



# UTILISATION DE LA THERMOGRAPHIE DANS LE CADRE DE LA SURVEILLANCE DES TERRILS DU BASSIN NORD-PAS-DE-CALAIS

F. CAPENOL – V. ADAM

# SOMMAIRE:

**PARTIE I: PRESENTATION DU BRGM/DPSM**

**PARTIE II: DESCRIPTION DES TERRILS ET DU PHÉNOMÈNE DE COMBUSTION**

**PARTIE III: SURVEILLANCE PAR THERMOGRAPHIE**

# PARTIE I : PRÉSENTATION DU BRGM / DPSM ET PRISE EN CHARGE DE L'APRÈS MINE EN FRANCE

Après la disparition de l'exploitant, l'Etat est venu aux droits et obligations de l'ancien exploitant en confiant au Département Prévention Sécurité Minière (DPSM) du BRGM la mission opérationnelle des surveillances et travaux concernés dans le cadre de l'arrêt définitif des travaux miniers et des préventions des risques miniers en 2006. Le BRGM, EPIC Français, s'est vu modifié par décret d'organisation pour prendre en charge cette nouvelle mission : l'Après-Mine .

La représentation de l'Après-Mine est donc nationale: création de 4 Unités territoriales Après Mine pour couvrir l'ensemble du passif minier, avec le Nord pour première cible en juillet 2006:

L'Utam Nord se verra confier essentiellement la gestion de la région Hauts de France avec pour l'essentiel de son activité l'ancien bassin minier charbonnier Nord Pas-de-Calais.

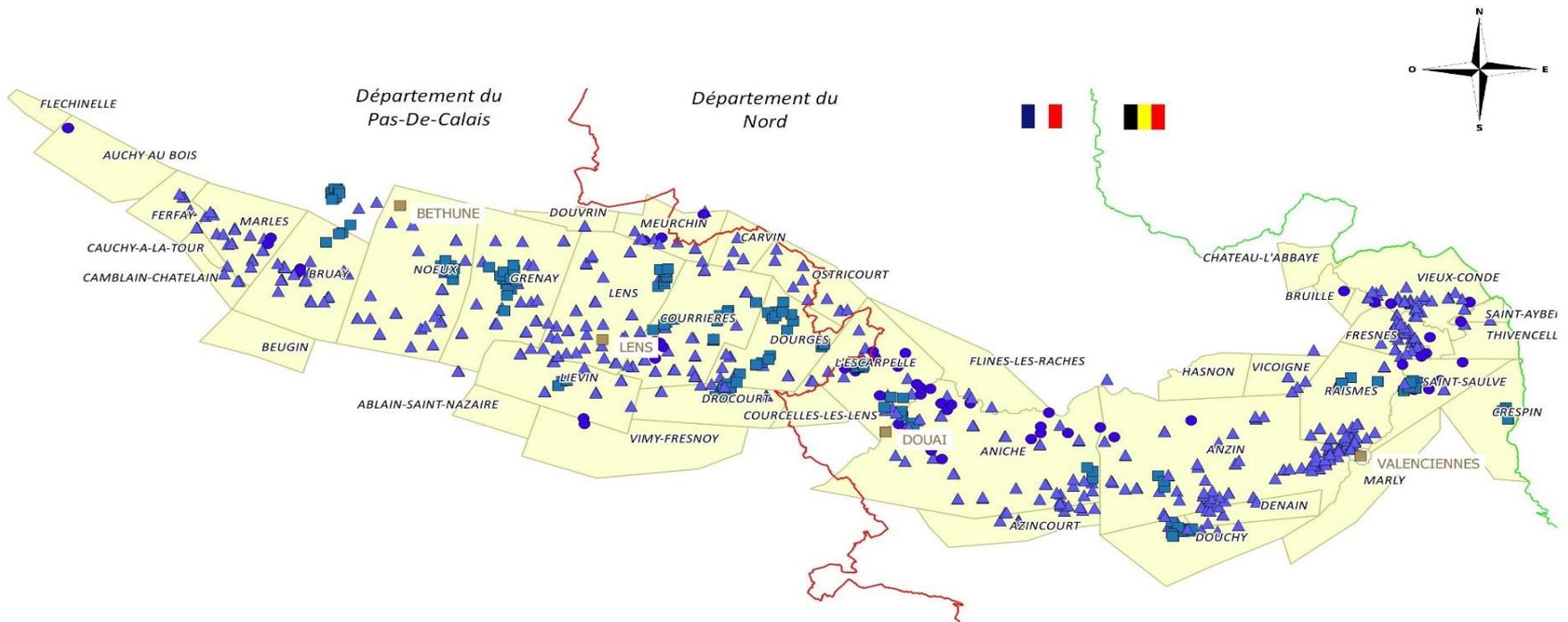


L'UTAM Nord est basée à Billy-Montigny au cœur du Bassin Minier pour fluidifier l'opérationnalité. Elle compte 18 agents (15 titulaires + 3 formation)

# PARTIE I : PRÉSENTATION DU BRGM / DPSM ET PRISE EN CHARGE DE L'APRÈS MINE EN FRANCE

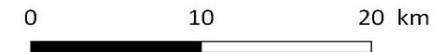


## Localisation des surveillances du BRGM-DRP/DPSM NORD



### LEGENDE

- Surveillance ICPE (147 points)
- ▲ Surveillance article L174-1 à 4 (552 points)
- Surveillance article L163-11 (63 points)



Source BRGM-DRP/DPSM/NORD - Janvier 2017

*Les missions de l'UTAM NORD découlent de la mise en place des mesures compensatoires mises en place par CdF et des risques à prévenir aussi longtemps que nécessaire ...*

**Travaux de mise en sécurité** au titre de la maîtrise d'ouvrage déléguée dans le cadre de rénovation d'installation ou de mise en sécurité



Source: Photothèque du BRGM/DPSM

*Les missions de l'UTAM NORD découlent de la mise en place des mesures compensatoires mises en place par CdF et des risques à prévenir aussi longtemps que nécessaire ...*

**Gestion et surveillance des anciennes installations** soumises au code de l'Environnement



Source: Archives CDF



Source: Photothèque du BRGM/DPSM

*Les missions de l'UTAM NORD découlent de la mise en place des mesures compensatoires mises en place par CdF et des risques à prévenir aussi longtemps que nécessaire ...*

**Surveillance d'ouvrages et d'installations et équipements de surveillance et de prévention des risques miniers** (puits de mine, sondages de décompression, piézomètres, ligne de nivellement ...)



