Analyse de l’impact thermique dans les sols induits par le passage d’un feu de végétation : application à la sécurisation des zones de vestiges de guerre

Idir Khaldi

Anthony Collin et Lucas Terrei

LEMTA (UMR CNRS 7563), Université de Lorraine, Nancy, France

Journées du RésoFeux de l’ANSR Fontenay-aux-Roses , 10-11 juillet 2025

Projet

- **Partenaires associés :**

Direction Départementale des Territoires de la Meuse

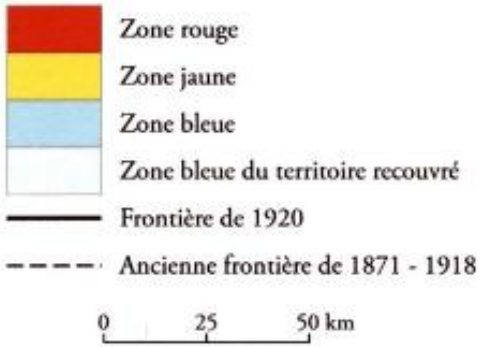
Office National des forêts

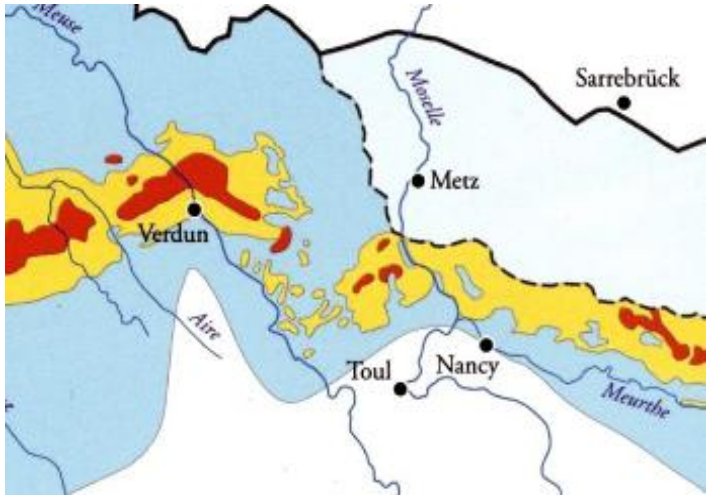
Service Départemental d'Incendie et de Secours 55

Centre de déminage de Metz

Préfecture de la Meuse

- **Zones rouges :**



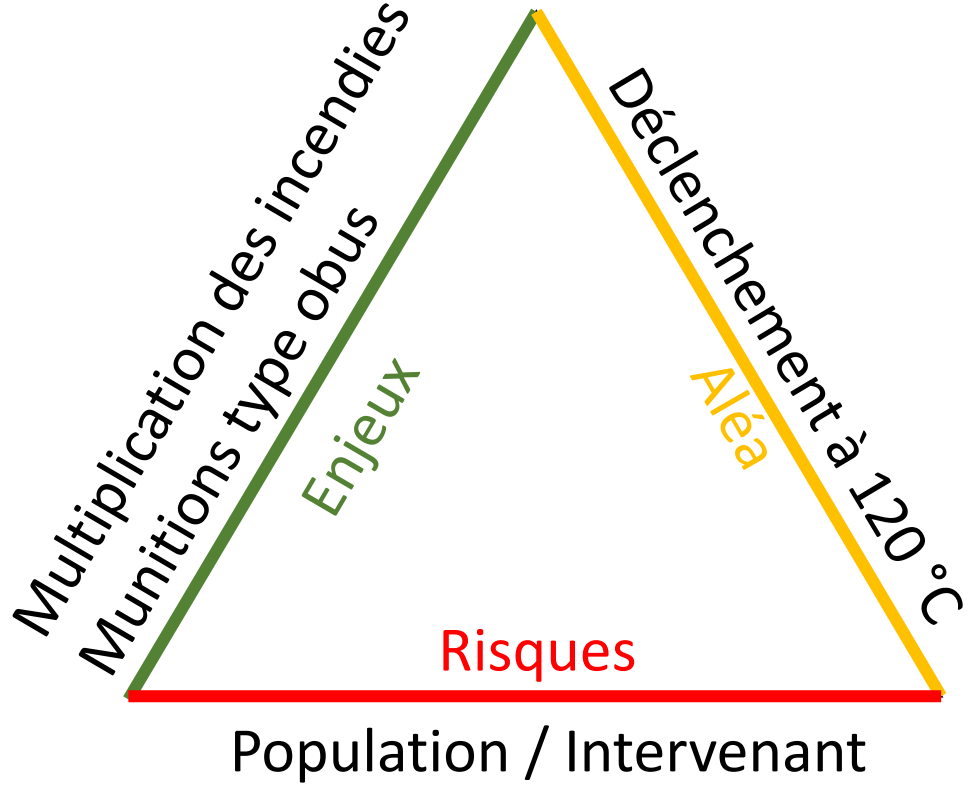


Thèse de Rémi de Matos-Machado (2018)

Zones où la loi interdit provisoirement ou définitivement les activités humaines

Vestiges de guerre

Contexte



- **<u>Problématiques :</u>**

➢ Quelles sont les conditions d'exposition du sol lors d'un feu de végétation ?

