontaneous combustion of coal. Int. Journal of Coal Science & Technology, September 2015, DOI: 10.1007/s40789-015-0085-y
- Denimal S, 2001. Impact des terrils houillers du bassin minier Nord-Pas-de-Calais sur la qualité des eaux de la nappe de la craie. Thèse, Université de Franche-Comté, Décembre 2001, 256 p.
- Denimal S, Tribovillard N, Barbecot F, Aglave S, Dever L, 2002. Impact des terrils houillers sur la qualité des eaux souterraines (bassin minier Nord-Pas-de-Calais, France) : approche géochimique et isotopique. Revue des sciences de l'eau, 15 : 67–93, <https://doi.org/10.7202/705487ar>
- Denoël L, 1949. Incendies des terris dans les houillères britanniques. Annales des Mines de Belgique, 1949, Tome XLVIII : 433-434.
- Déthée A, 2019. Rieulay: en proie à la combustion, le terril conique des Argales interdit d'accès au public. La Voix du Nord, 21/08/2019, <https://www.lavoixdunord.fr/627293/article/2019-08-21/rieulay-en-proie-la-combustion-le-terril-conique-des-argales-interdit-d-acces-au> (consulté le 13/04/2021).
- Dokoupilova P, Sracek O, Losos Z, 2007. Geochemical behaviour and mineralogical transformations during spontaneous combustion of a coal waste pile in Oslavany, Czech Republic. Mineralogical Magazine, August 2007, 71/4: 443-460.
- 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.
- Engle MA, Radke LF, Heffern EL, O'Keefe JMK, Hower JC, Smeltzer CD, Hower JM, Olea RA, Eatwell RJ, Blake DR, Emsbo-Mattingly SD, Stout SA, Queen G, Aggen KL, Kolker A, Prakash A, Henke KR, Stracher GB, Schroeder PA, Román-Colón Y, ter Schure A, 2012. Gas emissions, minerals, and tars associated with three coal fires, Powder River Basin, USA. Science of the Total Environment, 420/2012: 146-159, doi:10.1016/j.scitotenv.2012.01.037
- Evanno S, 2005. Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA 35 - rapport Q 11) - Connaissance des phénomènes d'autoéchauffement des solides combustibles. RAPPORT D'ÉTUDE INERIS DRA-2005-46055, 111 p.
- Ewall M, 2007. FACT SHEET: Waste Coal. [www.energyjustice.net/coal/wastecoal/](http://www.energyjustice.net/coal/wastecoal/) (consulté le 05/02/2021).
- Fabiańska MJ, Ciesielczuk J, Kruszewski Ł, Misz-Kennan M, Blake DR, Stracher G, Moszumańska I, 2013. Gaseous compounds and efflorescences generated in self-heating coal-waste dumps — A case study from the Upper and Lower Silesian Coal Basins (Poland). International Journal of Coal Geology 116–117 (2013) 247–261, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2013.05.002>
- Fabiańska M, Ciesielczuk J, Nadudvari A, Misz-Kennan M, Kowalski A, Kruszewski Ł, 2019. Environmental influence of gaseous emissions from selfheating coal waste dumps in Silesia, Poland. Environ Geochem Health (2019) 41:575–601, <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0153-5>
- Falcon RM, 1986. Spontaneous combustion of the organic matter in discards from the Witbank coalfield. J. S. At., Inst. Min. Metal., 86/7, Jul. 1986: 243-250.
- Gibbons B, 2014. Culm fire likely burned for years; no end in sight. The Scranton Times-Tribune, Mar 26, 2014 Updated Jun 9, 2020, [https://www.thetimes-tribune.com/news/culm-fire-likely-burned-for-years-no-end-in-sight/article\\_cc632859-2814-54c2-bdc1-fee2dbf8a9cf.html](https://www.thetimes-tribune.com/news/culm-fire-likely-burned-for-years-no-end-in-sight/article_cc632859-2814-54c2-bdc1-fee2dbf8a9cf.html) (consulté le 05/02/2021)
- 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

- 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.
- Hammache N, 2020. Interprétation de l'Etat des Milieux. Combustion du terril du "Parc à bois". Site Legal BTP de Saint-Jean-de-Valériscle (30). Rapport anteagroup n°107809/B, 152 p. + annexes.
- Harrington D, Heast Jr. JH, 1948. Burning refuse dumps at coal mines. US 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 03/02/2021).
- Havelcová M, Sýkorová I, Trejtnarová H, Šulc A, 2012. Identification of organic matter in lignite samples from basins in the Czech Republic: Geochemical and petrographic properties in relation to lithotype. *Fuel*. 99. 129–142. 10.1016/j.fuel.2012.03.025
- Hebley FH, 1956. The Control of Gob Pile Fires. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 6:1, 29-51, DOI: 10.1080/00966665.1956.10467724
- Hower JC, O'Keefe JMK, Henke KR, Bagherieh A, 2011. Time series analysis of CO concentrations from an Eastern Kentucky coal fire. *International Journal of Coal Geology*, 88 (2011): 227–231, doi:10.1016/j.coal.2011.10.001
- IMTE, 2006. Coal Fire Risk. IMTE-April 2006, *Fuels*, <http://www.mrsphoto.net/4-IMTE%20AG/2-2006-04.pdf> (consulté le 28/01/2021)
- Ineris, 2018. Evaluation des aléas miniers. Document Ineris 17-164640-01944A, 50 p.
- IPCC, 2007. In: Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Published IGES, Japan. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.
- Janès A, Vignes A, 2018. Incendie, explosion : attention au phénomène d'auto-échauffement des solides divisés. *Hygiène et sécurité du travail*, Notes Techniques, mars 2018, 250 : 64-70.
- Jendruš R, 2016. Chemical and physical aspects of fires on coal. *Waste Dumpszeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Technicznej W Katowicach*, 2016/8: 131-149.
- Kadnikov VV, Mardanov AV, Ivashenko DA et al., 2018. Lignite coal burning seam in the remote Altai Mountains harbors a hydrogen-driven thermophilic microbial community. *Sci Rep* 8, 6730 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25146-9>
- Karamfilova E, 2017. Mining Waste Directive 2006/21/EC. European Implementation Assessment. EPRS Publication PE 593.788, 176 p.
- Kim AG, 2011. US Bureau of Mines – Study and control of fires in abandoned mines and waste banks. In: *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*, 1/16: Coal - Geology and combustion: 267-305, Edited by Glenn B. Stracher, Anupma Prakash and Ellina V. Sokol.
- Kim AG, Chaiken FR, 1993. Fires in abandoned coal mines and waste banks. Information circular 9362. US Department of the Interior, Bureau of Mines, 64 p.
- Křibek B, Sýkorová I, Veselovský F, Laufek F, Malec J, Knésl I, Majer V, 2017. Trace element geochemistry of self-burning and weathering of a mineralized coal waste dump: The Novátor mine, Czech Republic. *International Journal of Coal Geology* 173 (2017) 158–175, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2017.03.002>
- Kruszewski P, 2010. Minerals of the ammonioalunite–ammoniojarosite series formed on a burning coal dump at Czerwionka, Upper Silesian Coal Basin, Poland. *Mineralogical Magazine*, 74/4: 31-745.
- Kruszewski L, 2013. Supergene sulphate minerals from the burning coal mining dumps in the Upper Silesian Coal Basin, South Poland. *International Journal of Coal Geology* 105 (2013) 91–109, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2012.12.007>
- Kruszewski Ł, Fabiańska MJ, Ciesielczuk J, Segit T, Orłowski R, Motyliński R, Kusy D, Moszumańska I, 2018. First multi-tool exploration of a gas-condensate-pyrolysate system from the environment of burning coal mine heaps: An in situ FTIR and laboratory GC and PXRD study based on Upper Silesian materials. *Sc. of the Total Env.*, 640–641: 1044–1071, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.319>

Lefevre O, 2020. Bassin houiller des Cévennes (30). Commune de Saint-Jean-de-Valerisclle. Assistance Technique dans le cadre de la maîtrise la combustion de l'ancien terril du Parc à Bois. Etats des lieux des 10 et 16 juin 2020 et préconisations de travaux pour empêcher la propagation du phénomène d'échauffement. Rapport GEODERIS 2020/138DE – 20NAT90020, 39 p.

Levresse E, Nevskaya Y, 2021. Le charbon saccage l'environnement et la vie en Russie. Reporterre, <https://reporterre.net/Le-charbon-saccage-l-environnement-et-la-vie-en-Russie> (consulté le 04/01/2022).

Selected ions and major- and trace elements as contaminants in coal-waste dump water from the Lower- and Upper Silesian Coal Basins (Poland)

Lewińska-Preis L, Szram E, Fabiańska M, Nádudvari Á, Misz-Kennan M, Abramowicz A, Kruszewski Ł, Kita A, (2020). Selected ions and major- and trace elements as contaminants in coal-waste dump water from the Lower- and Upper Silesian Coal Basins (Poland). *Int. J of Coal Sc. and Techn.*, DOI: 10.21203/rs.3.rs-35061/v1

Liu CL, Li SS, Qiao QD, Wang JS, Pan ZQ, 1998. Management of spontaneous combustion in coal mine waste tips in China. *Water Air Soil Pollut.* 103, 441–444.

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.

Malinconico MAL, 2015. Pennsylvania anthracite culm heaps : a burning issue. <http://carbonacea.blogspot.com/2015/03/pennsylvania-anthracite-culm-heaps.html> (consulté le 05/02/2021)

Masalehdani NN, Potdevin JL, 2004. Problèmes géo-environnementaux liés a la combustion des terrils dans les zones minières de la région Nord-Pas-de-Calais, France. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur "Géotechnique et Aménagement", Lille : 209-218.

Masalehdani NN, Potdevin JL, Cazier F, Courcot D, 2005. Emission of Toxic Gases and Condensation Minerals from Burning Coal Waste Heaps in Northern France: Measurements and Analyses. 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: 103-131.

McNay LM, 1971. Coal Refuse Fires, An Environmental Hazard. U.S. Bureau of Mines, Information Circular 8515, 38 p.

Mishra RK, Bahuguna PP, Singh VK, 2011. Detection of coal mine fire in Jharia Coal Field using Landsat-7 ETM+ data. *International Journal of Coal Geology* 86 (2011) 73–78, doi:10.1016/j.coal.2010.12.010

Misz M, Fabiańska M, Ćmiel S, 2007. Organic components in thermally altered coal waste: preliminary petrographic and geochemical investigations. *International Journal of Coal Geology* 71 (2007) 405–424, doi:10.1016/j.coal.2006.08.009

Misz-Kennan F, Ciesielczuk M, Monika J, 2015a. C Thermal Transformations of Waste Rock at the Starzykowiec Coal Waste Dump, Poland. In *Coal and Peat Fires*, Chapter 14, 2015: 387-429.