Source: Photothèque du BRGM/DPSM



Source: Photothèque du BRGM/DPSM

*Les missions de l'UTAM NORD découlent de la mise en place des mesures compensatoires mises en place par CdF et des risques à prévenir aussi longtemps que nécessaire ...*

**Surveillance d'ouvrages et d'installations hydrauliques de sécurité:** Stations de Relevage des Eaux de surface ou de ruissellement, digue et doublets piézométriques



Source: Photothèque du BRGM/DPSM

*Les missions de l'UTAM NORD découlent de la mise en place des mesures compensatoires mises en place par CdF et des risques à prévenir aussi longtemps que nécessaire ...*

**Surveillance des terrils en échauffement**



Source: Photothèque du BRGM/DPSM

## PARTIE II : DESCRIPTION DES TERRILS ET DU PHÉNOMÈNE DE COMBUSTION

### ● Définition:

- Amas de résidus miniers et industriels issus de l'exploitation minière
  - maillon dans la chaîne de valorisation du charbon
- Composition variable d'un terril à un autre :
  - Résidus de l'extraction (schistes):
    - roches friables formées par les schistes houillers représentant près des 60% du volume d'un terril ;
    - roches peu altérables formées par les grès houillers (micas) et des grès argileux ;
    - les sulfures de fer (matières oxydables) tels que la pyrite ou la marcassite ;
  - Résidus de traitement: 5 à 15 % de charbon résiduel en rapport avec les différentes méthodes de triage ;
  - résidus de cendre produits par une centrale.

→ Matériaux propices à l'échauffement  
**(présence de résidus charbonneux)**

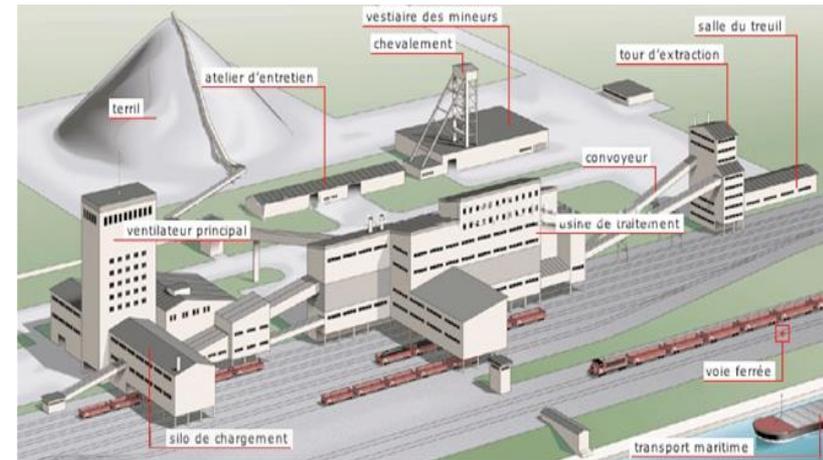


Schéma d'un carreau de fosse - Crédit photo Le dictionnaire visuel



## PARTIE II : DESCRIPTION DES TERRILS ET DU PHÉNOMÈNE DE COMBUSTION

- Constitution d'un terril;
  - Par wagonnet: terril plat

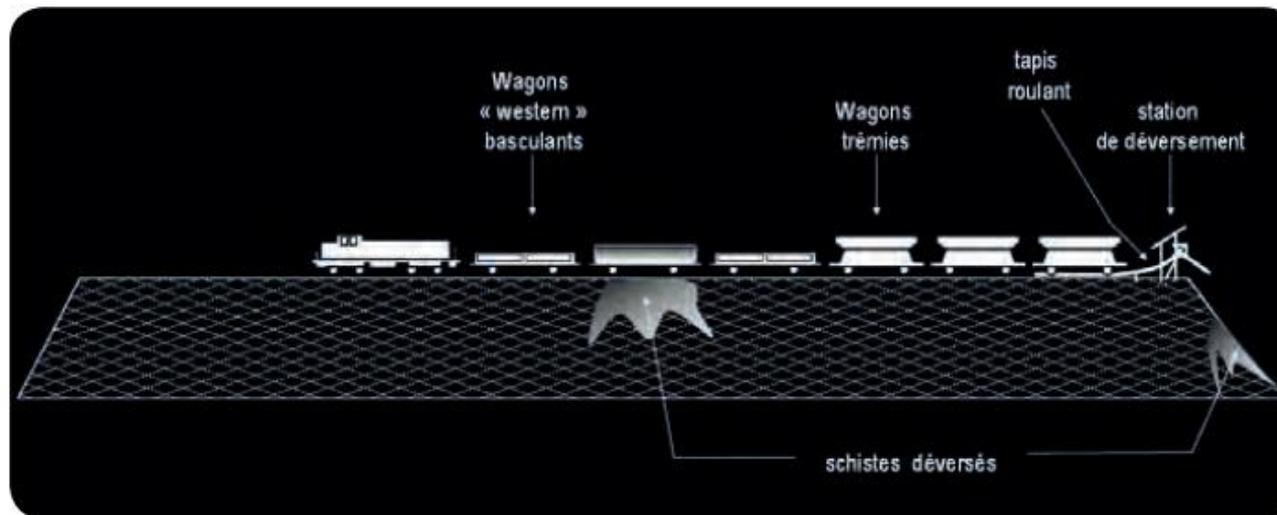


Schéma de la mise à terril d'un terril plat par voie ferrée, le schiste se déverse soit en bout de terril par la station de déversement, soit sur les côtés par basculement des wagons. Les rails étaient déplacés progressivement.  
CPIE Chaîne des Terrils