➢ Quelle est la dynamique de propagation de l'onde de chaleur dans le sol ?

État de l’art

- **<u>Étude sur les vestiges de guerre</u>**

  ⇨ **Aucune** étude sur les conditions de déclenchement des munitions enterrées de la **Première guerre mondiale**.

État de l'art

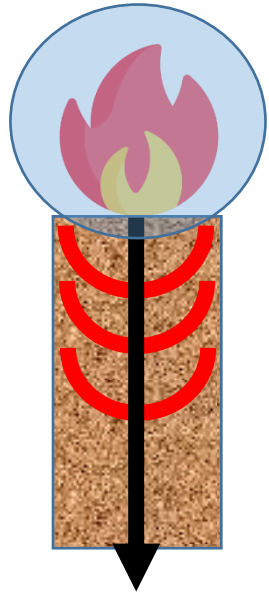
- **<u>Conditions thermiques auxquelles sont soumis les sols :</u>**

➢ **Campbell** (1995) : expériences en laboratoire sur des **feux de surface** avec un brûleur à propane imposant une densité de flux de **39 kW/m²** :

⇨ Pics à 400 °C à 15 mm, à 200 °C à 35 mm, à 70 °C à 95 mm avec 1 heure d'exposition.

➢ **Silvani** et **Morandini** (2009) : Expériences en laboratoire sur des feux d'aiguilles de pin

⇨ Densités de flux mesurées entre **15 et 50 kW/m²**.



➢ **Frankman** (2012) : comprendre les contributions respectives des transferts de chaleur dans les feux de forêts. Le but est d'améliorer la modélisation du comportement des feux et l'évaluation des risques pour les sapeurs-pompiers.

⇨ **Feux de surface** : densités de flux maximales de **18 à 115 kW/m²** ;

⇨ **Feux de broussaille** : densités de flux maximales de **132 kW/m²** ;

⇨ **Feux de cime** : densités de flux maximales de **300 kW/m²**.

État de l'art

- **<u>Conditions thermiques auxquelles sont soumis les sols :</u>**

➢ **Mueller** (2018) : Étude pour comprendre les mécanismes locaux des feux de forêt, de surface et de cime, pour des charges de combustible **de 1 à 1,7 kg/m²**.

⇨ Densités de flux mesurées **de 35 kW/m² à 52 kW/m²** ;

⇨ Temps de résidence de 17 à 34 s.

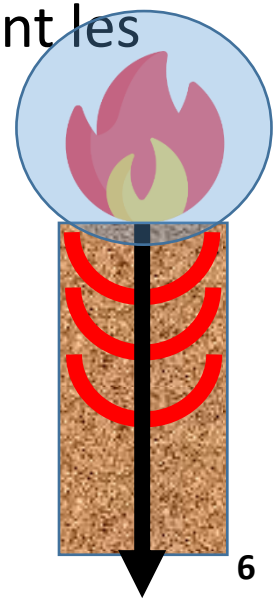
➢ **Busse** (2013) : Étude sur l'échauffement du sol lors de la combustion de piles de bois forestiers. Le but est de comprendre comment la taille et la nature des bois composant les piles influencent la pénétration de la chaleur dans le sol.

⇨ Risque pour le sol uniquement pour les éléments de grande taille ;

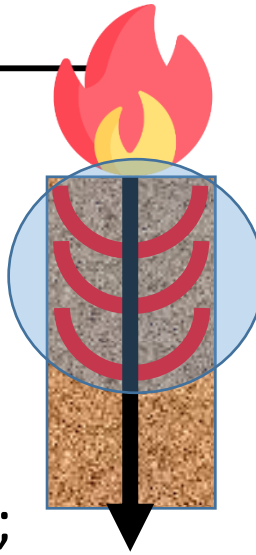
⇨ Température de surface maximale de 715 °C ;

⇨ **T > 200 °C** pendant **20 à 60 h à 5 cm** ;

⇨ **T > 200 °C** jusqu'à **40 h à 10 cm**.



État de l'art



- **<u>Étude sur les réseaux enfouis :</u>**

➢ **Richter** (2021) : Détermination des températures dépassant la limite de fonctionnement des tuyaux enterrés, **60 °C** pour le PVC/HDPE, sous des conditions de **15 à 30 kW/m²**.