Misz-Kennan M, Fabiańska MJ, 2011. Application of organic petrology and geochemistry to coal waste studies. *International Journal of Coal Geology* 88 (2011) 1–23, doi:10.1016/j.coal.2011.07.001

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, Kus J, Flores D, Avila C, Büçkün Z, Choudhury N, Christanis K, Joubert JP, Kalaitzidis S, Karayigit AI, Malecha M, Marques M, Martizzi P, O'Keefe JMK, Pickel W, Predeanu G, Pusz S, Ribeiro J, Rodrigues S, Singh AK, Suárez-Ruiz I, Sýkorová I, Wagner NJ, Životić D, 2020. Development of a petrographic classification system for organic particles affected by self-heating in coal waste. (An ICCP Classification System, Selfheating Working Group – Commission III). *International Journal of Coal Geology* 220 (2020) 103411, <https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103411>

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



- Monjoie A, Schroeder C, 2001. Instabilités de versants de terrils en relation avec l'autocombustion des schistes et charbons résiduels. *Revue Française de Géotechnique*, n°95/96 : 91-102.
- Nádudvari Á, Fabiańska MJ, Marynowski L, Kozielska B, Koniecznyński J, Smółka-Danielowska D, Ćmiel S, 2018. Distribution of coal and coal combustion related organic pollutants in the environment of the Upper Silesian Industrial Region. *Science of The Total Environment*, 628-629/2018: 1462-1488, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.092>
- Nádudvari Á, Abramowicz A, Fabiańska M, Misz-Kennan M, Ciesielczuk J, 2020a. Classification of fires in coal waste dumps based on Landsat, Aster thermal bands and thermal camera in Polish and Ukrainian mining regions. *Int J Coal Sci Technol*, <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00375-4>
- Nádudvari Á, Fabiańska MJ, Misz-Kennan M, Ciesielczuk J, Kowalski A, 2020b. Investigation of organic material self-heating in oxygen-depleted condition within a coal-waste dump in Upper Silesia Coal Basin, Poland. *Environmental Science and Pollution Research* (2020) 27: 8285–8307, <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07336-8>
- Nalbandian H, 2010. Propensity of coal to self-heat. IEA Clean Coal Centre, CCC/172, Oct. 2010, 47 p.
- 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.
- Nissley EL, 2014. Coal fires plagued the region for decades. *The Scranton Times-Tribune*, [https://www.thetimes-tribune.com/news/coal-fires-plagued-the-region-for-decades/article\\_44934cd3-759f-5263-8770-38c3a2eaa4ab.html](https://www.thetimes-tribune.com/news/coal-fires-plagued-the-region-for-decades/article_44934cd3-759f-5263-8770-38c3a2eaa4ab.html) (consulté le 05/02/2021)
- Nyssen J, Diependaele S, Goossens Rudi, 2012. Belgium's burning coal tips – coupling thermographic ASTER imagery with topography to map debris slide susceptibility. *Zeitschrift für Geomorphologie*; March 2012, 56/1: 23-52.
- Nyssen J, Vermeersch D, 2010. Slope aspect affects geomorphic dynamics of coal mining spoil heaps in Belgium. *Geomorphology* 123 (2010): 109–121.
- Oliveira (de) M, 1975. Explosion d'un terril à Calonne-Ricouart. <https://fresques.ina.fr/memoires-de-mines/fiche-media/Mineur00151/explosion-d-un-terril-a-calonne-ricouart.htm> (consulté le 16/04/2021).
- Onifade M, Genc B, 2019. Spontaneous combustion liability of coal and coal-shale: a review of prediction methods. *Int J Coal Sci Technol* 6, 151–168 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40789-019-0242-9>
- Pak H, Tada T, Kikuchi N, Shigehisa T, Higuchi T, Yamamoto S, 2015. Evaluation of Spontaneous Combustion in Stockpile of Sub-bituminous Coal. *Kobelco Technology Review*, 33, Feb. 2015: 21-27.
- Pan R, Hu D, Chao J, Wang L, Ma J, Jia H, 2020. The heat of wetting and its effect on coal spontaneous combustion. *Thermochimica Acta*, 691/2020, <https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178711>.
- Panov BS, Dudik AM, Shevchenko OA, Matlak ES, 1998 On pollution of the biosphere in industrial areas: the example of the Donets coal Basin. *International Journal of Coal Geology* 40/1999: 199-210.
- 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, Laversanne J, 2003. Présentation du guide du détenteur de terrils et autres dépôts miniers issus de l'activité charbonnière. JNGG, Juin 2004, Lille, France : 235-242.
- Paquette Y, Tuleweit C, Audouin M, Lac C, 2002. Traitement d'un terril en combustion par confinement. *Industrie minière - Environnement*, 2002 : 8-12.
- Phenrat T, 2020. Community Citizen Science for Risk Management of a Spontaneously Combusting Coal-Mine Waste Heap in Ban Chaung, Dawei District, Myanmar. *GeoHealth*, June 2020, 4/6: 1-16, 16p10.1029/2020GH000249
- Phillips H, Uludag S, Chabedi K, 2009. Prevention and control of spontaneous combustion. *Best Practice Guidelines for Surface Coal Mines in South Africa*. Coaltech 2020, Project 3.4.1, 134 p.
- Querol X, Zhuang X, Font O, Izquierdo M, Alastuey A, Castro I, van Drooge BL, Moreno T, Grimalt JO, Elvira J, Cabañas M, Bartoli 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 gobs: A

review and new experimental data. *International Journal of Coal Geology* 85 (2011) 2–22, doi:10.1016/j.coal.2010.09.002

Ribeiro J, Ania CO, Suárez-Ruiz I, Flores D, 2019. The Spontaneous Combustion of Coal-Mine Waste and Stream Effects in the El Bierzo Coalfield, Spain. In: *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*, 5/7: Case Studies - Advances in Field and Laboratory Research: 97-124 Coal - Geology and combustion: 584-100, Edited by Glenn B. Stracher, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849885-9.00007-X>

Ribeiro J, Silva T, Mendonca Filho JG, Flores D, 2012. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in burning and non-burning coal waste piles. *Journal of Hazardous Materials* 199–200 (2012) : 105– 110, doi:10.1016/j.jhazmat.2011.10.076

Ribeiro J, Suárez-Ruiz I, Flores D, 2020. Self-burning coal mining residues - An environmental issue or a source of raw materials? EGU 2020, [https://presentations.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-20018\\_presentation.pdf](https://presentations.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-20018_presentation.pdf) (consulté le 21/04/2021).

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)

Rosema A, Guan H, van Genderen J, Veld H, Vekerdij Z, ten Katen AM, Prakash A, Sharif M, 1999. *Manual of Coal Fire Detection and Monitoring*. Report of the project 'Development and implementation of a coal fire monitoring and fighting system in China'. Published by the Netherlands Institute of Applied Geoscience as report NITG 99-221-C, ISBN 90-6743-640-2, 245 p.

Sasaki K, Sugai Y, 2011. Equivalent Oxidation Exposure - Time for Low Temperature Spontaneous Combustion of Coal. In: *Heat Analysis and Thermodynamic Effects* (ed: A Ahsan) : 235-254

Shah KP, 2017. Spontaneous Combustion of Coal. Nov. 2017, <https://practicalmaintenance.net/wp-content/uploads/Spontaneous-Combustion-of-Coal.pdf> (consulté le 01/02/2021).

Sheail J, 2005. « Burning bings<sup>15</sup> »: a study of pollution management in mid-twentieth century Britain. *Journal of Historical Geography* 31 (2005) 134–148, doi:10.1016/j.jhg.2004.04.001

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*; Jan2014, 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.

Sleptsov Y, 2020. Problem of Slagheaps of Donbass. *E3S Web of Conferences* 217, 04005 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021704005> (consulté le 19/04/2021)

Smith MA, Glasser D, 2005. Spontaneous combustion of carbonaceous stockpiles. Part I: the relative importance of various intrinsic coal properties and properties of the reaction system. *Fuel* 84 (2005) 1151–1160, doi:10.1016/j.fuel.2004.12.004

Song Z, Kuenzer C, Zhu H, Zhang Z, Jia Y, Sun Y, Zhang J, 2015. Analysis of coal fire dynamics in the Wuda syncline impacted by fire-fighting activities based on in-situ observations and Landsat-8 remote sensing data. *International Journal of Coal Geology* 141–142 (2015) 91–102, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2015.03.008>

Stracher GB, 2010. The rising global interest in coal fires. <https://www.earthmagazine.org/article/rising-global-interest-coal-fires> (consulté le 28/01/2021).

Stracher GB, Taylor TP, 2004. Coal fires burning out of control around the world: thermodynamic recipe for environmental catastrophe. *International Journal of Coal Geology* 59 (2004) 7– 17, doi:10.1016/j.coal.2003.03.002

Sussman VH, Mulhern JJ, 1964. Air pollution from coal refuse disposal areas. *Journal of the Air Pollution Control Association*, July 1964, 14/7: 279-284.

Sýkorová I, Kříbek B, Havelcová M, Machovič V, Laufek F, Veselovský F, Špaldoňová A, Lapčák L, Kněsl I, Matysová P, Majer V, 2018. Hydrocarbon condensates and argillites in the Eliška Mine burnt

---

<sup>15</sup> « Bing » est un terme nordique pour terril.

coal waste heap of the Žacléř coal district (Czech Republic): Products of high- and low temperature stages of self-ignition. *International Journal of Coal Geology* 190 (2018) 146–165, <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.11.003>

Szakall S, Kristaly F, 2008. Ammonium sulphates from burning coal dumps at Komló and Pécs- Vasas, Mecsek Mts., South Hungary. Conference: 2nd Central-European Mineralogical Conference 2008 (CEMC) & XV Meeting of the Petrology Group of the Mineralogical Society of Poland, MIENRALOGIA, SPECIAL PAPERS 32, 10.13140/2.1.3081.1202

The Associated Press, 2019. Battle to extinguish Pa. coal fire continues. Updated Jan 05, 2019; Posted Feb 27, 2014. [https://www.pennlive.com/midstate/2014/02/battle\\_to\\_extinguish\\_pa\\_coal\\_f.html](https://www.pennlive.com/midstate/2014/02/battle_to_extinguish_pa_coal_f.html) (consulté le 05/02/21)

Thiéry V, Guy B, Kruszewski Ł, Carpentier JF, 2019. The Burning Coal Heap at La Ricamarie, Loire Coal Basin, France. In: *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*, 5/14: Case Studies - Advances in Field and Laboratory Research : 301-331, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849885-9.00014-7>

Thiéry V, Sokol EV, Masalehdani NN, Guy B, 2013. La combustion des terrils. *Géochronique*, Bureau de recherches géologiques et minières, 2013, 127 : 23-25.

Thomas P, 2016. Combustion des mines de charbon et des terrils (ou crassiers) : du Germinal d'Émile Zola au Crassier Saint-Pierre à La Ricamarie (banlieue de Saint-Étienne, Loire). <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/lmg539-2016-07-04.xml> (consulté le 01/12/2022).

Torrance KW, Rein G, Switzer C, Carvel R, Hadden R, Claire BM, 2012. Self-sustained smoldering combustion of a coal-waste heap in central Scotland. In: *Coal and Peat Fires : A Global Perspective*, Volume 2, Chapter 20: 395-405, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59412-9.00020-X>

Totino E, 1986. Séparation et caractérisation des macéraux du charbon. Thèse, université de Metz.

Troch K, 2018. Ne pas grever l'avenir au bénéfice du présent : Une histoire environnementale de l'extraction du charbon de la fin du 18e siècle à l'Entre-deux-guerres : un développement non soutenable. : L'exemple du Couchant de Mons et du Valenciennois. Histoire. Thèse, Université de Lille (F) - Université de Namur (B).

Vanhee B, 2015. Collemboles et terrils : la biodiversité post-industrielle. Thèse de doctorat, Université Catholique de Lille, 169 p.

Velly N, Pokryszka Z, 2001. Etude bibliographique sur les méthodes de prévention des échauffements par l'utilisation des substances antipyrrogènes 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

Žáček S, Roman V, 2015. Mineralogy of Burning-Coal Waste Piles in Collieries of the Czech Republic. In: *Coal and Peat Fires*, Chapter 5:109-159, doi: 10.1016/B978-0-444-59509-6.00005-3

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

Zhang Y, Hu S, Stracher GB, Song Z, 2017. Coal Fires of Northern China. In *Coal and Peat Fires*. Chapter 4. 19 p.