Terril Plat

Période du XVIII / début XIX<sup>e</sup> siècle

## PARTIE II : DESCRIPTION DES TERRILS ET DU PHÉNOMÈNE DE COMBUSTION

- Constitution d'un terril;
  - Par berline et convoyeur: terril conique

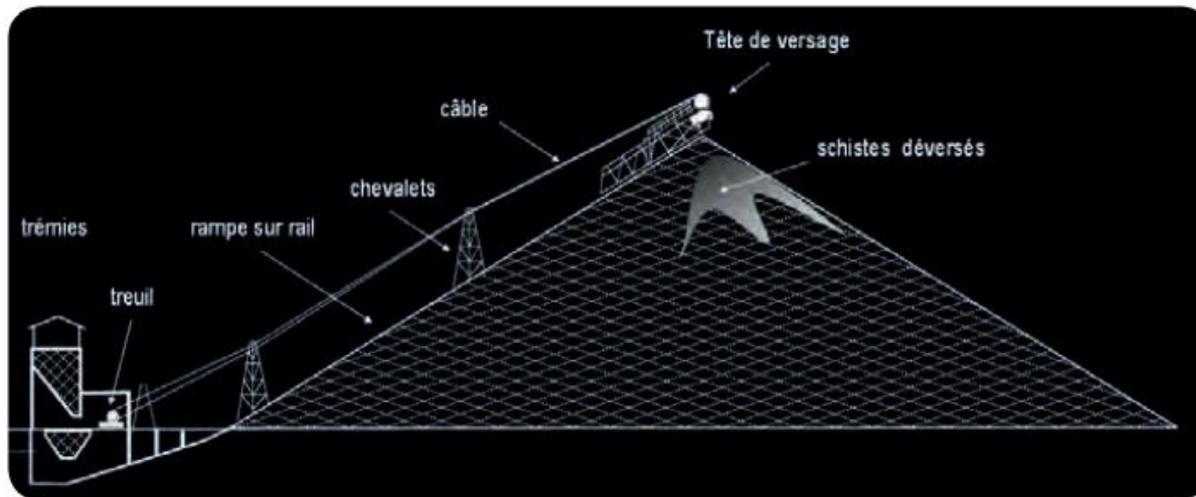


Schéma d'édification d'un terril avec skip, le schiste se déverse au niveau de la tête de versage, par renversement du skip.  
CPIE Chaîne des Terrils

### Terril Conique Période du XIXème/XXème siècle

## PARTIE II : DESCRIPTION DES TERRILS ET DU PHÉNOMÈNE DE COMBUSTION

### ● Origines de la combustion

- Réaction chimique d'oxydation du charbon (combustible) par l'oxygène de l'air (comburant)
- Déclenchement de la combustion :
  - Dès leur constitution, du fait de la mise en dépôts de cendre chaudes
  - Après leur constitution
    - Au contact d'une source de chaleur externe ;
    - Auto-échauffement (réactions physico-chimiques complexes)

### ● Evolution de la combustion:

- Mécanismes complexes faisant intervenir différents facteurs liés à l'environnement et aux propriétés intrinsèques des résidus
  - la Géométrie (mode de dépôt);
  - la granulométrie;
  - la répartition des matériaux;
  - la teneur en matières oxydables;
  - le climat.
- Mécanismes lents: Propagation lente de l'échauffement des extrémités vers le centre du terril

⇒ La durée d'une combustion peut atteindre plusieurs décennies  
(ex. terril de Ricamarie (42) en combustion depuis 1950)

## PARTIE II : DESCRIPTION DES TERRILS ET DU PHÉNOMÈNE DE COMBUSTION

- Dangers liés au phénomène de combustion

- Brûlure
- Incendie
- Émanation de gaz
- Explosion
- etc.

➔ Pour réaliser le suivi des échauffements, l'exploitant a mis en place une surveillance par thermographie (protection des biens et des personnes)

## PARTIE III: SURVEILLANCE DES TERRILS PAR THERMOGRAPHIE

La thermographie doit nous permettre de caractériser les échauffements localisés ou généralisés en surface et en intensité.

**Pour y parvenir, deux méthodes complémentaires sont mises en place:**

### ● La thermographie aérienne

- Principe: il s'agit d'un survol à moyenne altitude de nos terrils par un avion équipé d'une caméra thermique, elle-même raccordée à un récepteur GNSS. Les données sont ensuite post-traitées afin d'obtenir un rendu homogène et précis.
- Avantages:
  - Survol en une fois d'objets atypiques
  - Rapidité d'exécution
  - Rendu: cartographie complète de nos terrils facilement intégrable dans notre SIG