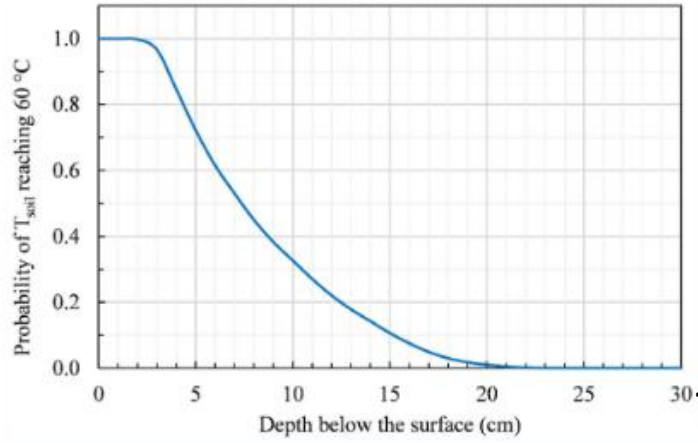
⇨ Limite atteinte à **10 cm en 15 min**, pour une température de surface de 527 °C ;

⇨ Limite atteinte à **30 cm en 2 h**, pour une température de surface de 661 °C.

➢ **Jansens** (2025) : Développer une méthode de calcul à partir de Richter (2021) en faisant varier les paramètres du modèle, température initiale (20–35 °C), température de surface (100–900 °C), durée d'exposition (15 min à 4 h).

⇨ Seuil de **60 °C** quasiment **jamais** atteint à **30 cm** ;

⇨ Évaporation de l'eau absorbe suffisamment de chaleur pour protéger thermiquement le tuyau.



Probabilité d'atteindre 60°C en fonction de la profondeur

État de l'art

Ce que l'on retient :

- **Grande diversité** sur les conditions thermiques et les profondeurs étudiées ;
- Besoin de revenir sur des situations multiples : **feux agricoles** et feux de forêts ;
- Profondeur d'intérêt pour un seuil de 60 °C limitée à **10 cm** ;
- Densités de flux pour feux de surface de **15 kW/m²** à **115 kW/m²** ;
- **Temps de résidence faibles** pour les feux de surface.

Campagne expérimentale 1

- **<u>Choix des charges :</u>** 875, 575, 175 g/m² (éq. orge) avec **Laverdière** et **Thibaudeau** (1990)

Charge à 875 g/m²
Champ de récolte sur pied

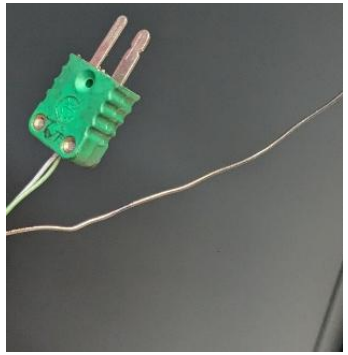
Charge à 575 g/m²
Champ de résidus

Charge à 175 g/m²
Champ de chaume

- **<u>Méthodologie :</u>** Brûlage de frisure de bois, à charge équivalente sur une table à brûler pour déterminer les flux reçus par le sol avec ces feux de végétations

- **<u>Métrologie utilisée :</u>**

➢ Thermocouples de type K (diamètre = 0,5 mm)
→ *Détermination des vitesses de propagation (ROS)*
➢ Capteur de flux total (refroidi avec de l'eau)
→ *Mesure des densités de flux*



Thermocouple

Capteur de flux total

Campagne expérimentale 1

- **Résultats des essais de propagation :**

Charge à 175 g/m²
Feux de chaume

Charge à 575 g/m²
Feux de résidus

Charge à 875 g/m²
Feux de récolte sur pied

Charge [g/m²]	Temps de résidence [s]	ROS [cm/s]	Densité de flux total [kW/m²]
175	80 ± 6	1,03 ± 0,11	19,1 ± 3,6
575	54 ± 7	1,66 ± 0,07	39,3 ± 2,7
875	78 ± 4	1,34 ± 0,05	49,1 ± 11,1

⇨ Temps de résidence faible < 100 s comparés aux feux de forêts ;

⇨ Densités de flux observées entre **20 et 50 kW/m²**.