Zhao Y, Zhang J, Chou CH, Li Y, Wang Z, Ge Y, Zheng C, 2008. Trace element emissions from spontaneous combustion of gob piles in coal mines, Shanxi, China. *International Journal of Coal Geology*, 73/1: 52-62, <https://doi.org/10.1016/j.coal.2007.07.007>

## 5 Annexes

Annexe 1. Modèle conceptuel de l'auto-échauffement et de la combustion d'un tas de charbon pur

Annexe 2. Exemples de terrils en combustion dans le monde

Annexe 3. Facteurs aggravants

Annexe 4. Détail des principales méthodes de mitigation des feux de terril

Annexe 5. Questionnaire concernant la problématique des terrils de charbon en auto-échauffement

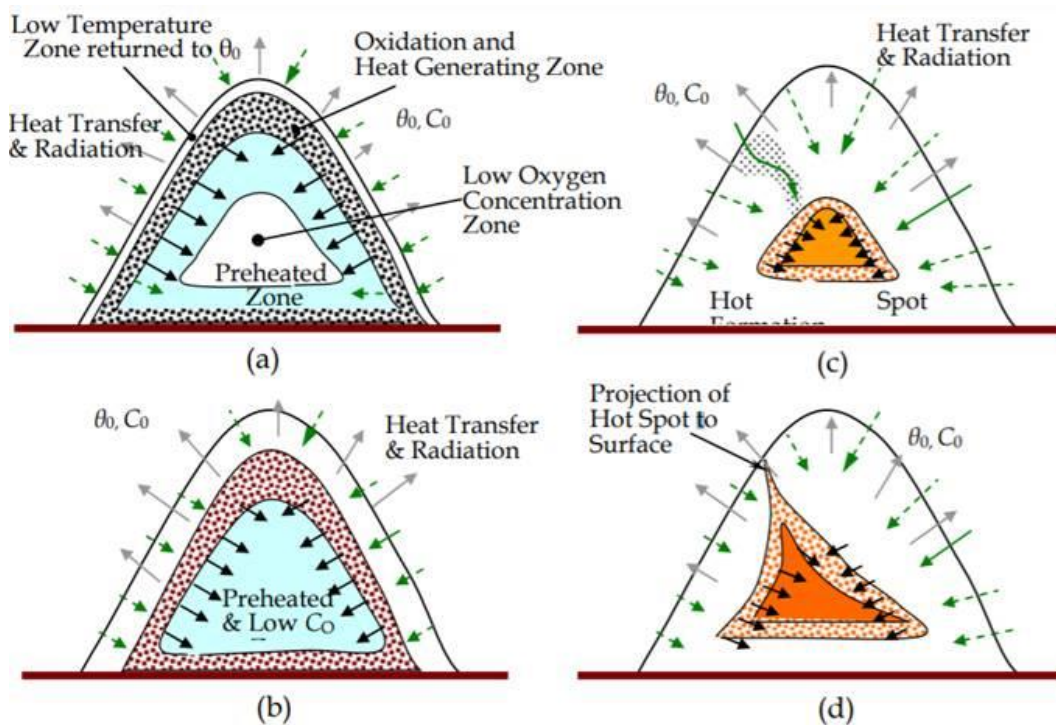
Annexe 6. Liste des personnes ayant répondu au questionnaire et de leurs fonctions

Annexe 7. Nombre, dimensions et observations des terrils en auto-échauffement ou en combustion d'après la synthèse bibliographique

Annexe 1. Modèle conceptuel de l'auto-échauffement et de la combustion d'un tas de charbon pur

Sasaki et Sugai (2011) ont fourni un modèle conceptuel de la succession des processus qui conduisent à l'auto-échauffement puis à la combustion de tas de charbon pur, ce qui permet de mieux comprendre les processus qui se déroulent au sein d'un terril houiller soumis au même phénomène (voir figure ci-après) :

- l'oxydation du charbon s'amorce à la surface extérieure du tas, en contact avec l'air ; une partie de la chaleur produite est perdue dans l'atmosphère et la partie externe du tas revient à la température atmosphérique après un certain temps, mais une autre partie se diffuse vers l'intérieur du tas ; pendant ce temps, au centre du tas, s'amorce une zone d'auto-échauffement lent (préchauffage) car la concentration en oxygène y reste relativement faible ;
- la zone d'oxydation et de génération de chaleur située en périphérie du tas se déplace progressivement de la surface vers le centre, et sa température augmente ;
- l'oxygène finit par diffuser jusqu'à la région centrale, ce qui déclenche l'apparition d'un point chaud ; ce délai dans la diffusion de l'oxygène vers l'intérieur du tas (d'autant plus long que le tas est grand) permet ensuite à la température du charbon d'augmenter de manière exponentielle au centre, du fait du long temps de préchauffage initial ;
- après la formation du point chaud au centre, le charbon commence à brûler lentement, sans flamme, et projette la chaleur vers la surface par des chemins préférentiels à forte perméabilité, notamment là où la concentration en oxygène est supérieure à celle du charbon environnant ; lorsque le point chaud apparaît à la surface du tas, la combustion devient visible.



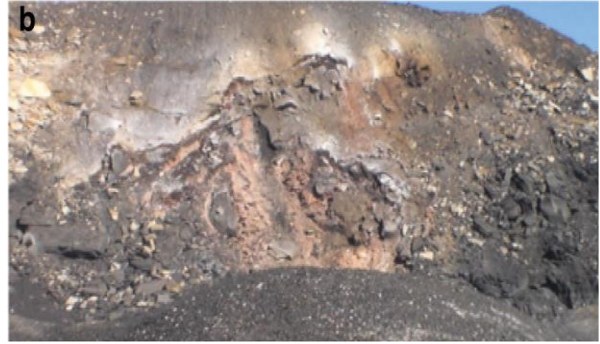
Modèle conceptuel de la combustion spontanée d'un tas de charbon pur (Sasaki et Sugai, 2011) : (a), (b), (c) = formation d'un point chaud par accumulation de chaleur puis rétrécissement de la zone d'oxydation et de la zone de préchauffage, (d) = projection du point chaud vers la surface par un chemin préférentiel très perméable

Légende :  $C_0$  = concentration de l'air en oxygène,  $\theta_0$  = température de l'air



Annexe 2. Exemples de terrils en combustion dans le monde

AFRIQUE



Afrique du Sud : Echauffement de terrils houillers (a : Phillips et al. 2009 ; b : Onifade et Genc, 2019)

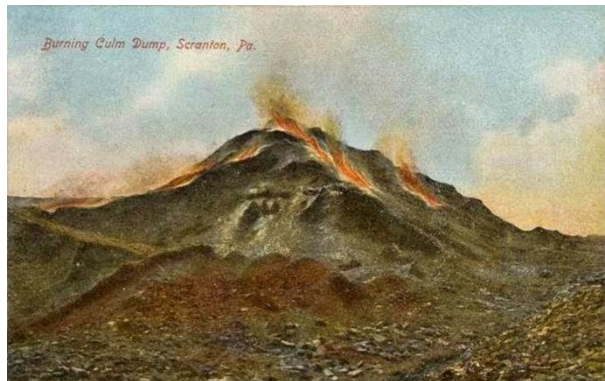
AMERIQUE



Etats-Unis : essai d'extinction d'un terril en combustion près de Simpson en Pennsylvanie (Gibbons, 2014)

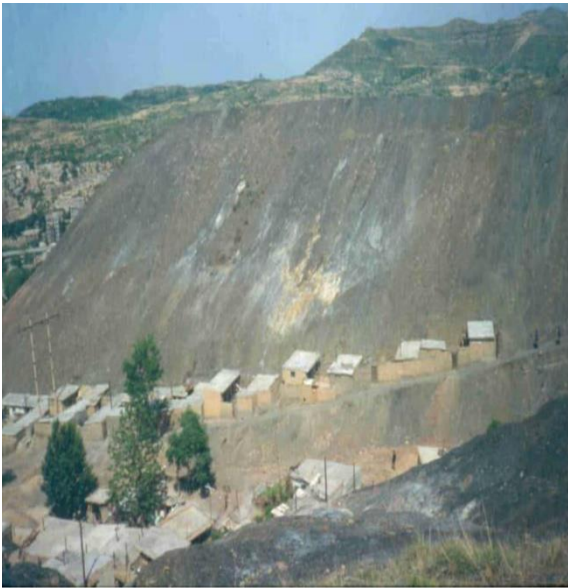


Etats-Unis : vue de 3 terrils en combustion près de Dunmore Bypass en 1967 : (1) Olyphant. (2) et (3) Marvine Colliery

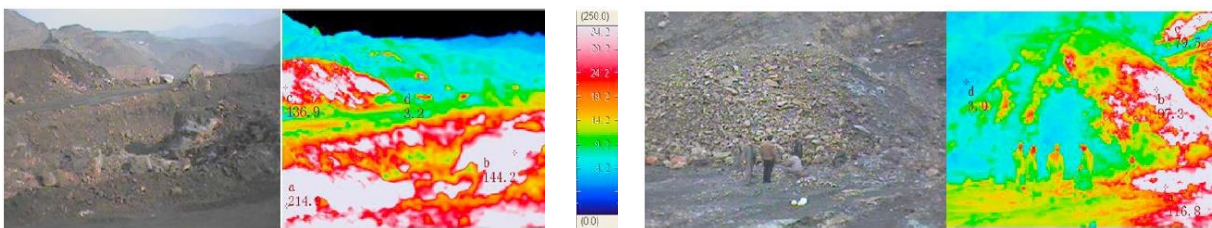


Etats-Unis : terril en feu près de Scranton, Pennsylvanie, sur une carte postale de 1908 (Malinconico, 2015).

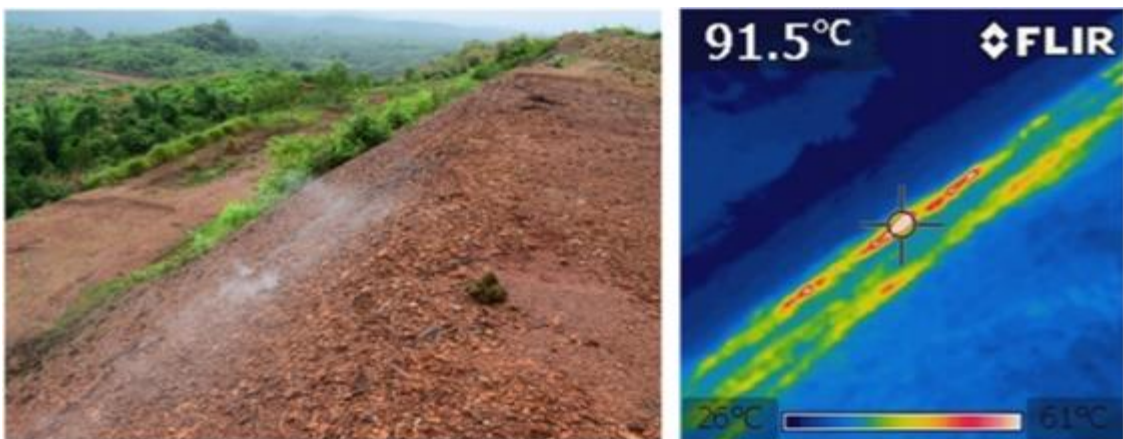
ASIE



Chine : terril en combustion à Shanxi (Mahananda, 2014)



Chine : photos en lumière naturelle et infrarouge des terrils en auto-échauffement de Baijigou (Zhai et al., 2017)



Myanmar : le terril en combustion de Ban Chaung en image réelle à (gauche) et une vue détaillée de la pente en infrarouge (à droite) (Phenrat, 2020)



EUROPE



Allemagne : terril Anna en autoéchauffement (à gauche) puis en feu (à droite) dans le bassin d'antracite d'Aachen près d'Alsdorf (Aditya, 2015)



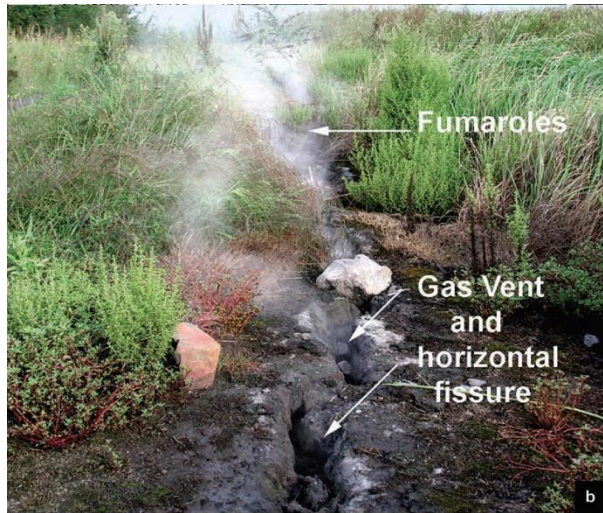
Espagne : terril de la mine d'antracite de Fabero en auto-combustion (côté droit) dans le bassin houiller d'El Bierzo (Ribeiro et al, 2019)

Espagne : terril d'Arroyo Galladas en combustion dans le bassin houiller d'El Bierzo (Ribeiro et al, 2019)



France : terril n°76 d'Avion en combustion en 1987 (a) et en 2002 (b) (Masalehdani et al., 2005)





*France : terril n°83 de Fouquières-les-Lens d'Avion en combustion en 2002 (a) et en 2005 (b) (Masalehdani et al., 2005)*

