

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Détection et caractérisation de la pollution des zones de guerre par imagerie hyperspectrale à haute résolution spatiale

Référence : **PHY-DOTA-2026-03**

(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : Octobre 2026 à Janvier 2027
selon le type de financement

Date limite de candidature : 01/06/2026

Mots clés :

Hyperspectral, zone de brûlage, Eléments Traces Métalliques et Métalloïdes, furanes, dioxines, végétation, sol.

Profil et compétences recherchées :

Formations : Master 2 ou école d'ingénieur (ENSEEIH, ISAE, Centrale Supélec, ENSAT, INSA...)

Spécialités souhaitées : Traitement du signal, télédétection, environnement, mathématiques appliquées

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

Les zones de conflits armés sont des catastrophes environnementales. Les impacts anthropiques associés (bombardements, risques chimiques ou nucléaires, destruction des écosystèmes et des infrastructures humaines, pollutions des sols, déchets militaires...) ont des effets dévastateurs sur l'environnement et la santé humaine à court et long termes. Ces zones sont caractérisées par des variabilités importantes des teneurs en polluants dans le sol, avec des valeurs excessives dans les zones (appelées zones de brûlage ou cratères) où les munitions et les explosifs (Restes Explosifs de Guerre-REG) sont neutralisés *post-bellum* par explosion (*Open Detonation*) et brûlage (*Open Burning*). Dans ces zones, les teneurs en Eléments Traces Métalliques et Métalloïdes (ETMM) des sols tels que le cuivre, le plomb, le zinc, le cadmium... mais aussi l'arsenic et des substances énergétiques peuvent être excessivement élevés. Ces taux peuvent dépasser les concentrations maximales nationales admissibles, dans certains cas de plus d'un ordre de grandeur (Solokha et al. 2025). D'autres polluants organiques persistants (POPs) dans l'environnement en particuliers les dioxines et furanes chlorés (PCDD & PCDF) peuvent s'accumuler en particulier dans les résidus de brûlage (Hubé 2024). Ces pollutions s'accompagnent d'interactions complexes entre différents facteurs affectant la structure, la texture et l'état de santé des sols (perte de biodiversité : faune du sol, micro-organismes..., modifications de la texture des sols : granulométrie, teneur en matière organique, *bombturbation*...) et de la biocénose (inhibition localement de la croissance des plantes et influence sur leur état de santé, modification des cortèges d'espèces végétales et impact sur la biodiversité, transferts de la contamination à la chaîne trophique ...) (Hubé 2023) (Solokha et al. 2024). Les pollutions des zones d'éradication des REG de l'entre-deux-guerres sont représentatives de celles des guerres contemporaines interétatiques de haute intensité (i.e. Ukraine). Afin de ne pas attendre la fin des conflits pour définir des techniques de gestion et de suivi adaptées, les zones polluées par la Première et la Seconde Guerre Mondiale offrent l'opportunité de spécifier des méthodologies qui seront applicables dès la fin des conflits (Hubé 2024).

Les images de télédétection optique passive multi-/hyperspectrales (Sentinel-2, PRISMA, EnMap) offrent l'opportunité de cartographier les zones de conflit pour renseigner sur la nature et l'étendue des dégâts (Xu et al. 2024, Solokha et al. 2025). Des travaux récents portant sur les zones de conflits en Ukraine montrent l'intérêt de l'imagerie optique passive satellitaire pour la détection des parcelles agricoles endommagées complétée par un échantillonnage des sols pour évaluer les taux de pollutions en ETMMs en laboratoire afin de mettre en place les éventuelles mesures adaptées pour les remettre en état (Bonchkovskyi et al. 2025). Cependant, les approches proposées ne permettent pas d'assurer une surveillance de la migration verticale et spatiale des ETMMs. De plus, les POPs n'ont jusqu'alors été que peu étudiés par le biais de la télédétection.

L'objectif de cette thèse est de détecter et de caractériser les zones de brûlage à partir de l'imagerie hyperspectrale à très haute résolution spatiale. Des travaux récents sur la détection des pollutions aux ETMMs des sols nus et leur caractérisation à partir de l'imagerie hyperspectrale existent (Wang et al. 2023). Les approches proposées sont basées sur des méthodes empiriques (régression) ou statistiques (*machine learning*) calibrées à partir de mesures in-situ ou en laboratoire. Cependant, les différences dans les mécanismes et les propriétés physico-chimiques des ETMMs du sol, ainsi que la composition des sols conduisent à des caractéristiques spectrales spécifiques n'assurant pas une généralisation d'un contexte à l'autre. Les travaux se sont concentrés sur des contextes miniers et des friches industrielles et les zones de guerre ont à notre connaissance été peu étudiées. D'autres études récentes utilisent l'imagerie hyperspectrale pour la caractérisation des ETMMs de manière indirecte par les effets sur la végétation (Wang et al. 2024) comme par exemples l'estimation des ETMMs foliaires (Cr, Cu, Ni et Zn) ou dans le sol (Cu, As,