Campagne expérimentale 2

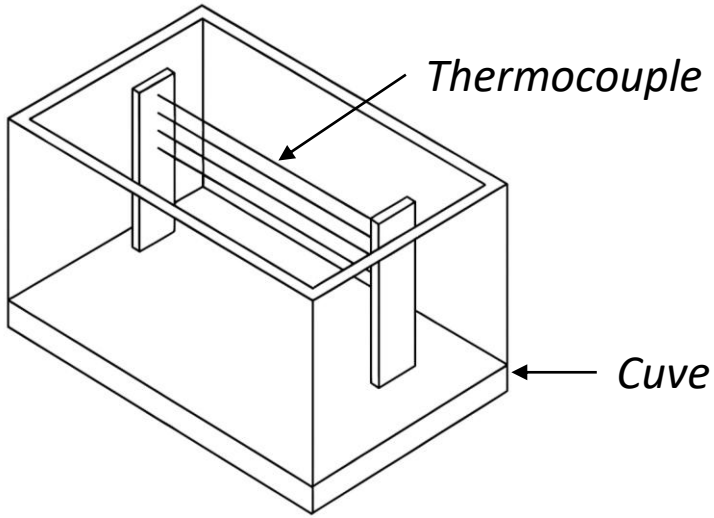
- **Méthodologie :**

  - Une cuve de dimensions 64 × 64 × 48 cm^3 remplie de sable ;
  - Panneau radiant en partie supérieure (90 kW/m^2 max) ;
  - Chauffage de 12 min puis refroidissement, durée totale : 2h ;
  - Répétabilité : chaque flux testé trois fois ;
  - Flux retenus : 20, 40 et 50 kW/m^2.