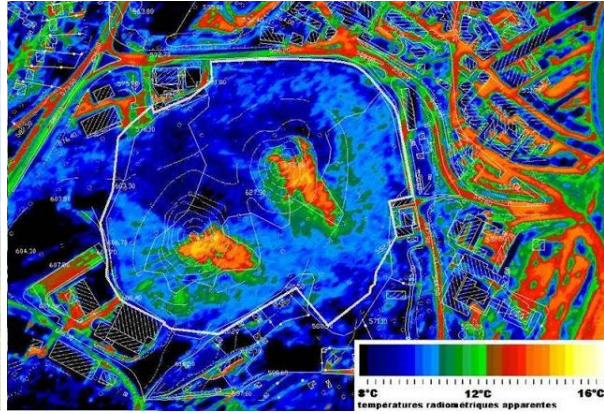


*France : terril n°157 en combustion à Haveluy (59) près de Valenciennes.*



*France : traitement d'une plate-forme de remblais houillers et sidérurgiques entrée en combustion en 1997 à Decazeville (Aveyron) par terrassement, injections spéciales et soutènement (<http://sylvain-post.blogspot.com/2012/10/echauffements-de-schistiers-plusieurs.html>)*





*France : les terrils de Saint-Etienne et leur thermographie de surface en 2002*



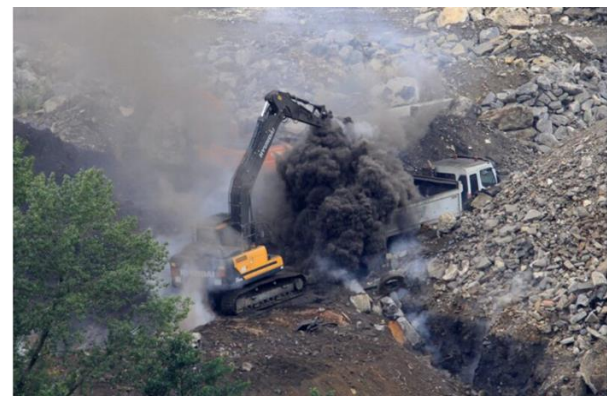
*France : le terril de la carrière Simon à Schœneck en 1999*



*France : le terril Saint-Pierre à La Ricamarie, au centre de la photo (Thiéry et al., 2019)*



*France : le terril Saint-Pierre à La Ricamarie, vue des fumerolles (à gauche) et des efflorescences de soufre (à droite) le long de crevasses sur la partie active du terril en 2014 (Thiéry et al., 2019)*



*France : fumées se dégageant du terril de Saint-Jean-de-Valérisclé au printemps 2020 (à gauche) et travaux de défournement en juin 2020 (Allard, 2020).*

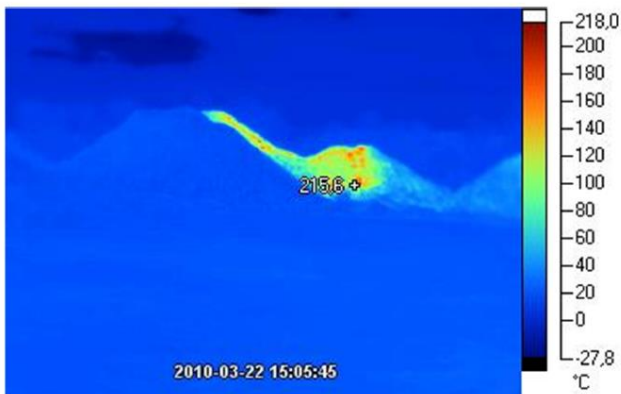




*Pologne* : décharge d'ordures ayant reçu des résidus charbonniers à Katowice-Wetnowiec en 1998, avec une combustion apparue en 2007 (Ciesielczuk, 2015a)



*Pologne* : reprise de combustion des résidus houillers du terril de Starzykowiec (Misz-Kennan et Tabor, 2015)



*Pologne* : thermogramme de surface d'un terril en cours d'exploitation (à gauche), juxtaposé à une photo dans le domaine visible (à droite) (Gogola et al., 2020).



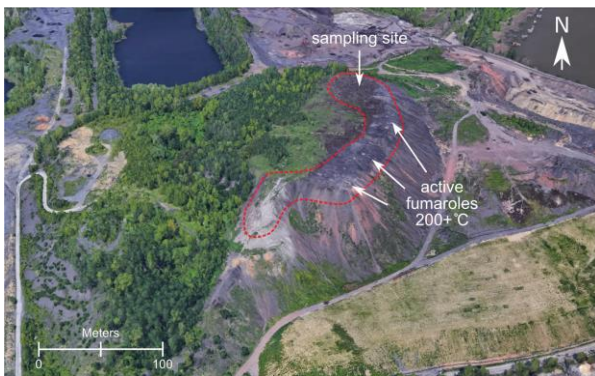
*Royaume-Uni* : terril de Bogsida en Ecosse avec sa partie brûlée (à gauche de la photo de gauche) et une vue de détail de la zone en combustion (photo de droite) (Torrance et al., 2012).



Russie : terril en combustion près d'Apanas en Sibérie (Leveresse et Nevskaya, 2021).



Terril houiller en feu près de Tcheremkhov en Sibérie (Akulov et Akulova, 2020).



Tchéquie : Vue générale du terril de Heřmanice (à gauche) et détail d'une zone en combustion (à droite) (Barcyté et al., 2018)



Ukraine : Vue d'un terril brûlé (Sleptsov, 2020) et d'un terril en combustion (Crédit P. Gombert)

### Annexe 3. Facteurs aggravants

#### A. Nature, composition et rang du charbon

Pour Falcon (1986), le processus d'oxydation du charbon attaque d'abord les molécules non aromatiques formant sa composition macérale. Le macéral dominant, qui définit la nature du charbon, est généralement la vitrinite (issu de l'houillification des écorces, des tiges et des racines) qui est considérée comme le plus sujet à l'oxydation (Misz-Kennan et Tabor, 2015).

La température d'inflammation d'un charbon augmente avec son rang, c'est-à-dire son degré d'houillification<sup>16</sup>, diminuant d'autant son potentiel d'entrée en auto-échauffement (Beamish et al., 2001 ; Misz-Kennan et Tabor, 2015 ; Misz-Kennan et al., 2020). Cette température est d'environ 150°C pour un charbon subbitumineux (renfermant <65 % de carbone), de 200 à 250°C pour un charbon bitumineux (renfermant >65 % de carbone), et de 300 à 500°C pour l'antracite (renfermant >80 % de carbone). En outre, le taux d'oxydation d'un charbon diminue également avec l'augmentation de son rang. Ainsi, les charbons de rang inférieur contenant plus d'humidité, d'oxygène et de matières volatiles sont plus facilement oxydés et, par conséquent, leur risque de combustion spontanée est plus élevé. Ces charbons (lignite et subbitumineux) sont donc plus enclins à l'autoéchauffement, tout en sachant que les conséquences d'un feu sur des charbons de rang élevé (antracite et bitumineux) sont néanmoins plus importantes du fait d'une température de combustion plus élevée (Kim et Chaiken, 1993 ; Shah, 2017). C'est ainsi que l'antracite est le type de charbon qui entre moins facilement en auto-échauffement comme le montre le cas de la Pennsylvanie (Etats-Unis) où, sur 142 terrils en combustion, seuls 25 sont des terrils d'antracite (Sussman et Mulhern, 1964) :

Les charbons renferment également des matières volatiles qui sont généralement plus faciles à oxyder que les matières non volatiles car elles sont expulsées lorsque le charbon est chauffé (Shah, 2017). Elles produisent alors un mélange de gaz, de goudrons et de composés organiques qui se condensent en huiles lors du refroidissement. Là encore, ce sont les charbons de rang faible qui renferment le plus de matières volatiles et qui sont donc très réactifs : leur taux d'oxydation est élevé et ils s'enflamment plus facilement.

La composition des matières minérales, ou cendres, d'un charbon est un dernier critère car elles ne sont pas combustibles et contribuent à diminuer son taux d'oxydation (Shah, 2017). Toutefois, ce rôle est mitigé car certains constituants des cendres (chaux, soude, composés de fer) peuvent avoir un effet accélérateur, tandis que d'autres (alumine, silice, chlorures) auraient un effet retardateur.

#### B. Accès à l'air

La pénétration d'air dans un terril dépend à la fois de facteurs intrinsèques (porosité du charbon, présence de fissures et craquelures, taille des résidus...) et extrinsèques (hauteur et volume du terril, présence ou pas d'une couche de couverture, compaction des résidus, méthode d'édification, vitesse du vent...) (Falcon, 1986 ; Carres et Saghafi, 1998 ; Akinshipe et Kornelius, 2017). Les facteurs intrinsèques du charbon semblent prédominants mais, pour un type de charbon donné, ce sont les caractéristiques du stockage qui déterminent la disponibilité de l'oxygène et le taux de dissipation de la chaleur dans l'environnement : il s'agit notamment de la hauteur du terril, de sa pente et de son âge, lequel conditionne la durée de contact des matériaux oxydables et combustibles avec l'oxygène de l'air (Zeyang et al., 2014).

##### *Porosité et perméabilité des résidus*

Dans les tas de charbon pur, plus la granulométrie est fine, plus la surface exposée par unité de poids (surface spécifique) est forte, et plus le taux d'oxydation potentiel est élevé (IMTE, 2006). Cinq terrils

---

<sup>16</sup> Le rang d'un charbon est sa position dans l'échelle de transformation du bois en charbon ou « houillification » (Totino, 1986). En conditions anaérobies, sous l'effet de la pression et de la température, le bois se transforme successivement en tourbe, puis en lignite, en charbon, en antracite et quelquefois en graphite qui est du carbone quasiment pur. Cette transformation s'accompagne d'une augmentation du taux de carbone et d'une diminution du taux d'oxygène et hydrogène.



expérimentaux ont été construits et instrumentés en Afrique du Sud avec des tailles de résidus allant de 6 mm à 180 mm (Adamski, 2003). Ils sont tous spontanément entrés en combustion dans les deux ans qui ont suivi leur édification mais la température maximale a atteint 500°C dans celui dont les éléments étaient de 6 mm, 900°C avec ceux de 25 mm et plus de 1000°C avec ceux de 180 mm. La température maximale atteinte dépend en effet de la disponibilité de l'oxygène, donc de la perméabilité des matériaux. Cela est en accord avec les observations de Corey et al. (1956) pour qui la présence de gros débris rocheux sur le pourtour d'un terril houiller favorise l'entrée d'air et peut transformer un auto-échauffement en auto-combustion. Zeyang et al. (2014) a d'ailleurs relié le taux d'oxydation  $r$  au diamètre moyen  $d$  des particules de charbon pur par la formule (où  $b$  est une constante  $\leq 0,7$ ) :

$$r \sim d^b$$

Pour Shah (2017), les petites particules de charbon qui ont une surface spécifique plus importante s'oxydent – et donc s'échauffent – plus rapidement mais elles diminuent la perméabilité du tas et finissent par limiter la circulation d'air. En revanche, les grosses particules permettent la libre circulation de l'air mais la chaleur produite peut alors se dissiper. C'est donc dans le cas d'un mélange de différentes granulométries qu'un tas de charbon va recevoir suffisamment d'oxygène sans que la chaleur générée se dissipe trop vite, et entraîner un auto-échauffement local. Par conséquent, si la méthode d'édification d'un terril crée une ségrégation de différentes tailles de charbon, elle conduira plus facilement à un auto-échauffement et à une auto-combustion. Cette répartition granulométrique dépend de la proportion de charbon et de stériles dans le terrain exploité, de la méthode de déversement et du mode d'édification du terril (Masalehdani et al., 2005 ; Misz-Kennan et Tabor, 2015). Les matériaux à grain fin ont ainsi tendance à s'accumuler dans les parties supérieures d'un terril, et les matériaux plus grossiers dans les parties inférieures, créant ainsi des conditions favorables à l'introduction d'air à la base d'un terril, et donc à son auto-échauffement.

Le compactage des résidus lors de l'édification du terril est également un paramètre important qui détermine sa perméabilité globale à l'air. Un faible compactage, associé à une forte pente, permet une meilleure perméabilité à l'air et l'eau, favorisant ainsi l'auto-échauffement par oxydation et hydratation (Bell et al., 2001). Pour Zeyang et al. (2014), c'est même le paramètre externe qui joue le rôle le plus important dans la sécurité des stockages de charbon pur : en compactant le charbon, on diminue la porosité du tas et on limite l'emballement thermique car la porosité joue à la fois sur la résistance à l'écoulement de l'air dans le tas, sur la teneur en oxygène et sur la dissipation de la chaleur.

