

Appel à candidature pour une thèse :

« Application de méthodes d'apprentissage profond pour la cartographie des arbres individuels et l'estimation de leur stock de carbone à partir de données d'observation de la terre dans des systèmes agroforestiers du Sénégal »

Description du projet GALILEO

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet GALILEO (*StrengtheninG rural Livelihoods and resiLiEnce to climate change in Africa*), un projet de recherche co-développé par des partenariats multi-acteurs (institutions de recherche, ONG, partenaires de terrain, communautés locales) visant à promouvoir des pratiques agroforestières durables en Afrique subsaharienne. L'objectif principal du projet est d'améliorer l'adaptation au changement climatique et la réduction de ses impacts, tout en augmentant la productivité agricole, les revenus des ménages et la résilience des communautés face aux sécheresses et autres événements climatiques extrêmes. Le projet GALILEO repose sur une approche intégrée qui combine l'utilisation de la télédétection, de l'agroforesterie et des sciences sociales afin d'optimiser les pratiques de gestion des sols et des arbres dans les systèmes agricoles en Afrique subsaharienne. Les activités principales du projet GALILEO incluent la cartographie des arbres à l'échelle individuelle par télédétection, l'estimation des stocks de carbone associés à ces arbres, ainsi que l'évaluation des services écosystémiques rendus par les systèmes agroforestiers. Le projet GALILEO d'une période de 4 ans (2025-2028) s'inscrit dans une dynamique de recherche visant à fournir des outils de gestion pratique et des données fiables pour informer les politiques publiques et les stratégies locales de lutte contre le changement climatique et la dégradation des terres. Le projet GALILEO s'appuie sur huit « Living Labs » (LLs) à l'échelle locale et quatre plateformes d'innovation nationales et régionales (IPs) pour favoriser l'adoption de solutions agroforestières adaptées aux spécificités locales des zones semi-arides et des zones plus humides mais vulnérables à la sécheresse. Les pays ciblés par le projet comprennent le Sénégal, le Kenya, le Ghana et le Cameroun. Ces zones ont été choisies pour leur diversité écologique et socio-économique, afin de comparer et d'adresser une large gamme de conditions africaines en matière de gestion agroforestière.

Contexte et problématique

L'Afrique subsaharienne est confrontée à de nombreux défis environnementaux, sociaux et économiques, exacerbés par la pression démographique croissante, les conflits et les impacts du changement climatique (FAO, 2019). Parmi les stratégies visant à atténuer ces enjeux, l'agroforesterie est considérée comme une pratique durable pour améliorer la sécurité alimentaire, restaurer la biodiversité et renforcer les moyens de subsistance des populations rurales (Mbow et al., 2014). Les systèmes agroforestiers associent arbres, cultures et/ou élevage, fournissant des services écosystémiques majeurs tels que la régulation hydrique, la protection des sols et la séquestration du carbone (Jose, 2009). Toutefois, malgré ce potentiel, la gestion et l'évaluation des stocks de carbone dans ces systèmes restent difficiles, principalement en raison du manque de données fiables et de méthodes adaptées pour la cartographie fine des arbres et l'estimation précise du carbone (Saatchi et al., 2011).

Ces dernières années, des travaux de grande ampleur ont permis de franchir un cap important, avec la cartographie des arbres individuels et des stocks de carbone à l'échelle continentale (Mugabowindekwe et al., 2023; Reiner et al., 2023; Tucker et al., 2023). Tucker et al. (2023) ont cartographié les stocks de carbone des arbres individuels à l'échelle subcontinentale dans les zones sèches d'Afrique. Mugabowindekwe et al. (2023) ont réalisé une cartographie complète des stocks de carbone arboré au Rwanda, tandis que Reiner et al. (2023) ont mis en évidence que plus du quart du couvert arboré africain se trouve en dehors des zones classées comme forêts. Toutefois, la plupart de ces études se sont concentrées sur les arbres isolés situés en dehors des zones forestières, sans distinguer les différents types de systèmes agroforestiers. Or, cette information est essentielle pour mieux intégrer l'agroforesterie dans les bilans carbone, en allant au-delà de la simple détection des arbres pour inclure également la cartographie, la structure et les fonctions des agroécosystèmes.