Ni, Cr, Mn, Mo) par l'exploitation de la réponse spectrale de la végétation pour certaines espèces végétales cibles ou encore la modification des cortèges d'espèces végétales (Lassalle et al. 2021, Béraud et al. 2023, Gimenez et al. 2023). Ces études se sont concentrées sur des strates de végétation arbustive et arborée pour des combinaisons d'ETMMs différentes de celles des zones de brûlage et dans des gammes de teneurs inférieures. Les zones de brûlage sont caractérisées par une végétation particulière, souvent composée de mousses et de lichens, qui n'a jusqu'alors été que peu étudiée par des approches de télédétection et nécessitent l'accès à des données à très haute résolution spatiale. Enfin, un défi majeur à relever concerne la détection et la caractérisation de la pollution aux PCDD & PCDF par des approches de télédétection optique passive qui n'ont pas été abordées dans la littérature.

Pour atteindre l'objectif visé, plusieurs étapes sont identifiées dans une démarche multi-échelle :

- Mise à jour de l'état de l'art pour identifier les méthodes de détection et caractérisation des ETMMs et des POPs et appréhender les travaux récents sur les zones de guerre ;
- Construction d'une base de données représentative des zones de brûlage : mesures des réponses spectrales d'échantillons de sol et de végétation, mesures des traits de la végétation et des proxys du sol, analyses des polluants (ETMMs, PCDD & PCDF) dans les sols et la végétation ;
- Identification des traits de la végétation et des proxys du sol sensibles aux polluants et des bandes spectrales d'intérêt ;
- Mise en place des méthodes de détection et de caractérisation des polluants à l'échelle in-situ avec une contrainte liée au nombre réduit d'échantillons (comparaison des approches classiques i.e. Least Square, SVR, RF, *Elastic Net*, Bootstrap... et des approches IA i.e. *few-shot learning*, *transfer learning*) ;
- Application des méthodes à une image hyperspectrale aéroportée et analyse de la sensibilité au changement d'échelle spatiale par des approches de *machine learning* (i.e. GPR *Gaussian Process Regression* ou *conformal prediction*) pour évaluer les incertitudes ;
- Evaluation de la méthode sur des images satellitaires simulées (mission BIODIVERSITY).

D. Hubé, The conversation. Guerre et pollution : le défi colossal qui attend l'Ukraine. Publié: 4 juillet 2023, <https://theconversation.com/guerre-et-pollution-le-defi-colossal-qui-attend-lukraine-208623>.

D. Hubé, (1914-1918) Première Guerre mondiale sur le front occidental L'héritage environnemental d'une guerre et d'une sortie de guerre industrielles, thèse en Sciences de l'environnement et histoire contemporaine soutenue le : 17 décembre 2024

O. Bonchkovskiy et al. War-induced soil disturbances in north eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change, *Science of The Total Environment*, Volume 964, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>.

M. Solokha, et al. Assessment of soil cover chemical pollution using satellite data: A case study of Kharkiv region, Ukraine, *Science of The Total Environment*, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180105>.

Solokha, M. et al. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land* 2024, 13, 1614, <https://doi.org/10.3390/land13101614>

J. Wang et al., Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective, *International Soil and Water Conservation Research*, Volume 11, Issue 3, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002>.

Y. Wang et al. Monitoring of soil heavy metals based on hyperspectral remote sensing: A review, *Earth-Science Reviews*, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104814>.

G. Lassalle et al. 2021, Mapping leaf metal content over industrial brownfields using airborne hyperspectral imaging and optimized vegetation indices, *Nature Scientific Reports*, 2021, 11, 2, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79439-z>.

L. Béraud et al., Impact of potentially toxic elements on pines in a former ore processing mine: Exploitation of hyperspectral response from needle and canopy scales, *Environmental Research*, 2023, vol. 227, 115747, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115747>

Gimenez R. et al., Rejection methods for vegetation mapping using hyperspectral airborne data, *International Journal of Remote Sensing*, 2023, 44(16), pp. 4937-4962, DOI: 10.1080/01431161.2023.2240520.

Collaborations envisagées :

UMLP, AMU LCE, AMU LPED, BRGM, ONERA (la direction de thèse sera assurée par une personne de l'un des laboratoires cités suivant la bourse de thèse obtenue)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :

Département : Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

Contact : S. Fabre

Tél. : 0562252859 Email : sophie.fabre@onera.fr

Directeur de thèse (AC) :

Nom : S. Fabre

Laboratoire : ONERA/DOTA

Tél. : 0562252859

Email : sophie.fabre@onera.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>