#### *Hauteur du terril*

Dans les tas de charbon pur, la hauteur du stockage a une forte influence sur l'auto-échauffement, celui-ci pouvant être retardé ou même supprimé en-dessous d'une hauteur critique, car la déperdition de chaleur diminue en raison inverse de la hauteur du tas (Zeyang et al., 2014). Cette hauteur critique est de 5 à 8 m pour du charbon pur non compacté (IMTE, 2006). Dans les terrils houillers, il existe d'autres matériaux moins combustibles que le charbon mais Harrington et Heast (1948) citent le cas d'un terril qui a pris feu dès que sa hauteur a atteint 18 m : sa construction a dû être abandonnée au profit d'un nouveau terril qui, limité à 9 m de hauteur, n'est pas entré en auto-combustion. Ainsi, la hauteur et la forme d'un terril ont, en déterminant ses propriétés de ventilation, une influence marquée sur le déclenchement des processus d'auto-combustion (Misz-Kennan et Tabor, 2015). C'est ainsi que les terrils hauts et abrupts, en particulier ceux en forme de cône, y sont les plus sujets notamment en raison de la ségrégation granulométrique accrue et de l'influence plus prononcée du vent.

La pente d'un tas de charbon pur est également un paramètre important dans l'auto-échauffement (Zeyang et al., 2014). Les faibles pentes sont très efficaces pour retarder ce mécanisme car elles diminuent la résistance à l'écoulement de l'air dans le tas. Pour Jendrus (2016), l'auto-échauffement commence sur les pentes les plus raides d'un terril, généralement à 3-4 m au-dessus de sa base, y compris sur les côtés en pente des terrils plats où se situent les zones à plus forte activité thermique.

#### *Age du terril*

Le temps agit de deux manières sur le potentiel d'auto-échauffement d'un terril houiller :

- d'une part, le stockage de charbon et de matériaux charbonneux pendant de longues périodes augmente la probabilité de contact avec l'air (Smith et Glasser, 2005) et avec l'eau ; pour IMTE (2006), cela serait d'ailleurs le principal facteur de déclenchement de l'auto-échauffement des

tas de charbon pur ; un stockage pilote de charbon pur en Afrique du Sud a permis d'observer que la vitesse de pénétration de l'air augmentait avec le temps, en moyenne de 0,06 m/an, accroissant ainsi lentement la profondeur de pénétration de l'air (Adamski, 2003) ;

- d'autre part, il se crée des rigoles d'érosion qui entaillent le terril et forment des bords dentelés comme cela a été observé par Hebley (1956) en Pennsylvanie (Etats-Unis) ; cela augmente la surface de résidus exposés à l'oxydation et facilite l'apparition de courants d'air sur les faces du terril les plus exposées aux pluies (Akinshipe et Kornelius, 2017).

### Convection interne

La convection naturelle au sein d'un terril est un autre facteur aggravant (Phillips et al., 2009). Dans un tas de charbon pur, sans courant d'air, il n'y a pas assez d'oxygène pour stimuler l'oxydation, mais une circulation d'air trop forte dissipe la chaleur générée par l'oxydation (Shah, 2017). Cette convection vient du fait que l'air qui atteint une température supérieure à celle de l'air ambiant à l'intérieur du terril, s'élève et est remplacé par de l'air frais par effet de cheminée (Phillips et al., 2009 ; Paquette et Degas, 2016 ; Jendrus, 2016 : voir figure ci-après). Pour Rosema et al. (1999), la chaleur produite par le processus de combustion est en effet principalement transportée par convection : les gaz chauds se déplacent à travers le terril et chauffent les blocs de charbon rencontrés au cours de leur flux ascendant depuis le foyer d'auto-échauffement initial. Si ces blocs présentent une importante surface de contact, l'échange de chaleur entre le gaz et le charbon va augmenter et sa température se rapprochera de celle du gaz en circulation.

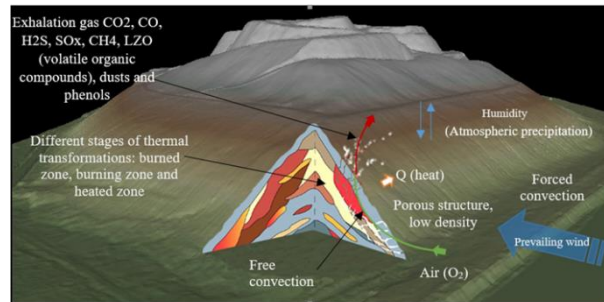
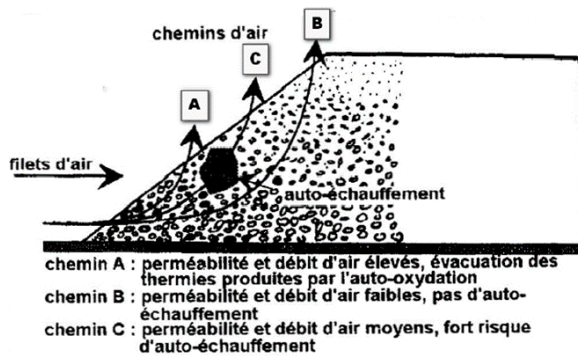
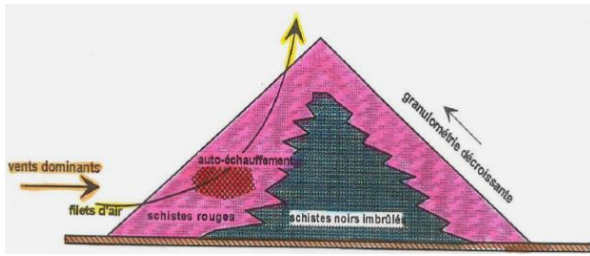


Schéma conceptuel des écoulements d'air au sein d'un terril houiller en autoéchauffement d'après Paquette et Degas (2016) à gauche, et d'après Jendrus (2016) à droite

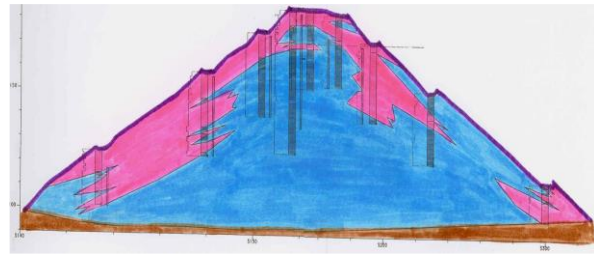
### Conditions météorologiques

Pour Zeyang et al. (2014), la vitesse du vent joue un rôle majeur dans l'auto-échauffement des tas de charbon pur. Plus le vent est fort, plus une température élevée est atteinte rapidement. La vitesse du vent a des effets non seulement sur la vitesse d'augmentation de la température mais aussi sur l'emplacement des points chauds : une vitesse du vent élevée entraîne la migration des points chauds vers l'intérieur et vers la surface supérieure du tas. Ainsi, le vent qui souffle sur les faces inclinées d'un terril facilite l'entrée de l'air (Akinshipe et Kornelius, 2017) et l'initiation des anomalies thermiques du côté au vent (Jendrus, 2016). C'est ce qu'ont observé, au Royaume-Uni, Donnelly et Bell (2011) sur le terril de Shirebrook dont la combustion a été facilitée sur son flanc exposé au vent dominant, ainsi que Misz-Kennan et Adam (2015) sur celui de Rymer Cones où l'échauffement est plus intense dans la partie la plus exposée au vent : dans ce dernier cas, les températures mesurées y ont atteint 600°C contre 60 et 80°C du côté opposé. C'est également ce qu'ont illustré Paquette et Degas (2016) dans le terril 76 d'Avion (Pas-de-Calais) où l'épaisseur de la zone de schistes brûlés est plus importante du côté exposé aux vents dominants (voir figure suivante). La convection causée par le vent est même considérée comme le processus dominant de la pénétration de l'air par Misz-Kennan et Tabor (2015), et les terrils hauts et abrupts, en particulier ceux en forme de cône, y sont les plus sujets.





a) Schéma conceptuel du rôle des vents dominants dans l'épaississement de la zone de « schistes rouges » (brûlés)



b) Résultats des sondages de reconnaissance des ressources en schistes rouges du Terril 76 d'Avion (Pas-de-Calais)

*Effet des vents dominants sur la combustion des terrils houillers (Paquette et Degas, 2016)*

Dans une moindre mesure, les « respirations » barométrique et thermique, respectivement dues aux changements de pression atmosphérique ou de température ambiante, peuvent créer des flux d'entrée d'air frais et de sortie de gaz de combustion au sein d'un terril (Akinshipe et Kornelius, 2017). Onifade et Genc (2019) pensent même que l'entrée d'air due au vent provoque une différence de pression entre le haut et le bas d'un terril, ce qui renforce encore les processus de convection thermique.

### C. Autres facteurs

#### *Autres types de déchets stockés*

La composition classique d'un terril houiller en Pennsylvanie (Etats-Unis) vers le milieu du 20<sup>e</sup> siècle est la suivante (Hebley, 1956) : charbon, sable, schiste, argile, gypse, particules de carbonate de fer et de sulfure de fer, ainsi que divers déchets inflammables (bois, huiles de carter, chiffons huileux). Pour Sussman et Mulhern (1964), on peut même y trouver des déblais végétaux et des ordures ménagères. Ainsi, dans le bassin houiller de Haute-Silésie (Pologne), la plupart de terrils étaient autrefois mixtes, incluant des déchets urbains et industriels (Ciesielczuk, 2015a) : ce n'est que depuis les années 1980 qu'on n'autorise le dépôt d'autres déchets sur les terrils houillers que si leur réutilisation est impossible. En Pennsylvanie (Etats-Unis), 40 à 51 % des résidus miniers stockés étaient combustibles (charbon, bois) et 5 à 13 % oxydables (sulfures), le reste étant composé de cendres inertes (Hebley, 1956).

Les matériaux intercalaires (situés entre les couches de charbon exploitées) peuvent également être propices à la combustion en raison de leur nature carbonée (Adamski, 2003 ; Akinshipe et Kornelius, 2017). Lorsque les schistes houillers contiennent des taux élevés de kérogène, sorte de mélange de divers composés organiques, ils peuvent s'enflammer aussi spontanément que du charbon.

#### *Rayonnement solaire et température ambiante*

Dans les tas de charbon pur, l'importance du rayonnement thermique d'origine solaire détermine la stabilité chimique du charbon (Zeyang et al., 2014). Les cycles quotidiens de rayonnement solaire affectent la température de surface du tas avec une amplitude maximum d'environ 30°C. La température ambiante exerce ses effets sur le processus d'oxydation et sur le mécanisme d'évaporation-condensation de l'humidité car le taux de consommation d'oxygène double pratiquement lorsque la température augmente de 10°C (loi d'Arrhénius).

#### *Humidité de l'air et précipitations*

L'humidité du charbon affecte également le potentiel d'auto-échauffement des tas de charbon pur par des processus d'adsorption et de désorption fonction de la pression partielle de la vapeur d'eau à la fois dans l'air et dans le charbon (Zeyang et al., 2014). Cette humidité peut renforcer l'auto-échauffement dû à la chaleur libérée dans le tas lors de l'hydratation du charbon. Ainsi, le temps d'apparition de points chauds mesuré dans un tas de charbon pur situé à Tianjin (Chine), sous un climat frais et humide, a été de seulement 18 jours contre 52 jours pour le même charbon stocké à Terruel (Espagne), sous un climat plus sec.

L'apparition et la localisation des points chauds au sein d'un terril sont également influencées par la pluie qui accélère la décomposition de la pyrite et l'activation de la matière organique, lui permettant ainsi d'absorber plus d'oxygène (Misz-Kennan et Tabor, 2015). Toutefois, si la présence d'humidité jusqu'à un certain niveau favorise le processus d'auto-échauffement, l'excès d'eau libre peut ralentir ce processus.

#### *Annexe 4. Détail des principales méthodes de mitigation des feux de terril*

##### A. Défournement

Harrington et Heast (1948) citent le cas d'un terril d'antracite en feu à Mahanoy City (Etats-Unis, Pennsylvanie) où 1,3 Mm<sup>3</sup> de matériaux en combustion ont été extraits afin de mettre à l'air la zone en combustion.

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 tomber les débris en feu jusqu'au bas du terril où un bulldozer a pu les étaler et les compacter en en chassant l'air.