Objectifs

Dans un contexte où les avancées en télédétection et en apprentissage automatique ont permis des estimations de carbone à large échelle, cette thèse vise à développer une approche originale centrée sur la caractérisation fine des systèmes agroforestiers africains à l'échelle locale. L'objectif principal est de mieux quantifier et valoriser leur contribution au stockage de carbone, en intégrant les dimensions structurelles et fonctionnelles de ces systèmes. Pour ce faire, la thèse s'articule autour de trois objectifs spécifiques :

1. **Cartographier les arbres individuels et identifier les principales espèces arborées** présentes dans les systèmes agroforestiers, à l'aide d'approches d'apprentissage profond appliquées à des données multispectrales (ex. Sentinel-2, PlanetScope, etc.) et à des images satellitaires à très haute résolution (ex. Pléiades, WorldView, etc.). L'accent sera mis sur la détection précise des arbres à l'échelle individuelle et la reconnaissance des espèces caractéristiques des sites étudiés, à travers des modèles adaptés à la structuration spatiale des données (ex. U-Net, 3D CNN, GNN, ViTs ou combinaisons de ceux-ci).
2. **Cartographier les types de systèmes agroforestiers (SAF)**, en intégrant non seulement la composante arborée mais aussi les cultures sous-jacentes. Il s'agira ici de proposer une définition spatiale opérationnelle des SAF, adaptée aux réalités écologiques et agricoles locales, et de produire une typologie structurée à partir de données spatiales combinées (arbres, occupation du sol, densité, diversité). Cette étape permettra également d'identifier les sous-types de SAF au sein d'un même site (ex. : parcs arborés différenciés selon la densité de *Faidherbia albida* ou la diversité floristique de manière générale).
3. **Estimer les stocks de carbone à l'aide d'équations allométriques** génériques ou spécifiques et selon deux niveaux d'analyse : (a) à l'échelle des arbres individuels, en tenant compte des caractéristiques spécifiques des espèces identifiées ; (b) à l'échelle des systèmes agroforestiers, en intégrant la biomasse arborée et la contribution potentielle des cultures associées. Cette double échelle d'évaluation vise à mieux refléter la diversité des stocks de carbone des SAF et à alimenter des outils d'aide à la décision pour la planification environnementale et agricole.

Approche méthodologique

Les travaux de terrain seront menés dans deux sites expérimentaux du projet GALILEO, il s'agit des *living labs* de Ouarkhokh (région de Louga) et de Niakhar (région de Fatick) au Sénégal. La démarche méthodologique s'articulera en quatre étapes principales :

1. Revue de la littérature et cadrage méthodologique

- Rechercher les méthodes de *deep learning* les plus appropriées pour détecter les arbres sur des images satellitaires à très haute résolution, comme U-Net, Mask R-CNN, mais aussi des modèles plus récents comme 3D CNN, GNN ou Vision Transformers.
- Analyser la littérature sur l'estimation de la biomasse et du stock de carbone des arbres avec des images satellitaires, en particulier à partir de données multispectrales (comme Sentinel-2).
- Comprendre comment combiner différentes sources d'images multispectrales (de moyenne et de très haute résolution) dans un même modèle automatique.
- Réfléchir à la manière de définir et cartographier les systèmes agroforestiers (SAF), en tenant compte de leur complexité : arbres, cultures, densité, diversité d'espèces, etc.

2. Collecte et préparation des données

- **Images satellitaires :**
Obtenir des images multispectrales de très haute résolution (par exemple Pléiades, PlanetScope ou WorldView) et de résolution moyenne (Sentinel-2) pour différentes périodes de l'année.
- **Données de terrain :**
Faire des relevés dans les deux sites : position GPS (avec module GNSS) des arbres, nom des espèces, hauteur, diamètre, état des cultures au sol, mesure de la biomasse si possible.

- **Préparation des données :**

Créer une base de données annotées avec la forme des couronnes des arbres, les espèces (si identifiables), et les éléments visibles du paysage (cultures, jachères...). Celle-ci se fera à l'aide d'images de très haute résolution, acquises à cet effet ou via l'outil *Google earth*.

3. Développement de la méthode de cartographie des arbres individuels et des SAF

- Traiter les images pour les rendre exploitables (nettoyage, découpage, alignement).
- Développer un modèle basé sur l'apprentissage profond pour :
 - Détecter les arbres individuels ou en recoupement partiel.
 - Reconnaître les principales espèces présentes sur chaque site.
- Créer une carte des systèmes agroforestiers en combinant les arbres détectés et les cultures visibles. L'objectif étant de différencier les types de SAF selon leur densité d'arbres, la diversité des espèces, et la présence de cultures.
- Vérifier la qualité des résultats en les comparant avec les données de terrain.

4. Estimation du carbone

- Pour chaque arbre détecté, extraire des informations utiles (surface de la couronne, indices de végétation, etc.).
- Utiliser des formules (équations allométriques) adaptées aux espèces locales pour transformer ces mesures en valeurs de biomasse et puis de carbone.
- À une échelle plus large, estimer le carbone stocké dans l'ensemble du système agroforestier, en combinant les arbres et les cultures.
- Comparer les résultats entre les différents types de SAF, et analyser les différences et similitudes.

Profils du candidat

Le/La candidat(e) devra être titulaire d'un Master 2 ou d'un diplôme d'ingénieur dans l'un des domaines suivants :

- Télédétection, géomatique ;
- Big data et intelligence artificielle ;
- Informatique appliquée à l'environnement ;
- Sciences de l'environnement, écologie, foresterie, ou agronomie.