→ Prestation contractualisée

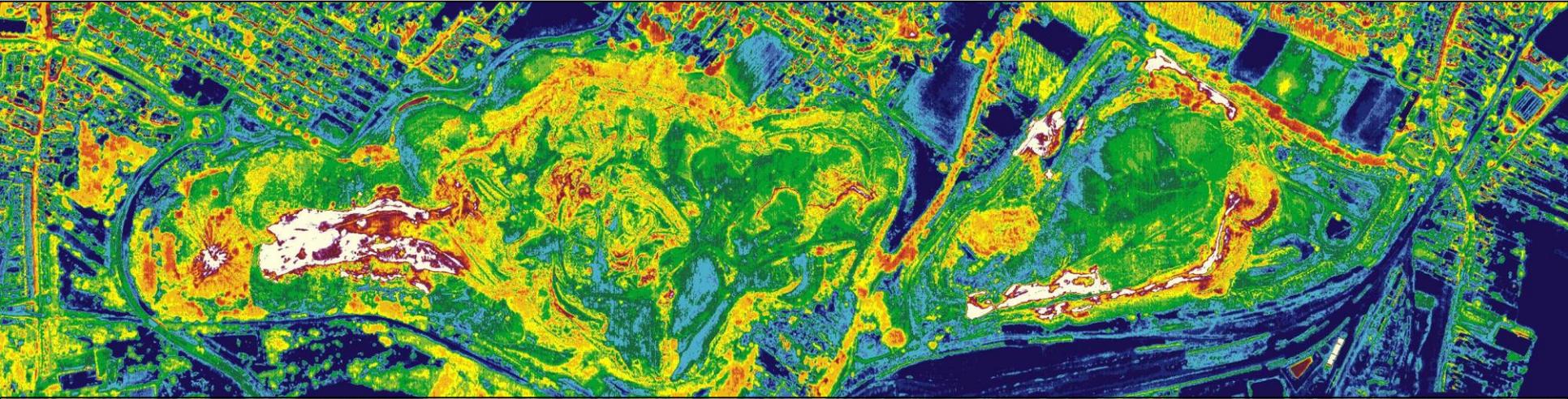
### ● La thermographie pédestre

- Principe: en fonction des zones avec indices d'échauffement repérées lors de la thermographie aérienne, une équipe arpente les terrils équipée d'une caméra thermique portable afin d'avoir des images plus fines des zones en échauffement, la caméra permet également d'orienter la prise de mesure par sonde thermocouple.
- Avantages:
  - Images thermiques fines
  - Températures de surfaces précises
  - Détection de fissures (non visibles à l'œil nu)

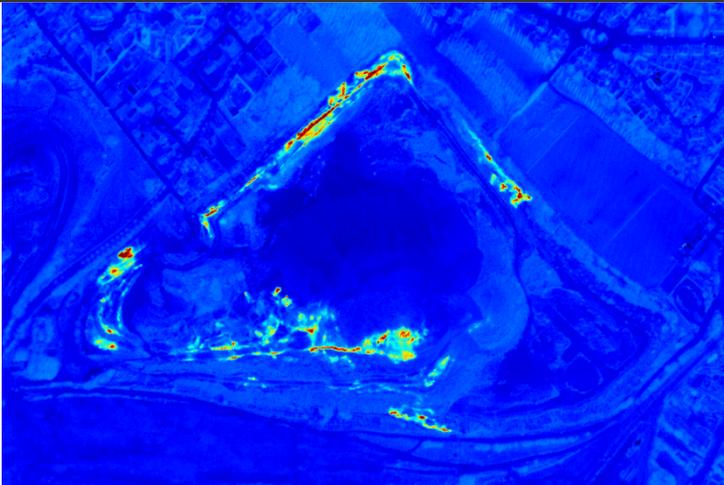
→ Prestation Interne

## PARTIE III: THERMOGRAPHIE AÉRIENNE – EXEMPLES

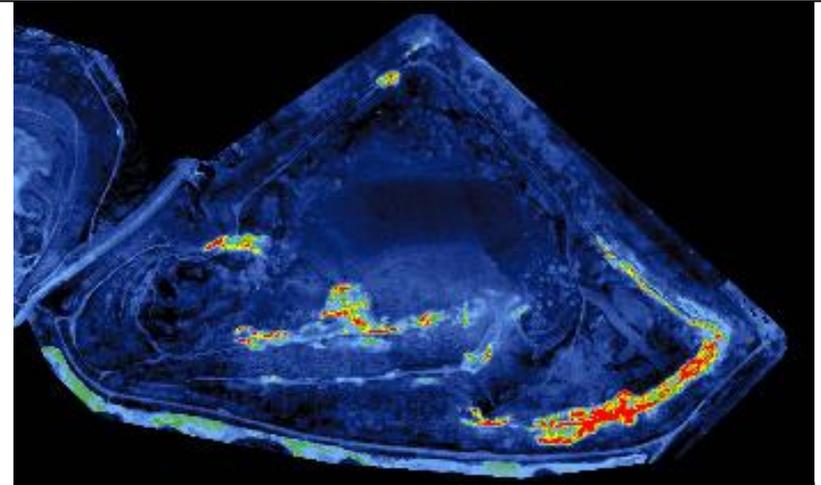
La thermographie permet de suivre le développement ou le déplacement de la combustion.



Source: Relevé Thermographique du 15/10/1999 - Eurosense



Source: Relevé Thermographique du 27/11/2006 - Eurosense



Source: Relevé Thermographique du 07/02/2018 - Eurosense

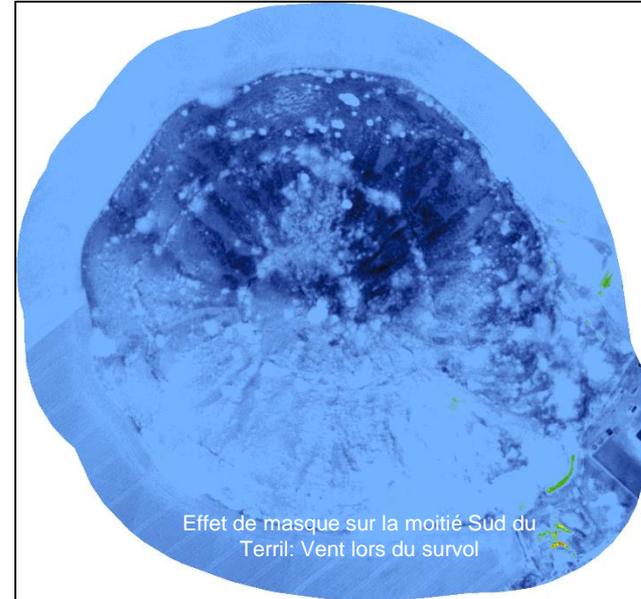
# PARTIE III: THERMOGRAPHIE AÉRIENNE

## Limites de la méthode:

- Forte dépendance aux conditions climatiques

Meteo	T° jour (1)	T° nuit (2)	Precipit. (3)	vent (4)	nuages (5)	neige (6)
samedi 6 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
dimanche 7 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
lundi 8 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
mardi 9 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
mercredi 10 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
jeudi 11 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
vendredi 12 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
samedi 13 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
dimanche 14 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
lundi 15 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
mardi 16 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
mercredi 17 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
jeudi 18 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
vendredi 19 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
samedi 20 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
dimanche 21 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
lundi 22 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
mardi 23 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
mercredi 24 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
jeudi 25 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
vendredi 26 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
samedi 27 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
dimanche 28 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
lundi 29 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
mardi 30 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
mercredi 31 janvier 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
jeudi 1 février 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
vendredi 2 février 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
samedi 3 février 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
dimanche 4 février 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
lundi 5 février 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green
mardi 6 février 2018	Yellow	Green	Red	Red	Red	Green