Dispositif final

- **Métrologie utilisée :**

  17 thermocouples de type K (diamètre = 0,2 mm) placés à différentes profondeurs



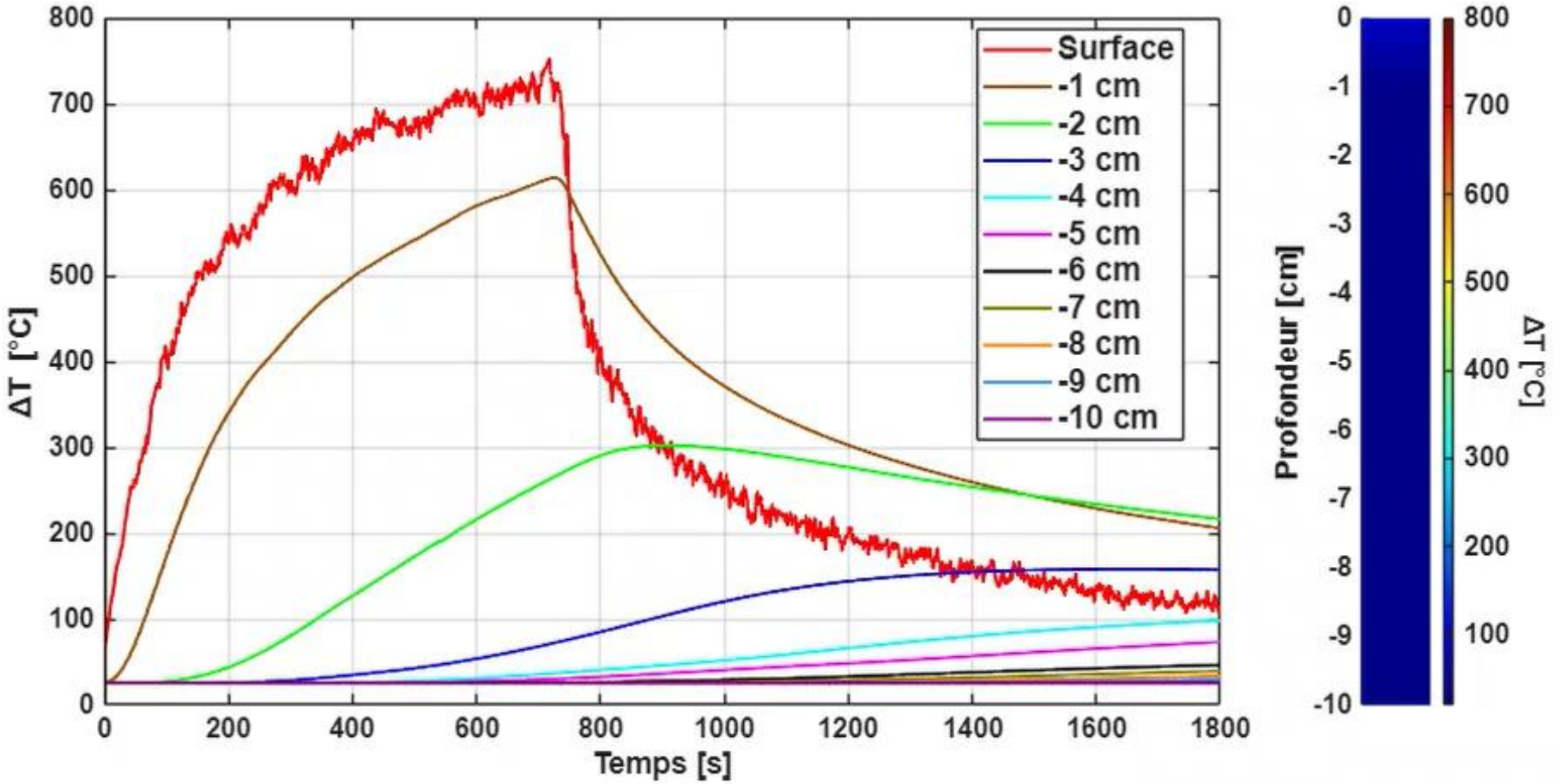
Positionnements des thermocouples

- **Post-traitement :**

  Problématique des conditions initiales (T_0) différentes
  Utilisation de $\Delta T = T - T_0$