Compétences techniques attendues :

- Connaissances en télédétection
- Expérience en traitement d'images et classification supervisée/non supervisée
- Connaissances en apprentissage profond (*deep learning*)
- Programmation : Python (essentiel), R, java script, ou autre langage
- Maîtrise des outils SIG : QGIS et/ou ArcGIS

Savoir être et langue :

- Bonne communication écrite et orale en Français et anglais
- Bonne capacité d'analyses et d'écoute
- Autonomie, rigueur scientifique et curiosité intellectuelle
- Bonne capacité d'organisation

Modalité de candidature

Le dossier de candidature devra comprendre Une (1) **lettre de motivation** (en français ou en anglais) et Un (1) **curriculum vitae** détaillé (en français ou en anglais) à envoyer **au plus tard, le 10 septembre 2025 à 23h59 (GMT)**, à **Dr Abdoul Aziz DIOUF** : aziz.diouf@cse.sn et **Dr Adama LO** : adama.lo@cse.sn.

Veuillez ne pas envoyer séparément vos dossiers de candidature aux destinataires cités plus haut. Et toute candidature incomplète ou soumise après la date limite ne sera pas prise en compte.

Les candidat(e)s pré-sélectionné(e)s sur la base de leur dossier recevront une notification au plus tard le vendredi 19 septembre 2025, et seront auditionnés par le jury de sélection dans la première décade du mois d'Octobre 2025. Le démarrage de la thèse aura lieu au plus tard le 1^{er} novembre 2025.

Encadrement et Conditions d'accueil

Équipe d'encadrement : Abdoul Aziz Diouf (CSE, Ecologie-Télédétection), Adama Lo (CSE, Agronomie-Télédétection), Diara Sylla (CSE, Agroforesterie-Télédétection), Louise Leroux (CIRAD, Géographie-Télédétection), Xiaoye Tong (Université de Copenhague, Géographie-Télédétection) et Olivier Rouspard (CIRAD, Agronomie-Environnement).

Structure d'accueil : L'étudiant-e sera basé-e au Centre de Suivi Ecologique de Dakar (Sénégal).

Université d'inscription en thèse et école doctorale : L'étudiant-e sera inscrit dans une université du Sénégal.

Conditions de l'accueil : Une allocation mensuelle est prévue pour l'étudiant-e pour la durée de la thèse qui est de 36 mois. Un bureau sera mis à la disposition de l'étudiant au niveau du Centre de Suivi Ecologique. Un ordinateur sera également mis à la disposition de l'étudiant-e pour effectuer ces activités de recherche.

Références bibliographiques

- FAO. (2019). The State of Food and Agriculture 2019. *The State of Food and Agriculture 2019*. <https://doi.org/10.4060/CA6030EN>
- Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, 76(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/S10457-009-9229-7/METRICS>
- Mbow, C., Smith, P., Skole, D., Duguma, L., & Bustamante, M. (2014). Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6(1), 8–14. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2013.09.002>
- Mugabowindekwe, M., Brandt, M., Chave, J., Reiner, F., Skole, D. L., Kariyaa, A., Igel, C., Hiernaux, P., Ciais, P., Mertz, O., Tong, X., Li, S., Rwanyiziri, G., Dushimiyimana, T., Ndoli, A., Uwizeyimana, V., Lillesø, J. P. B., Gieseke, F., Tucker, C. J., ... Fensholt, R. (2023). Nation-wide mapping of tree-level aboveground carbon stocks in Rwanda. *Nature Climate Change*, 13(1), 91–97. <https://doi.org/10.1038/S41558-022-01544-W>
- Reiner, F., Brandt, M., Tong, X., Skole, D., Kariyaa, A., Ciais, P., Davies, A., Hiernaux, P., Chave, J., Mugabowindekwe, M., Igel, C., Oehmcke, S., Gieseke, F., Li, S., Liu, S., Saatchi, S., Boucher, P., Singh, J., Taugourdeau, S., ... Fensholt, R. (2023). More than one quarter of Africa's tree cover is found outside areas previously classified as forest. *Nature Communications* 2023 14:1, 14(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37880-4>
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., & Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(24), 9899–9904. https://doi.org/10.1073/PNAS.1019576108/SUPPL_FILE/ST03.DOC
- Tucker, C., Brandt, M., Hiernaux, P., Kariyaa, A., Rasmussen, K., Small, J., Igel, C., Reiner, F., Melocik, K., Meyer, J., Sinno, S., Romero, E., Glennie, E., Fitts, Y., Morin, A., Pinzon, J., McClain, D., Morin, P., Porter, C., ... Fensholt, R. (2023). Sub-continental-scale carbon stocks of individual trees in African drylands. *Nature* 2023 615:7950, 615(7950), 80–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05653-6>