Source: Rapport technique Eurosense - 2018

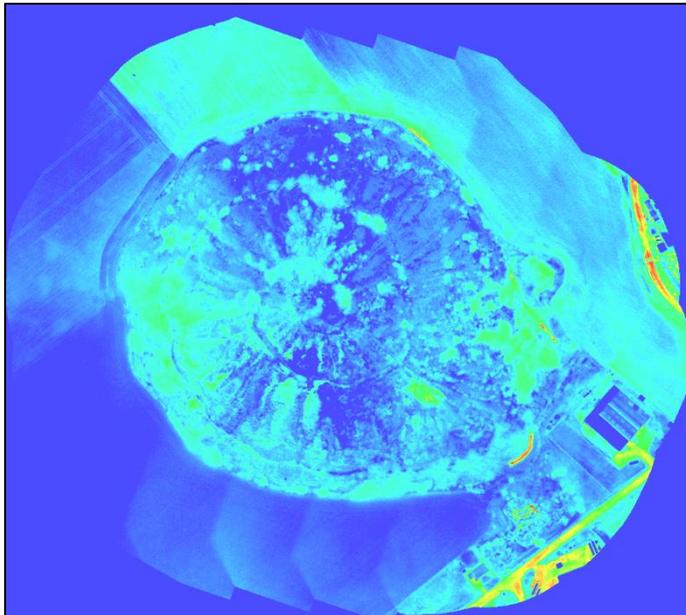


Source: Thermographie aérienne 2016 - Eurosense

## PARTIE III: THERMOGRAPHIE AÉRIENNE

### Limites de la méthode:

- Forte dépendance aux conditions climatiques
- Pour les zones de faible échauffement:
  - Effet de masque dû à la composition du terri (Schiste noir qui emmagasine la chaleur de la journée)
  - Effet de masque dû à l'environnement du terri (Plans d'eau, routes etc... = Augmentation du contraste)
  - Effet de masque dû à la végétation (Echauffement sous les arbres non repérable en thermographie aérienne)



Source: Relevé Thermographique - 2012



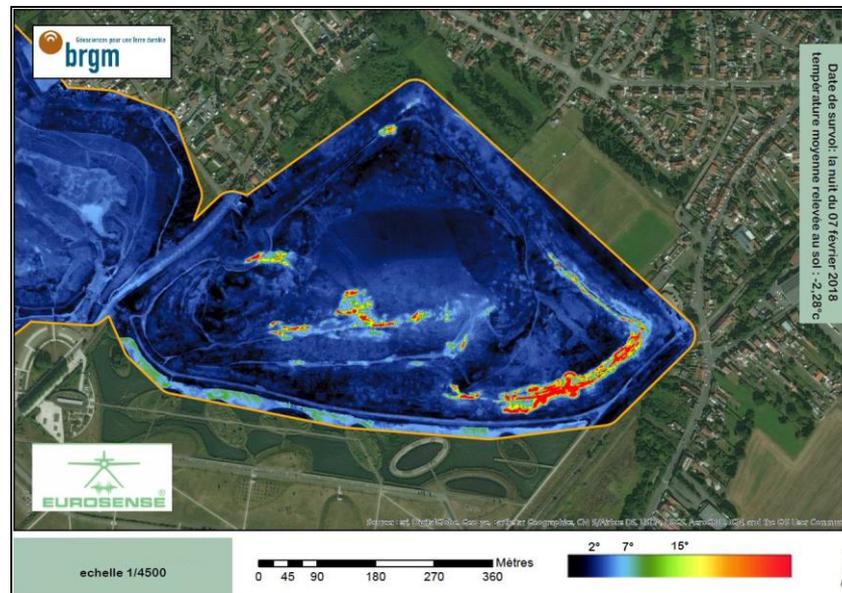
Source: Photo aérienne 2012

→ De manière générale, les zones à faible échauffement sont difficilement repérables du fait d'un contraste thermique insuffisant entre la zone et l'environnement