A Brymbo, au nord du Pays de Galles (UK), 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 m<sup>3</sup> 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. En plus de cela, une tranchée de 1,6 à 2 m de largeur pour 6 m de profondeur a été creusée et remplie de blocs broyés de calcaire, et 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).



*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.

En Pologne, en Haute-Silésie, le terril en combustion de la mine Marcel a été creusé en plusieurs endroits afin de refroidir les résidus en combustion (Misz-Kennan et Tabor, 2015).

A Barnsley, au Yorkshire (Royaume-Uni), on a démantelé deux terrils en 1995 afin de réhabiliter un site de 49 ha (Donnelly et Bell, 2011).



*Creusement des terrils en combustion de la mine Marcel en Pologne (à gauche) et de Barnsley au Royaume-Uni (à droite) en vue de refroidir les résidus (Misz-Kennan et Tabor, 2015)*

Pour Misz-Kennan et Tabor (2015), il semble impossible d'éviter l'accumulation de chaleur à l'intérieur d'un ancien terril houiller, et les tentatives pour les sceller échouent également. Ainsi, il semble que la seule solution possible soit 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 les décharges de Starzykowiec et les cônes de Rymer.



*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 m<sup>3</sup> de matériaux en combustion a été réalisé. 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.





*Vue des opérations de défournement du terril de Rochebelle près d'Alès*

### B. Isolement de la partie en combustion

Dès 1948, Harrington et Heast proposent d'isoler la zone en combustion 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'antracite de Mahanoy City a brûlé pendant 10 ans à partir de 1937 avec une zone en combustion qui mesurait environ 900 m<sup>2</sup> ; 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. 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.

A 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).

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.



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

### C. Etouffement du feu

Corey et al. (1956) signalent que l'utilisation d'eau n'a qu'un intérêt limité dans l'extinction de ce type de feux.

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.

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 s'est agi de la 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.

#### *Par aspersion de liquides*

La première solution qui vient à l'esprit des intervenants, notamment des pompiers, est d'arroser le terril et ses alentours immédiats en feu avec de l'eau ou un produit aqueux. Harrington et Heast (1948) font remarquer dès 1948 que le feu reprend souvent à proximité de la zone éteinte, 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. Néanmoins, ces auteurs signalent que plusieurs mines sont ainsi obligées d'éteindre de nouveau chaque année les feux des terrils qui ont été arrosés.

En revanche, la pulvérisation d'eau semble efficace pour éteindre ce type de feux mais à condition de pulvériser de l'eau sur la totalité du terril, sinon des courants d'air peuvent se former et raviver localement le feu (Harrington et Heast, 1948). Il faut cependant faire attention au risque d'explosion de vapeur.

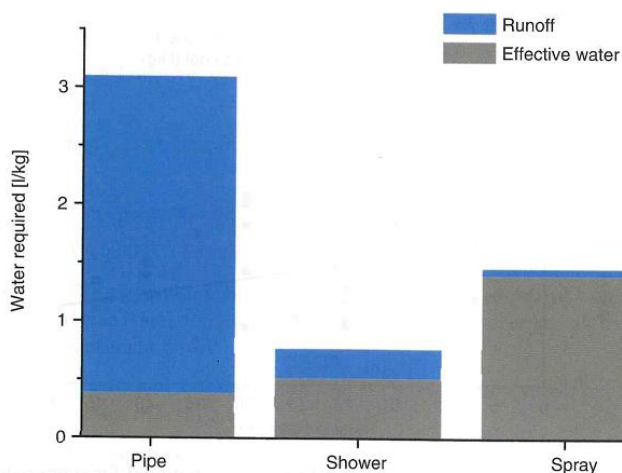
Harrington et Heast (1948) signalent que la compagnie minière responsable d'un terril en feu en Pennsylvanie n'a rien été fait pour tenter de l'éteindre, arguant du fait qu'elle avait déversé quelques années auparavant plusieurs milliers de m<sup>3</sup> d'eau sur un feu similaire qui a continué de brûler.

Pendant la seconde guerre mondiale, il a fallu éteindre nombre de terrils en feu du Royaume-Uni car ils servaient de repères aux bombardiers allemands pendant la nuit. C'est donc à cette époque que beaucoup de progrès ont été faits dans ce domaine. Un rapport de 1942, cité par Harrington et Heast (1948), explique que l'application d'eau est très efficace si elle est envoyée sous forme pulvérisée (pluie fine ou brouillard) et qu'elle ne perturbe pas la structure de surface du terril. 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 ». Cette eau contribue également à créer une croûte étanche à la surface du terril. Après plus d'un an de tests, le protocole a donné de bons résultats, contrairement aux injections d'eau dans des trous ou des tranchées (voir ci-après).



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 injectant de l'eau au moyen d'un tuyau, d'une pomme de douche ou d'un pulvérisateur :

- le tuyau d'eau prend trois fois plus de temps et consomme 80 % d'eau en plus pour parvenir au même résultat, 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 pulvérisateur 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.



*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 m<sup>3</sup> d'eau et des dizaines de m<sup>3</sup> de mousse.

Toujours en Pennsylvanie, la fumée et l'odeur d'un terril d'antracite 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 m<sup>3</sup> d'eau sur ce terril, pendant qu'une pelleteuse ramassait les résidus en combustion, mais sans réussir à éteindre le feu.

Un exemple original d'aspersion d'eau concerne la tentative d'extinction du terril du Mont Ricateau en France, près d'Alès (Gard), entré en combustion en juillet 2004 à la suite d'un incendie de forêt<sup>4</sup>. Profitant des bombardiers d'eau venus éteindre l'incendie de forêt, ceux-ci ont également tenté d'éteindre l'incendie du terril mais sans succès.



*Tentative d'extinction du terril en combustion de Rochebelle (Gard) à l'aide de bombardiers d'eau<sup>4</sup>*

### *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). Par contre, l'application d'eau sous forme pulvérisée s'est avérée très efficace (voir précédemment).

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 m<sup>3</sup>/jour (Masalehdani et Potvin, 2004).

### *Par injection d'autres liquides*

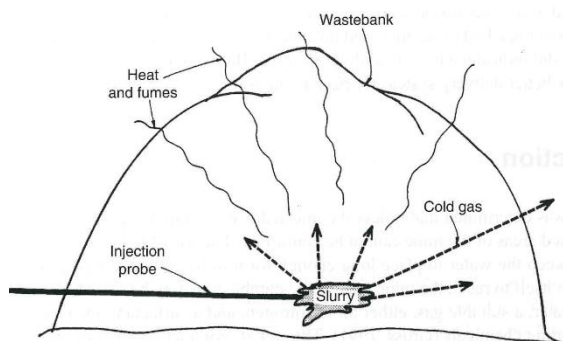
Dès 1948, Harrington et Heast proposent une nouvelle méthode qui consiste à injecter une boue minérale ou du coulis de ciment via des forages. Ils citent quelques résultats obtenus :

- 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 ;
- dans l'Ohio, 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.

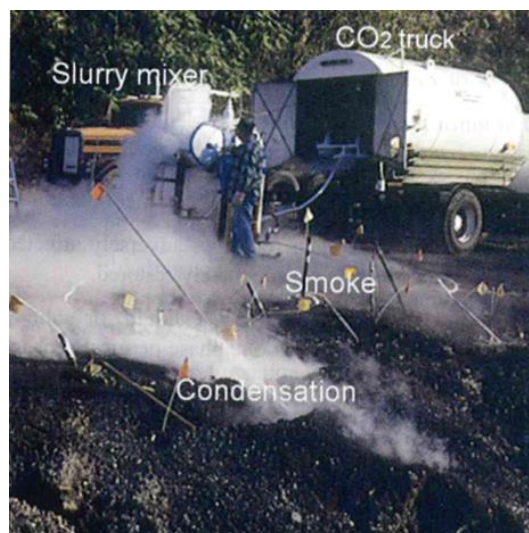
Cependant, Harrington et Heast (1948) signalent que cette même technique employée sur d'autres sites n'a pas eu de succès. Il a même été imaginé de pérenniser le système en creusant des tranchées à la surface du terril et en les remplissant fréquemment d'eau afin qu'elle s'infilte.

Vers 1996, un test d'extinction par de la mousse a été réalisé dans l'US Bureau of Mines de Lake Lynn (Pennsylvanie, Etats-Unis) sur un tas de 1,8 m<sup>3</sup> 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 de polyuréthane 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> gazeux qui devrait inerte 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 CO<sub>2</sub> et 4600 kg d'azote liquide. 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, États-Unis)

*Injection de boue cryogénique CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> 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).

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 loëss 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<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 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 antipyrrogènes 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.

#### *Par inertage au gaz*

Pour Nalbandian (2010) qui a étudié les feux de blocs de charbon entassés dans un silo, l'inertage au CO<sub>2</sub> est une technique largement utilisée pour prévenir les incendies suspects en milieu confiné (silos ou sous-sol). Le CO<sub>2</sub> est stocké sous forme liquide puis vaporisé. On pousse ensuite la vapeur de CO<sub>2</sub> 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.

#### D. Confinement par recouvrement solide

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 États-Unis :

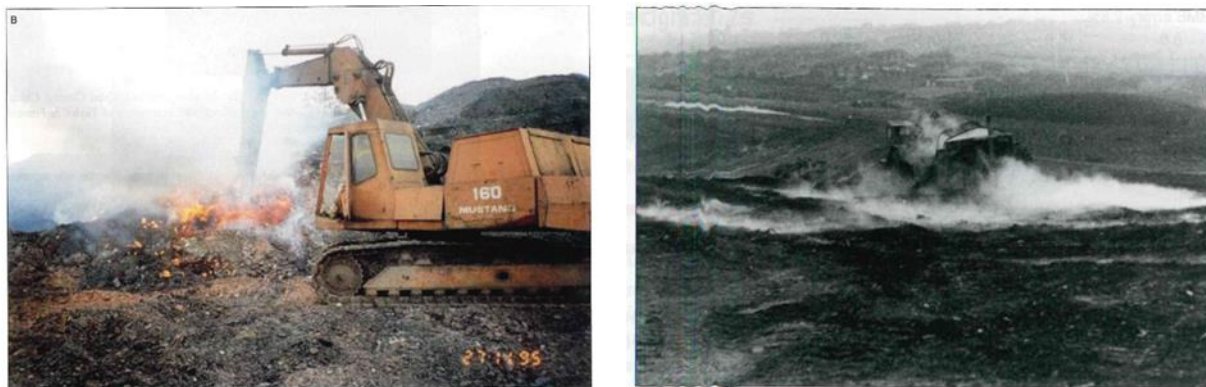
- à Mahanoy City (Pennsylvanie), la combustion d'un terril de résidus d'antracite en feu depuis 1937 a pu être ralentie (mais non stoppée) en recouvrant la zone en feu avec 700 t de poussière de roche qui ont créé un écran d'environ 700 m<sup>2</sup> sur 0,60 à 90,90 m d'épaisseur ;

- en Virginie de l'Ouest, un terril de 12 m de hauteur sur environ 6 000 m<sup>2</sup> 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 la 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 continus de la couverture ne soient prévus, ce qui fait qu'elle est généralement considérée comme un échec sur le long terme.

A 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, incommodeant 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). 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 décaper 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 donc été éteints par pulvérisation de cendres et le site a enfin pu être restauré.



*Démantèlement par décapage (à gauche) puis nivellement et reprofilage (à droite) des terrils de Barnsley au Royaume-Uni (Donnelly et Bell, 2011)*

A 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 recouverts 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.

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 SO<sub>2</sub> 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 SO<sub>2</sub>, 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 surface<sup>17</sup>. 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).