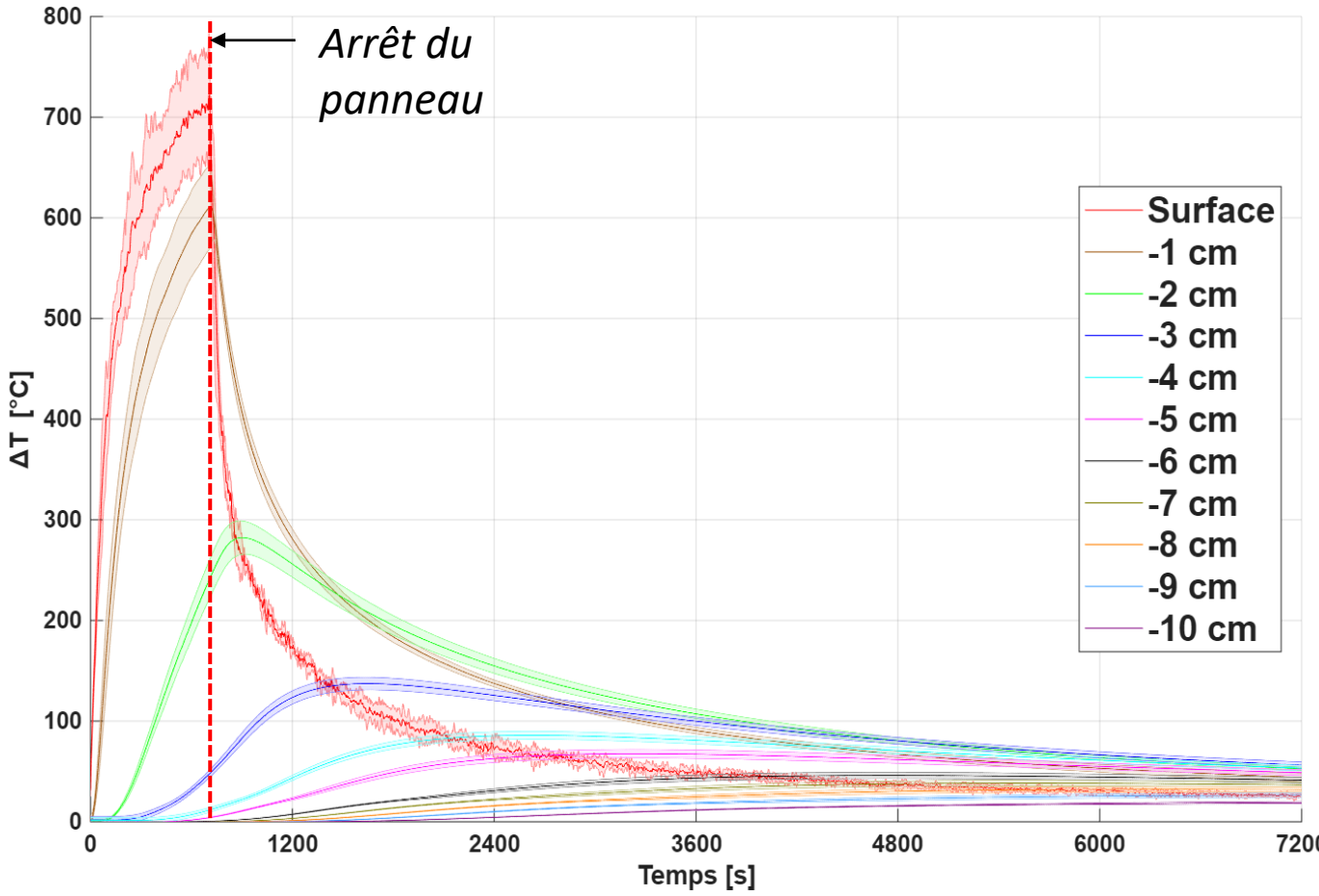
Campagne expérimentale 2

- **Résultats à 50 kW/m² :**



Campagne expérimentale : feux de sols

- **Résultats à 50 kW/m² :**

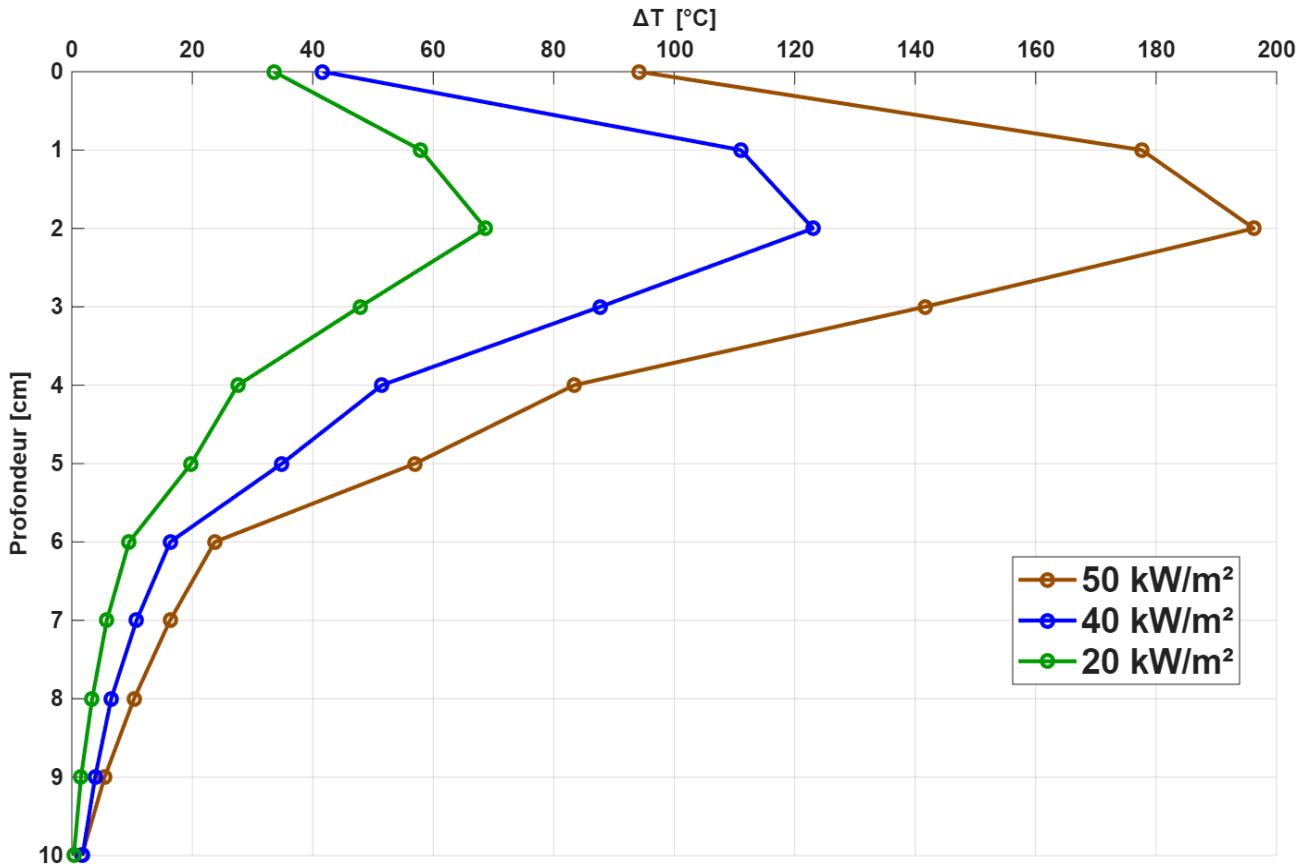


Évolution temporelle de ΔT selon la profondeur avec une densité de flux de 50 kW/m² (2 σ)

- ➢ Faible dispersion des résultats ;
- ➢ Température de surface max. de 722 °C ;
- ➢ Variation de < 200 °C pour chaque premier centimètre ;
- ➢ Après 6 cm pas beaucoup d'intérêt pour la température cible ;
- ➢ Lors du refroidissement, zone qui reste chaude sous la surface.