# PARTIE III: THERMOGRAPHIE AÉRIENNE

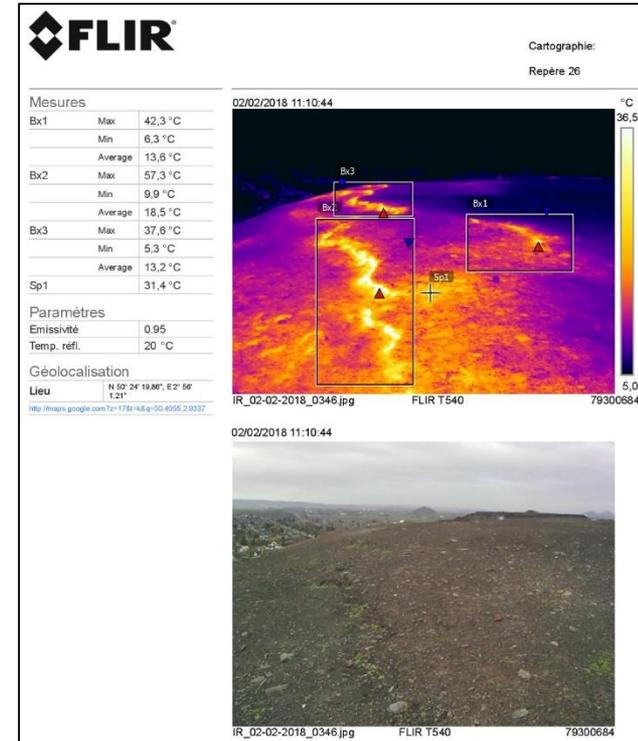
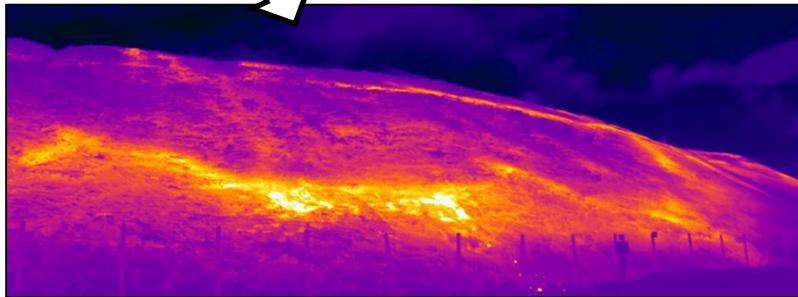
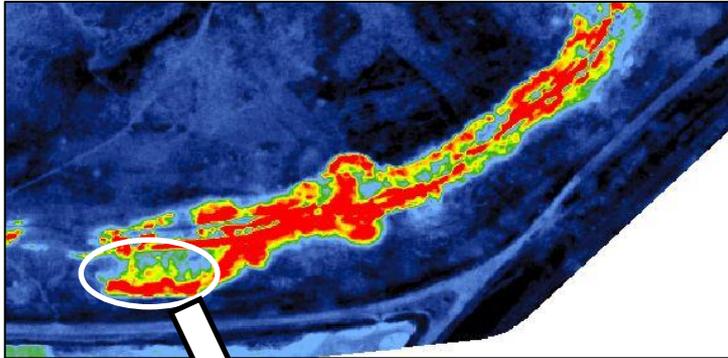
## Limites de la méthode:

- Forte dépendance aux conditions climatiques
- Pour les zones de faible échauffement:
  - Effet de masque dû à la composition du terril
  - Effet de masque dû à l'environnement du terril
  - Effet de masque dû à la végétation
- ➔ De manière générale, les zones à faible échauffement sont difficilement repérables du fait d'un contraste thermique insuffisant entre la zone et l'environnement
- Manque de Précision/Résolution: Surfacique et températures (plage de température d'un échauffement: 20° à + de 300°: le rendu de la thermographie aérienne ne nous permet pas de caractériser/hiérarchiser les échauffements)



## PARTIE III: THERMOGRAPHIE PÉDESTRE

Afin de pallier à certaines limites et en complément de la thermographie aérienne, une campagne de thermographie pédestre est effectuée sur les terrils (Caméra thermique portable et sonde thermocouple).

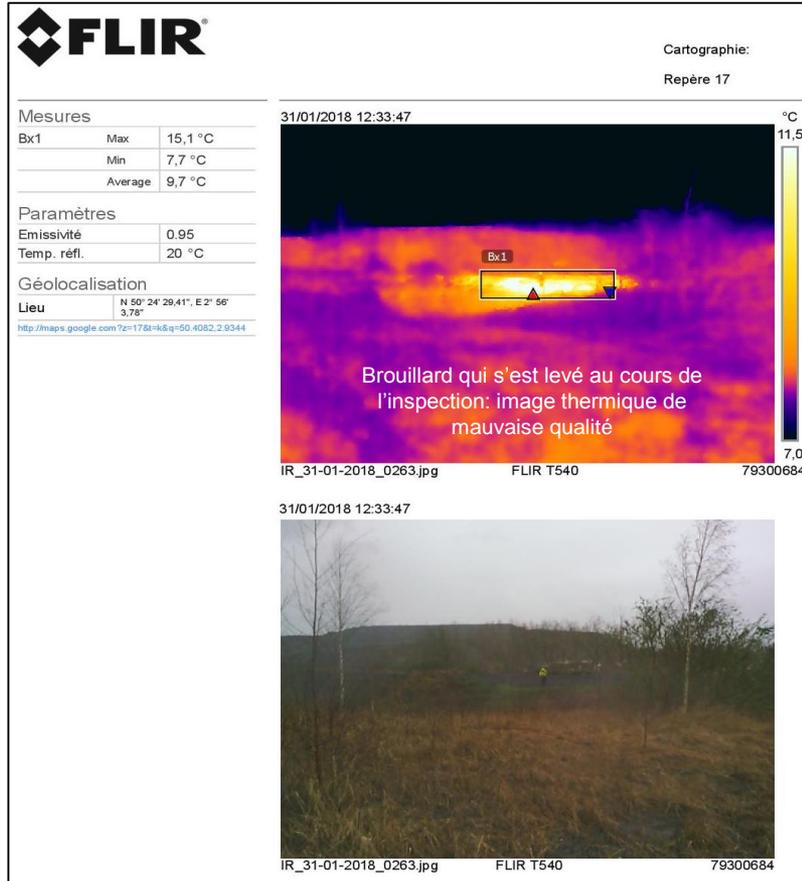


- La caméra thermique portable permet d'avoir une image des échauffements avec des contours + nets
- Elle permet d'orienter nos mesures à la sonde thermocouple ( $t^{\circ}$  absolue qui nous sert pour nos analyses)
- Plages de températures plus proches de celles relevées à la sonde thermocouple
- Visibilité des fissures (certaines invisibles à l'œil nu)