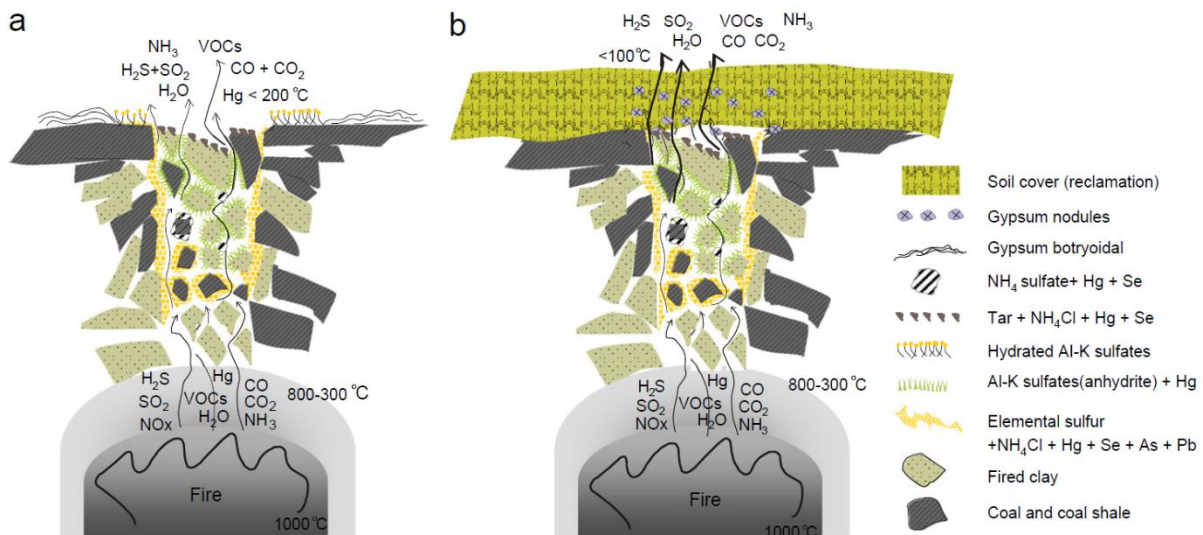


Fig. 8. Model for the occurrence and distribution of CGEs from spontaneous coal combustion in coal waste gobs: a) without soil cover; and b) with soil cover.

a) En l'absence de couverture

b) En présence de couverture

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

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'autoéchauffement 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'autoéchauffement 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 élevé à moyen d'autoéchauffement. En revanche, il n'y a pas eu d'autoéchauffement pendant toute la durée de l'observation (190 jours) dans le tas PCE, ce qui indique qu'il s'agit d'un tas est 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

<sup>17</sup> 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).



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 appliqués : 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 ( $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ ) 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 Pologne, on peut citer l'exemple de traitement de la décharge de déchets municipaux abandonnée mélangée en 1997 avec des résidus de charbon à Katowice-Wełnowiec (Ciesielczuk, 2015a). 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. Notons qu'auparavant, on avait tenté de l'éteindre en creusant des sondages afin de refroidir les matériaux en combustion mais que cela a au contraire apporté de l'oxygène et intensifié la combustion.



*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, 2015a)*

En Pologne, le terril de Rymer est l'un des nombreux 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 de la décharge 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. 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.



*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)*

En France, plusieurs terrils houillers ont été confinés par recouvrement<sup>18</sup>. 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). La combustion a 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 :

- réaliser un masque du pied de talus (22 mètres de haut, 400 mètres de long, 115 000 m<sup>3</sup>) 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 m<sup>3</sup>), pour une première action rapide d'étanchéification ;
- poursuivre les apports de sablons pour continuer à masquer les foyers en crête (20 000 m<sup>3</sup>).

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 m<sup>3</sup> 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° degrés et le terril a été ensemencé par projection de graines et de fertilisants. L'autoéchauffement 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€.

---

<sup>18</sup> <http://sylvain-post.blogspot.com/2012/10/echauffements-de-schistiers-plusieurs.html>



a) Projection de coulîs sur les flancs du terril



b) Vue générale du site réhabilité

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

### E. Compaction

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 compactés.



*Compaction des résidus récents du terril Marcel par « rouleau vibreur »*



Annexe 5. Nombre, dimensions et observations des terrils en autoéchauffement ou en combustion d'après la synthèse bibliographique

Pays	Ville/Région	Localisation	Date de signallement	Nombre de terrils	Hauteur (m)	Surface (ha)	Volume (Mm3)	Masse (Mt)	Référence bibliographique	Observations
Afrique du Sud	Witbank coalfield	Witbank coalfield	<2001	2					Bell et al. (2001)	
Afrique du Sud	Witbank coalfield	Karoo	<1986	>2					Falcon (1986)	De nombreux terrils produisent de la fumée et du feu à la suite de combustion spontanée
Afrique du Sud	Limpopo	Grootegeluk	<2003	1	24				Adamski (2003)	
Afrique du Sud	Limpopo	Grootegeluk	Depuis 1980	1					Adamski (2003)	
Allemagne	Alsodorf	Anna I	1850	1		42			Witzke et al. (2015), Aditya (2015)	
Allemagne	Ruhr	?	<2015	>1					Kürten et al. (2015)	
Allemagne	?	?	<2005	7					Sinha et Singh (2005)	
Australie	?	?	?	>11					Carras et al. (2009)	
Belgique	Wallonie	Terril de l'Héribus à Cuesmes	<2001	1	75	18,24	6,00		Monjoie et Schroeder (2001), Nyssens et al. (2012)	Combustion et glissement
Belgique	Wallonie	Terril de la petite Bacure à Herstal	<1999	1	83	10,66	3,23		idem + Corexens (2000)	A brûlé en 1999. Après une forte pluie, glissement de 1344 m³ sur le côté brûlant du terril
Belgique	Wallonie	Terril du Sercic à Liège		1					terrilsdelegee.11vm-serv.net	Effondrement et "nuée ardente"
Belgique	Wallonie	le terril Saint-Charles à Ransart	Depuis 1994	1	40	6			Monjoie et Schroeder (2001)	A brûlé suite à l'incendie d'une menuiserie
Belgique	Wallonie	Grand Terril du Martinet (Roux)		1	85		5,04		http://www.quartierdumartinet.be/	Anciennement en combustion
Belgique	Hainaut	Montignies-le-Tilleul	1934	1					Paquette et Degas (2016)	Explosion du terril
Belgique	Hainaut	Pâturages	1908	1					Paquette et Degas (2016)	Explosion du terril
Belgique	Wallonie	St-Nicolas-les-Liège	De 1973 à 1975	1					Paquette et Degas (2016)	Terril en feu suite à un feu de broussailles, éteint par défonnement
Belgique	Borinage	Terril 3 Grand Busson	Depuis 1929	1					Nyssen et al. (2012)	
Belgique	Wallonie	Terril du Hassart, près de Liège	<2002	1	90	15,78	5,30		Nyssen et al. (2012)	A brûlé et subi un glissement de débris en 2002
Belgique	Wallonie	Terril des Quatre Jean, Ula Queue-du-Bois	<2012	1		5,81	0,50		Nyssen et al. (2012)	A brûlé et subi un glissement de terrain
Belgique	Wallonie	Terril Nord de Gilly, dans le bassin de Charleroi	<2012	1	44	8	1,03		Nyssen et al. (2012)	A brûlé et subi un glissement de terrain
Belgique	Wallonie	Terril de Saint-Charles 2 à Ransart	<2012	1	60	6,07	0,80		Nyssen et al. (2012)	A brûlé et subi deux glissements de terrain
Belgique	Wallonie	Terril Titan du Levant	<2012	1	87	20,58	3,99		Nyssen et al. (2012)	A brûlé et subi deux glissements de terrain en 1992 et 1994.
Belgique	Wallonie	Terril du Crachat à Frameries	<2012	1	78	17,34	4,39		Nyssen et al. (2012)	Partiellement en combustion
Belgique	Wallonie	Bassin de la Campine, dont Zwartberg et Eisdén	<2012	>2					Nyssen et al. (2012)	
Brsil	?	Criciúma, Urussanga et Siderópolis	Depuis 30 ans	>3		2-4			Cveira et al. (2016)	
Chine	Mongolie Intérieure	Wuda	2003-2014	1		-10			Song et al. (2015)	
Chine	Ningxia Hu	Baijigou	<2017	1	14	28			Zhai et al. (2017)	
Chine	Chine	Chine	2008	371				10,2	Zhao et al. (2008)	Plus de 1500 terrils houillers en Chine (5 Gt) dont 108 dans le Shanxi (1,1 Gt)
Espagne	Cantabrie	El Bierzo	<2019	571		-5200			Ribeiro (2019)	
Espagne	Leon	Arroyo Galladas	<2016	1	8-12	23	1,60		Ribeiro et al. (2016b)	
Espagne	Leon	Fabero	<2016	1					Ribeiro et al. (2016b)	
Etats-Unis	Pennsylvanie	?	<2001	58					Stracher et Taylor (2011)	
Etats-Unis	Alabama	Mulga	1989-2010	1	30	1			Stracher (2010)	A pris feu en 1989 à cause d'ordures ménagères, puis en 2006
Etats-Unis	Virginie Occidentale	Albright	1998	1		0,36			Kim (2011)	
Etats-Unis	Ohio	Midvale	<2004	1					Kim (2011)	
Etats-Unis	Kentucky	Tip Top	<2018	1					Kruszewski et al. (2018)	
Etats-Unis	Wyoming	Ruifukluns, Truman Shepherd	<2018	2					Kruszewski et al. (2018)	
Etats-Unis	Kentucky	Old Smokey	<2018	1					Kruszewski et al. (2018)	
Etats-Unis	Indiana	Indiana Mine	<1948	1	18				Harrington et Heast (1948)	Le terril a pris feu pendant sa construction (H=18 m). Le nouveau terril a été limitée à 4,5 m.
Etats-Unis	Pennsylvanie	Région du nord-est	2019	8-10					The Associated Press (2019)	La région du nord-est a environ huit à dix feux de charbon actifs
Etats-Unis	Pennsylvanie	Simpson	<2014	1		2,8			The Associated Press (2019)	Terril d'antracite en feu.
Etats-Unis	Pennsylvanie	Mahanoy City	1937	1	57	10	>1,29		Harrington et Heast (1948)	
Etats-Unis	Pennsylvanie	Northern Anthracite Field	<1948	1	38	1,3832			Harrington et Heast (1948)	Le feu s'est éteint puis a repris après décapage du terril.
Etats-Unis	Virginie de l'Ouest	?	<1948	1	12	0,639			Harrington et Heast (1948)	Le terril a brûlé 10 ans jusqu'à son recouvrement par de l'argile
Etats-Unis	Virginie de l'Ouest	?	1998	1		2,36			Kim (2011)	Essai de récupération de la chaleur d'un terril en combustion
Etats-Unis	Ohio	Midvale	<2004	1					Kim (2011)	Test d'extinction par boue cryogénique
Etats-Unis	Ohio	?	<1948	1	30	16			Harrington et Heast (1948)	Eteint par injection d'eau
Etats-Unis	Alabama	?	<1948	1					Harrington et Heast (1948)	Le terril en feu s'est éteint puis a explosé (2 morts).
Etats-Unis	15 états charbonniers	?	<1964	488	de 6 à 90 m	de 0,5 à ++ dizaines d'ha			Sussman et Mulhern (1964)	Plusieurs terrils brûlent depuis plus de 20 ans en Pennsylvanie
Etats-Unis	Kentucky	Lots Creek mine	<2018	1					Kruszewski et al. (2018)	
France	Hauts-de-France	Avion	Depuis 1987	1	85	9,6		5,0	Masalehdani et Potvin (2004), Thery et al. (2013)	
France	Hauts-de-France	Haveluy		1					Thery et al. (2013)	
France	Hauts-de-France	Rieulay	<2019	1	26				Déthé (2019)	
France	Rhône-Alpes	La Taupe		1					Thery et al. (2013), Paquette et Degas (2016)	1 mort par brûlure en 1982
France	PACA	Gardanne		1					Thery et al. (2013)	
France	Saône-et-Loire	Découverte Sainte-Hélène à Montceau	1985	1					Paquette et Degas (2016)	Petite explosion d'un flanc de talus chaud après débordement des eaux en crue
France	Occitanie	Champléon	1998	1					Paquette et Degas (2016)	Explosion dans une conduite d'eau au sein du terril en combustion lors d'un violent orage
France	Occitanie	Terril de Ricatteau (Aïes)	2004	1			1,70		http://sylvain-post.blogspot.com/2012/10/	En combustion suite à un incendie de forêt
France	Occitanie	Terril de Rochelle (Aïes)	2004	1			0,60		http://sylvain-post.blogspot.com/2012/10/	En combustion suite à un incendie de forêt
France	Rhône-Alpes	La Ricamarie	Depuis 1950	1					Thery et al. (2013)	
France	Hauts-de-France	Terril T9 de Hallcourt	<2015	1					Vanhee (2015)	
France	Hauts-de-France	Fouquières-les-Lens	Depuis 2001	1		82	0,47		Masalehdani et Potvin, 2004	
France	Rhône-Alpes	Deux terrils à Saint-Etienne (42)	Depuis 1940	2					http://sylvain-post.blogspot.com/2012/10/	
France	Grand Est	Terril de la carrière Simon à Schœneck, Moselle	Depuis 1998	1	50-60	75	3,50		http://sylvain-post.blogspot.com/2012/01/	
France	Hauts-de-France	Loos-en-Gohelle	<2015	1	50-60	-8			Vanhee (2015)	
France	Hauts-de-France	Terril Fosse 6 d'Auchel à Calonne-Ricouart (Nord)	<1975	1	92				http://sylvain-post.blogspot.com/2012/10/	Explosion et écoulement le 26/08/1975
France	Hauts-de-France	Terril Fosse 5 d'Auchel à Calonne-Ricouart (Nord)	1930	1					Richards et al. (1993)	Explosion et glissement de terrain
France	Hauts-de-France	Terril Fosse 3 d'Auchel à Calonne-Ricouart (Nord)	1973, 1974	1					Richards et al. (1993)	Explosion et glissement de terrain (2 blessés)
France	Hauts-de-France	Brusay-en-Artois	1982	1					Richards et al. (1993)	Explosion (1 mort)
France	Hauts-de-France	Blignières (Nord)	1968	1					Richards et al. (1993)	Explosion et glissement de terrain
France	?	?	2016	422					Paquette et Degas (2016)	50 % des terrils édifiés se sont consumés (dans le Nord-Pas de Calais)
France	Hérault	Saint-Gély-du-Fesc	1991	1					Paquette et Degas (2016)	Auto-échauffement d'un petit dépôt de lignite extrait d'un terrassement routier
France	Puy-de-Dôme	Terril Bayard	2014	1					Paquette et Degas (2016)	Auto-échauffement, absence de combustion
France	Loire	Terril du Fay	2003	1					Paquette et Degas (2016)	Auto-échauffement, absence de combustion
France	Gard	Région de Portes	1985	10					Paquette et Degas (2016)	10 terrils sur 40 sont entrés en combustion suite à un incendie de forêt
France	Hauts-de-France	Ancienne fosse 9, Lens	1988	1					Paquette et Degas (2016)	Explosion d'une bombe de la 2e guerre mondiale sous un terril en feu
France	Aveyron	Cranac, Verse des Prés	1997	1					Paquette et Degas (2016)	Creusement d'une tranchée coupe-feu
France	Gard	Terril de Palmesalade	1988	1					Paquette et Degas (2016)	En combustion suite à un incendie de forêt
France	Allier	Commentry	2013	1					Paquette et Degas (2016)	En combustion suite à un ébouage
France	Moselle	Terril Wendel	2003	1					Paquette et Degas (2016)	En combustion suite à un incendie de voiture volée
France	Nievre	La Machine	1988	1					Paquette et Degas (2016)	En combustion suite à un feu de bois de scierie
France	Loire	Saint-Etienne (remblai Bd F. d'Espérey)	2013	1					Paquette et Degas (2016)	Accélération de l'affaissement en 2013
France	Moselle	Schistier Simon	1999	3					Paquette et Degas (2016)	
France	Loire	Saint-Etienne (terrils Couriot)	Depuis 1950	2					Paquette et Degas (2016)	
France	Loire	Saint-Etienne (massif de la colline des Rosiers)	Depuis 1980	3					Paquette et Degas (2016)	
France	Loire	Saint-Etienne (remblai chaussée en construction)	2003	1					Paquette et Degas (2016)	
France	Gard	Terril 70 de la cote 595	<1985	1					Paquette et Degas (2016)	En combustion partielle
France	Nord	Terril 162, fosse Renard, Denain	2001	1					Paquette et Degas (2016)	Tassement du cône, fissuration, crevasses
France	Nord	Terril de la fosse 7, Béthune	<1973	1					Paquette et Degas (2016)	Exploité en 1973
France	Aveyron	Decazeville	2005	1					Paquette et Degas (2016)	
France	Nord	Terril d'Escaudain	<1949	1					Paquette et Degas (2016)	Exploité en 1949
France	Haute-Saône	Terril de Ronchamp	1993	1					Paquette et Degas (2016)	
France	Loire	Terril à GrandCroix	1984	1					Paquette et Degas (2016)	
France	Loire	Terril de la Centrale St-Thomas	1957	1					Paquette et Degas (2016)	1 mort par asphyxie
France	Hauts-de-France	Terril 13/18 (Billy-Montigny?)	<1958	1					Paquette et Degas (2016)	1 mort par asphyxie
France	Loire	Terril de St-Pierre	2010	1					Paquette et Degas (2016)	
France	BdR	Terril des Sauvaires	<2016	1					Paquette et Degas (2016)	
France	BdR	Terril des Moix, Gardanne	<2016	1			3,00		Paquette et Degas (2016)	Mine de lignite
France	Hauts-de-France	Terril de Blignières	1988	1					Paquette et Degas (2016)	2 personnes brûlées à la suite d'une déflagration
France	Auvergne-Rhône-Alpes	Terril du Chambon-Fegerolles	1974	1					Paquette et Degas (2016)	2 personnes brûlées (1 mort, 1 blessé)
France	Hauts-de-France	Terril du Pont Ampère, Liévin	1973	1					Paquette et Degas (2016)	1 personne brûlée à la suite d'une déflagration
France	Hauts-de-France	Terril 76, Avion, Fosse 7 de Liévin	2002	1					Paquette et Degas (2016)	Terril brûlé puis exploité
France	Hauts-de-France	Terril 79, Hersin-Coupligny	2002	1					Paquette et Degas (2016)	Terril brûlé puis exploité
France	Hauts-de-France	Terril d'Haveluy	2001	1					Paquette et Degas (2016)	En combustion
France	BdR	Terril du Défends	<2016	1					Paquette et Degas (2016)	En combustion
France	Nord	Terril à Béthune	1975	1					Paquette et Degas (2016)	4 morts et 2 blessés lors de l'explosion du terril
France	Nord	Cavalière de Fouquières	<2016	1					Paquette et Degas (2016)	En combustion
France	Hauts-de-France	Terrils 79 et 79a, Loos-en-Gohelle	2001	2					Paquette et Degas (2016)	Terril brûlé puis exploité
France	PACA	Terril du puits Léonie à St-Savournin (13)	2017	1					DDTM13 (2018?)	A déclenché un feu de forêt. 50 m3 ont ensuite été déformés.
France	Auvergne-Rhône-Alpes	Terril de Sainte-Florence (43)	2020	1					BRGM (2020)	805 m3 de matériaux du terril ont été déformés et 920 m3 d'argiles ont été apportés sur site
France	Occitanie	Terril du Parc à Bois, St-Jean-de-Valérisole (30)	2020	1					Motte (2020ab)	Lié à un incendie industriel. Risque d'échauffement d'un grand terril proche (1 Mm3)
Inde	Jharia	Jellajora	<2011	1					Mishra et al. (2011)	
Hongrie	Sud du Pays	Terrils de Komlo, Pecs-Vasas, Mecsek Mts.	<2008	3					Szakall et Kristaly (2998)	Terrils en combustion
Hongrie	Sud du Pays	Terril de Pecs	<2016	1						