Campagne expérimentale : feux de sols

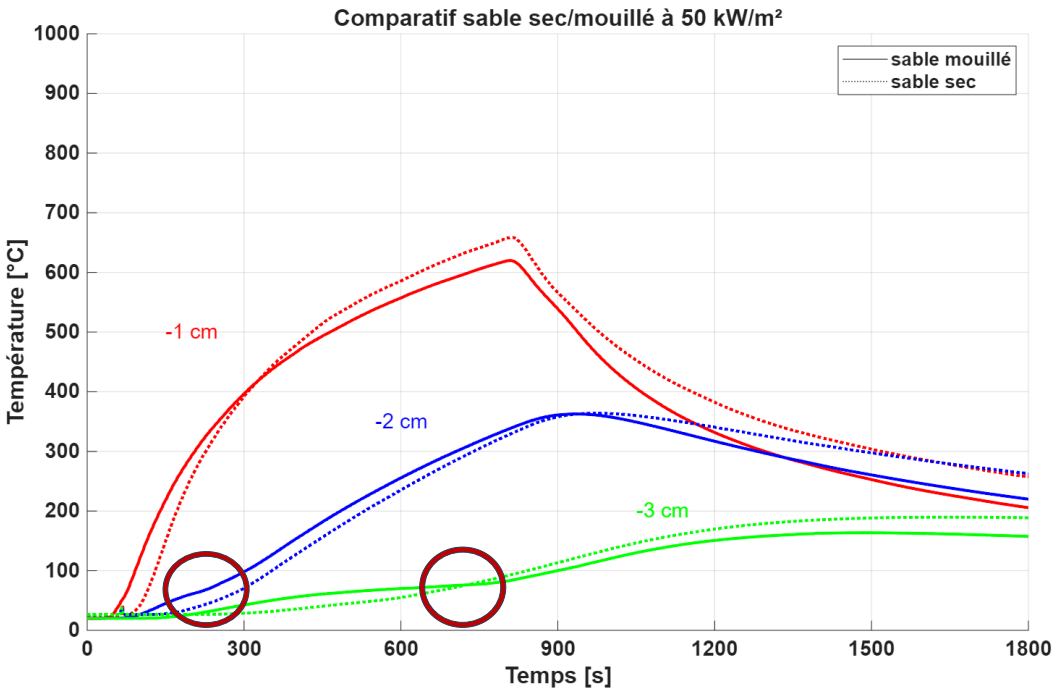
- **Résultats des essais à 20, 40 et 50 kW/m² :**



Profil de température à 20 , 40 et 50 kW/m² 20 min après l'arrêt du panneau

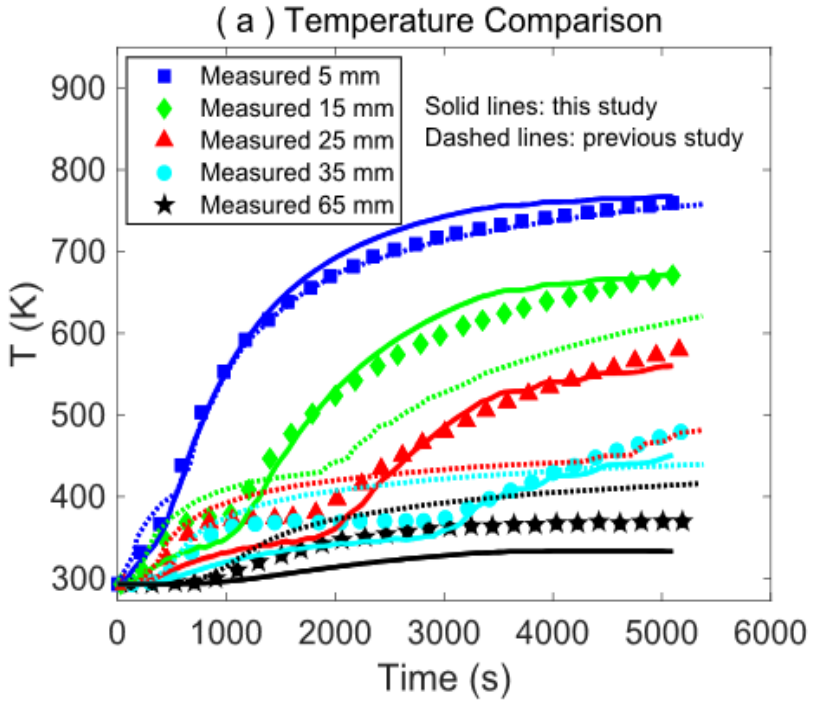
- Température max à 2 cm de profondeur comprise entre 68 °C et 196 °C ;
- Seuil de 120 °C atteint pour 40 kW/m² et 50 kW/m² ;
- Zone chaude comprise entre – 1 et - 3 cm.

Effet de l'humidité



⇨ Sable mouillé : Points d'inflexion visibles témoignant de la présence d'eau.

⇨ Effets également observés expérimentalement et numérique selon Bao (2020).



Comparaison expérimentale et simulations numériques sous une densité de flux de 27 kW/m²

Conclusion

- **Synthèse :**

➢ Brûlage charge jusqu'à 875 g/m² → densité de flux maximale de 50 kW/m² ;

➢ Pas de risques pour les munitions profondément enfouies → seulement celles en surface ;

➢ Confirmation du rôle de l'humidité dans l'évolution du champ de température.