# PARTIE III: THERMOGRAPHIE PÉDESTRE

## Limites de la méthode:

- Forte dépendance aux conditions climatiques



## PARTIE III: THERMOGRAPHIE PÉDESTRE

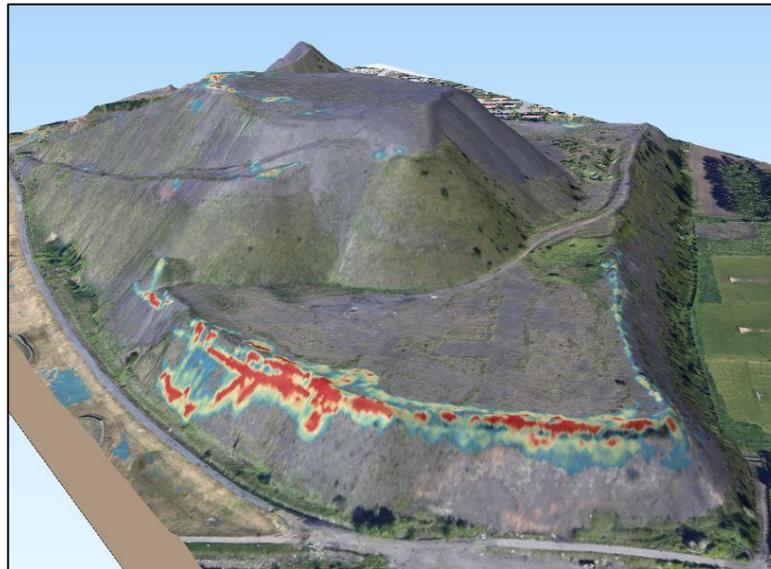
### Limites de la méthode:

- Forte dépendance aux conditions climatiques
- Durées d'intervention (équipe de deux personnes)
- Temps de traitement des images et des relevés de température, création des cartes
- Difficultés d'accès (propriétaires terriens, végétation, dénivelé etc...)
- Risques de brûlures
- Impossibilité de replacer les images de la caméra sur une carte (angle de prise de vue inconnu, distance à l'objet inconnue = drapé sur le MNT impossible)

- ➔ La thermographie aérienne nous permet donc d'appréhender les échauffements de manière globale et nous permet de préparer la campagne pédestre
- ➔ La thermographie pédestre nous permet d'avoir des images plus fines des échauffements et nous aide à orienter la prise de mesure à la sonde thermocouple
- ➔ Les températures relevées à la sonde thermocouple nous permettent d'analyser et de quantifier les échauffements

## PARTIE III: ANALYSE DES CAMPAGNES – RÉSULTATS

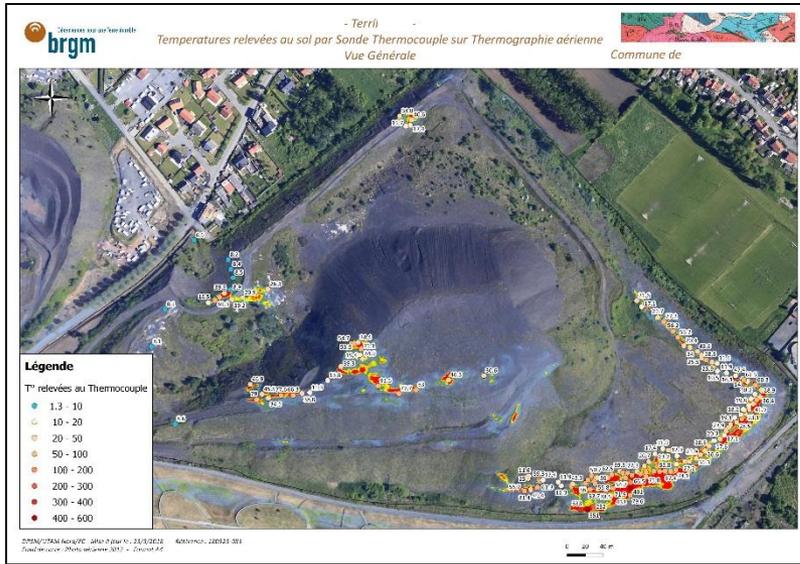
Afin d'aider à l'analyse des résultats des deux campagnes, différents types de rendus sont réalisés.



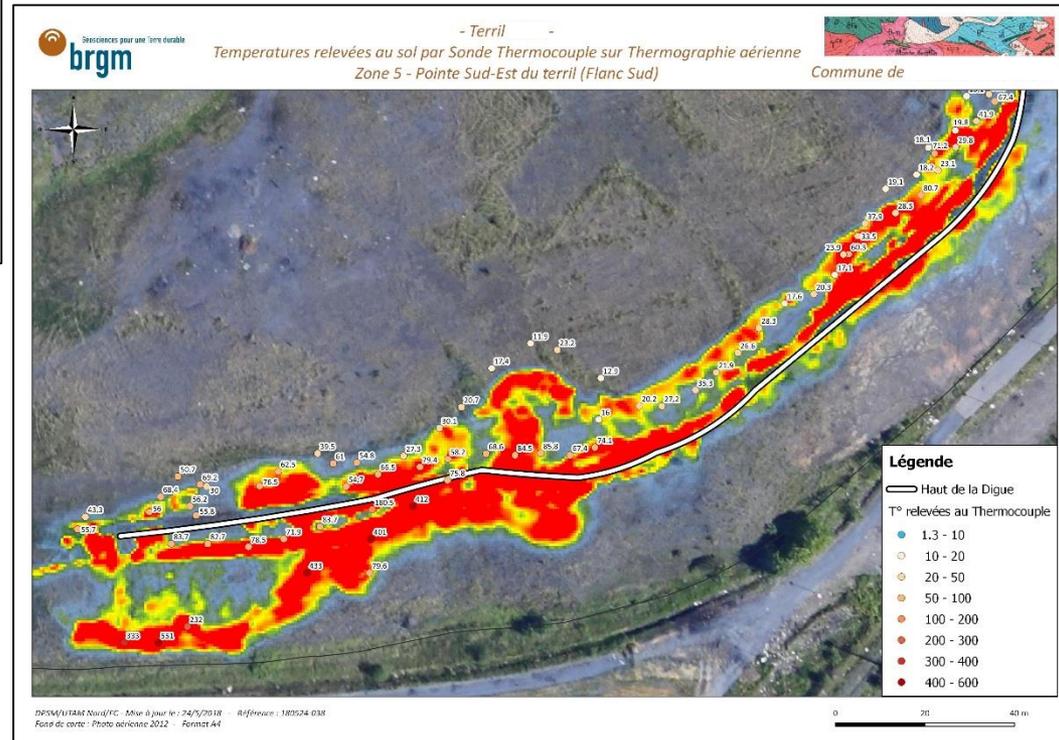
**Vues 3D du terril avec intégration des résultats de la thermographie aérienne**

# PARTIE III: ANALYSE DES CAMPAGNES – RÉSULTATS

Afin d'aider à l'analyse des résultats des deux campagnes, différents types de rendus sont réalisés.