Note : il s'agit ici de la version française d'un document traduit et envoyé majoritairement en anglais.

**QUESTIONNAIRE CONCERNANT LA PROBLEMATIQUE DES TERRILS DE CHARBON EN AUTOECHAUFFEMENT**

Nom : ..... Prénom : .....

Organisme : .....

**QUESTION 1: Combien y a-t-il de terrils houillers en autoéchauffement ou en autocombustion dans votre zone ?**

Pays : .....

Zone concernée : .....

Nombre total de terrils houillers dans la zone : .....

Nombre ou % de terrils en autoéchauffement ou en autocombustion : .....

**QUESTION 2 : Quels sont les principaux problèmes que ces terrils en combustion font peser dans la zone d'étude ?**

Echelle de mesure : 0 = inconnu, 1 = très fréquent et/ou très grave, 2 = fréquent et/ou grave, 3 = peu fréquent et/ou peu grave, 4 = jamais signalé,

Fréquence du risque de brûlure des personnes : .....

Fréquence du risque d'instabilité (glissement, effondrement) : .....

Fréquence du risque d'incendie ou d'explosion : .....

Fréquence du risque de pollution de l'air ou de nuisances olfactives : .....

Fréquence du risque de pollution des sols ou des eaux : .....

Fréquences des autres risques : .....

Autres risques (préciser) : .....

Gravité du risque de brûlure des personnes : .....

Gravité du risque d'instabilité (glissement, effondrement) : .....

Gravité du risque d'incendie ou d'explosion : .....

Gravité du risque de pollution de l'air ou de nuisances olfactives : .....

Gravité du risque de pollution des sols ou des eaux : .....

Gravité des autres risques : .....

**QUESTION 3 : Quelles sont les principales méthodes de mitigation utilisées dans cette zone ?**

Défournement (partiel ou total) : .....

Creusement de tranchée : .....

Aspersion de liquide en surface : .....

Injection de liquide ou de gaz en profondeur : .....

Etanchéification par recouvrement et/ou compaction : .....

Autres : .....

Autres (préciser) : .....

.....

**OBSERVATIONS** : .....

.....

.....

## Annexe 7. Liste des personnes ayant répondu au questionnaire et de leurs fonctions

Pays	Nom	Fonction	Organisme	Ville
Afr. du Sud	Sezer Uludag	Maître assistant	Université, Département d'ingénierie minière	Prétoria
Allemagne	Peter Goerke-Mallet	Professeur	Centre de recherche sur l'après-mine, École technique supérieure	Bochum
Allemagne	Hartwig Gielisch	Responsable de la prospection	Service de Consulting et d'Ingénierie (DMT GROUP)	Essen
Belgique	Mathieu Veschkens	Directeur des Risques Chroniques	Institut Scientifique de Service Public (ISSeP)	Liège
Belgique	Christian Schroeder	Professeur Honoraire	Académie Royale de Belgique	Bruxelles
Chine	Zeyang Song	Professeur associé	Université des Sciences et des Technologies	Xi'an
France	Naze-Nancy Masalehdani	Enseignante / Chercheuse	Université, UFR Sciences de la Terre	Lille
Grèce	Nikolaos Koukouzas	Directeur de Recherches	Centre de Recherche et de Technologie (CERTH)	Athènes
Pologne	Krzysztof Gogola	Professeur assistant	Institut Central des Mines (GIG)	Katowice
Pologne	Monika Fabiańska	Professeure	Université de Silésie, Institut des Sciences de la Terre	Sosnowiec
Pologne	Łukasz Gawor	Professeur assistant	Université Technologique de Silésie	Gliwice
Pologne	Ádám Náduvari	Doctorant	Université de Silésie, Institut des Sciences de la Terre	Sosnowiec
Royaume-Uni	Darren Bryant	Chef de projet principal, Sécurité publique et affaissement	L'Autorité Charbonnière (The Coal Authority)	Mansfield
Royaume-Uni	Abby Moorhouse-Parry	Géochimiste	L'Autorité Charbonnière (The Coal Authority)	Mansfield
Royaume-Uni	Claire Belcher	Professeure associée	Université, Sciences de la terre	Exeter
Royaume-Uni	Christine Switzer	Chargée de cours en Génie civil et Environnemental	Université de Strathclyde	Glasgow
Russie	Batugin Andrian Sergeevich	Professeur	Université d'État des mines (MISIS)	Moscou
Tchéquie	Ondra Sracek	Professeur	Université Palacký, Département de géologie	Olomouc
Tchéquie	Vlastimil Moni	Chef du département Processus technologiques et diagnostics	Institut de recherche sur le charbon (VUHU)	Most
Tchéquie	Václav Dombek	Professeur associé	Université Technique	Ostrava
Tchéquie	Jan Jehlička	Professeur	Institut de Géochimie, Minéralogie et Ressources Minérales	Prague
Thaïlande	Tanapon Phenrat	Professeur associé	Université Naresuan, Département de Génie Civil	Phitsanulok
Ukraine	Yuri Sleptsov	Professeur associé	Université Nationale des Sciences de la Vie et de l'Environnement	Kiev