- **Perspectives :**

➢ Court terme : caractériser sol pour développer un modèle numérique ;

➢ Moyen terme : varier les types de sol (essais sous cône calorimètre ou sur le terrain)

➢ Long terme : démarrage d'une thèse sur les feux zombies
→ Utilisation de sols réactifs pour étudier leurs inflammations et leurs propagations.

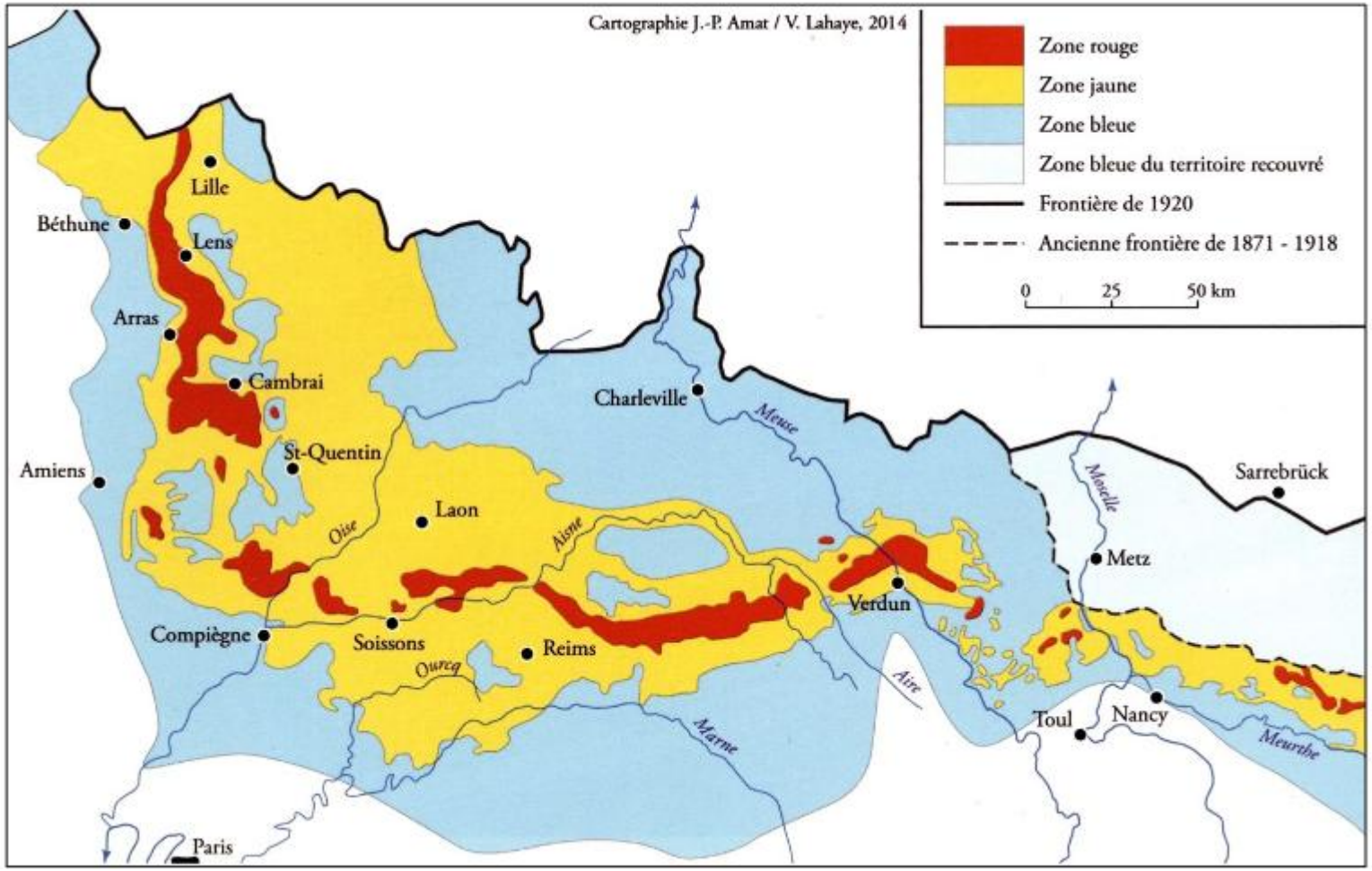
UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Feux
LABORATOIRE ÉNERGIES MÉCANIQUE THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

lemta
Laboratoire Énergies & Mécanique Théorique et Appliquée

Merci de votre écoute !

Annexe



Carte entière du front de l'Ouest Thèse de Rémi de Matos-Machado (2018)