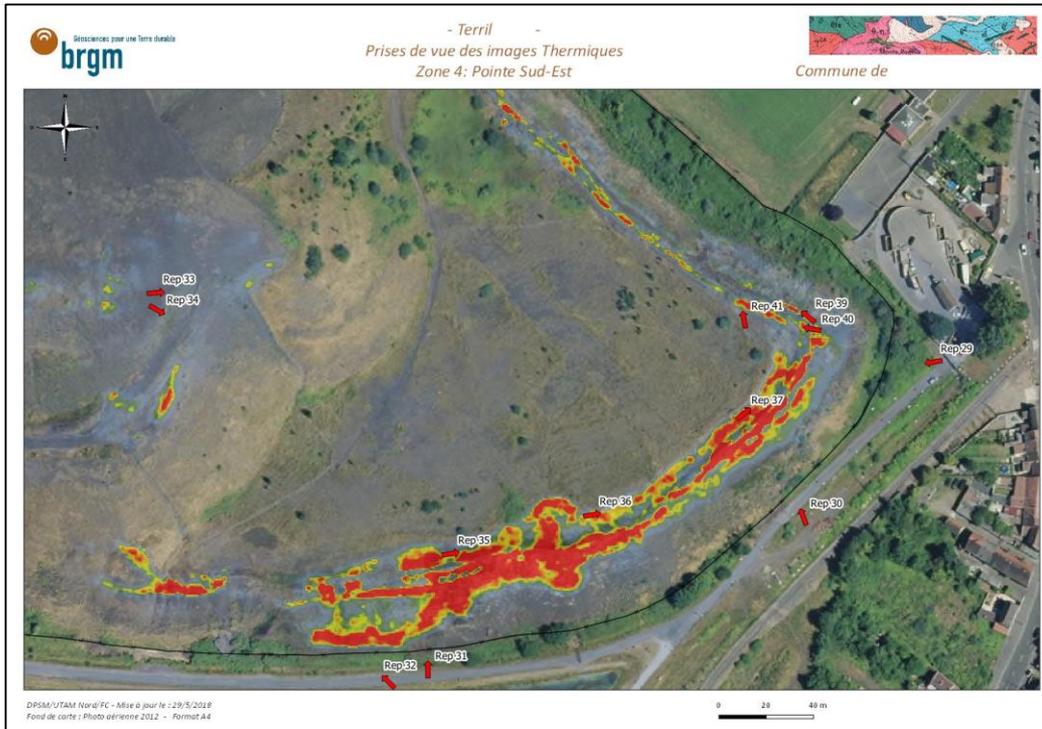
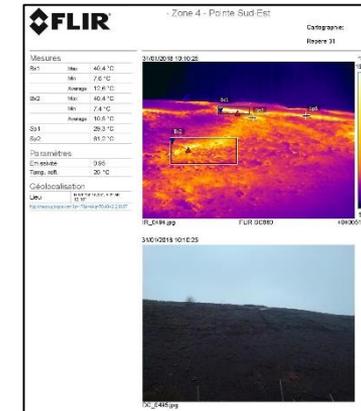
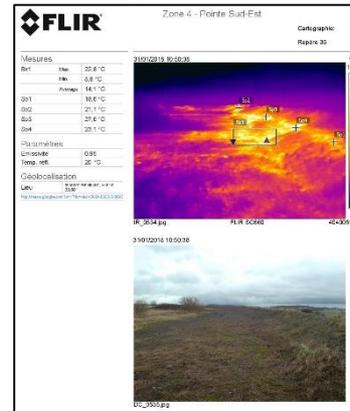
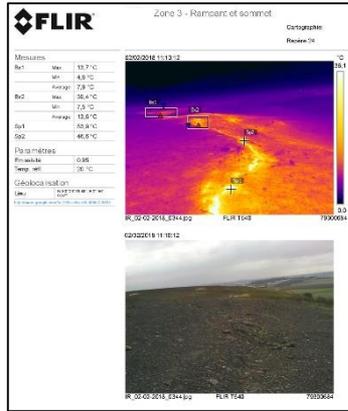


**Superposition de la thermographie aérienne et des températures relevées à la sonde thermocouple**



# PARTIE III: ANALYSE DES CAMPAGNES – RÉSULTATS

Afin d'aider à l'analyse des résultats des deux campagnes, différents types de rendus sont réalisés.



Traitement des images prises à la caméra avec le logiciel FLIR Tools et intégration des angles de prise de vue sur une carte avec la thermographie aérienne afin de faciliter la lecture du rapport d'image

# Conclusions / Perspectives

- La thermographie permet d'assurer la mission du DPSM en tant que méthode de diagnostic et de surveillance (protection des biens et des personnes)
  - Thermogrammes obtenus (auscultations aériennes et pédestres) permettent d'apprécier avec une bonne précision la localisation des anomalies et leur extension, mais également de suivre leur évolution dans le temps par comparaison entre les campagnes successives
- Toutefois, le diagnostic reste limité compte tenu des contraintes inhérentes à cette approche:
  - la mesure de l'échauffement par rayonnement ne permet pas un diagnostic quantitatif (actuellement rendu possible au moyen de sondes de contact)
  - Les mesures de thermographie ne rendent pas compte de l'état de combustion interne notamment lors du refroidissement du terril
- Réflexion sur l'optimisation de la surveillance:
  - Amélioration de la résolution au sol, en vue d'affiner le contour des anomalies et de détecter des anomalies de faibles dimensions (exemple: survol en drone)
  - Mesure alternative à la thermographie dans le but de caractériser les échauffements internes au terril (ex. méthode géophysique)