



Doctorat en Sciences de l'Environnement

Trade2Invade : Accords commerciaux, voies d'introduction spécifiques aux marchandises et prédiction des introductions d'espèces alien envahissantes

introductions

- **Encadrants :**
 - **Sophie Donnet** (DR INRAE, MIA Paris Saclay)
 - **Arnaud Estoup** (DR INRAE, CBGP)
 - Estelle Gozlan (CR INRAE, PSAE)
- **Début :** 1er octobre 2026
- **Date limite de candidature :** 30 juin 2026
- **Laboratoires de rattachement :**
 - UMR MIA Paris-Saclay, <https://mia-ps.inrae.fr/>
 - UMR PSAE : Paris Saclay Applied Economics, <https://psae-saclay.fr/>
- **Contact :** arnaud.estoup@inrae.fr, sophie.donnet@inrae.fr, estelle.gozlan@inrae.fr
- **École doctorale :** École Doctorale ABIES
- **Établissement d'inscription :** Université Paris-Saclay
- **Financement obtenu** du département SPE d'INRAE.

Résumé : Cette thèse vise à comprendre et prédire l'impact d'accords commerciaux sur les invasions biologiques. En combinant écologie, économie internationale et science des données, le projet cherchera à identifier les routes commerciales, régions sources et facteurs environnementaux favorisant l'introduction, l'établissement et la propagation d'espèces exotiques envahissantes, avec un focus particulier sur l'Europe et certains accords structurants. À partir de données d'interceptions aux frontières, de flux commerciaux et de variables écologiques, des modèles statistiques et prédictifs seront développés afin d'anticiper les risques d'invasion liés aux transformations des échanges internationaux et de contribuer aux stratégies de surveillance, de prévention et de gestion des invasions biologiques.

1 Objectifs

Ce projet de thèse vise à améliorer la compréhension et la capacité de prédiction des dynamiques d'introduction d'espèces envahissantes, en mobilisant une approche résolument transdisciplinaire à l'interface entre biologie, économie et modélisation/analyse de données. En croisant ces champs, l'objectif est de mieux saisir les mécanismes complexes qui sous-tendent les flux d'introduction, depuis les pressions commerciales globales jusqu'aux processus écologiques d'établissement.

Plus spécifiquement, ce travail ambitionne d’estimer et de prédire l’influence des grands accords commerciaux internationaux sur le risque d’introduction d’espèces exotiques. Il pourra s’agir notamment d’identifier et de caractériser les principales filières vectrices, de cartographier les zones sources et les régions réceptrices les plus vulnérables, et, lorsque les données le permettent, d’évaluer un proxy de l’impact écologique associé. Une attention particulière sera portée au contexte européen, en raison de la disponibilité des données, de l’intensité de ses échanges commerciaux et de la sensibilité de ses écosystèmes aux invasions biologiques.

2 Contexte multidisciplinaire

L’intensification des échanges internationaux constitue aujourd’hui l’un des moteurs majeurs de la redistribution mondiale des espèces. En facilitant la circulation rapide et massive de biens, de matériaux et d’organismes associés, le commerce international augmente mécaniquement les opportunités d’introduction d’espèces exotiques, dont certaines peuvent ensuite s’établir, se propager et devenir envahissantes (Levine et D’Antonio, 2003 ; Hulme, 2021 ; Pyšek et al., 2020). Ces invasions biologiques représentent désormais un risque global pour la biodiversité, les productions agricoles, les écosystèmes et les systèmes socio-économiques, avec des impacts croissants sur les politiques de surveillance, de prévention et de gestion (IPBES, 2023).

Cependant, le lien entre commerce international et invasions biologiques reste encore insuffisamment formalisé dans une perspective intégrée. Les travaux existants montrent que les volumes d’échanges, les routes commerciales, les réseaux de transport et les accords commerciaux peuvent influencer les probabilités d’introduction et d’établissement des espèces exotiques (Seebens et al., 2015 ; Reino et al., 2017 ; Bonnamour et al., 2021). Néanmoins, il demeure difficile de relier, dans un même cadre analytique, les transformations des flux commerciaux, les filières d’échange, les interceptions aux frontières, les caractéristiques des zones sources et cibles, ainsi que les probabilités d’introduction, d’établissement et d’invasion.

La thèse TRADE2INVADE s’inscrit dans cette problématique en proposant de développer un cadre multidisciplinaire articulant économie internationale, écologie des invasions, modélisation statistique et science des données. L’objectif central est de comprendre comment les transformations des échanges commerciaux — en particulier les grands événements économiques, les accords commerciaux ou les repondérations des flux entre régions du monde — modifient les risques d’introduction, d’établissement et d’invasion des espèces exotiques. Il s’agira ainsi de passer d’une analyse descriptive des introductions à une modélisation intégrée des trajectoires d’invasion.

Une première ambition du projet est de quantifier l’effet des dynamiques commerciales sur les risques d’introduction. Les bases de données d’interceptions, croisées avec des données de commerce international, permettront d’identifier les couples source-cible, les filières et les points d’entrée les plus susceptibles de concentrer le risque. Cette approche devra toutefois tenir compte des biais inhérents aux données de surveillance, notamment parce que l’intensité des contrôles aux frontières dépend de décisions réglementaires, politiques ou sanitaires qui ne sont pas toujours observables. La thèse cherchera donc à distinguer, autant que possible, le signal biologique et commercial réel des effets liés aux dispositifs de détection.

Une seconde ambition est d’aller au-delà de la seule introduction. Une espèce introduite ne

devient problématique que si elle parvient à s'établir, puis éventuellement à se propager. Le projet intégrera donc des variables écologiques et évolutives susceptibles d'influencer cette transition : similarité entre biomes d'origine et d'accueil, distance environnementale, niveau de perturbation anthropique des zones sources et cibles, traits biologiques des espèces, et potentiel adaptatif.

L'originalité de TRADE2INVADE réside donc dans l'articulation entre les dimensions économiques, écologiques et prédictives du risque invasif. En combinant données commerciales, données d'interceptions, bases d'occurrences d'espèces exotiques et variables environnementales, la thèse visera à produire des indicateurs multi-échelles du risque biologique associé aux échanges internationaux. Ces indicateurs pourront prendre la forme de scores de risque, de cartes de priorisation, d'identification de routes commerciales sensibles ou de scénarios prospectifs liés à de nouveaux accords commerciaux, par exemple l'accord entre l'Union européenne et le Mercosur.

Au-delà du diagnostic scientifique, le projet poursuit une finalité opérationnelle. Les modèles développés devront contribuer à une logique de type « surveillance-action », en aidant à prioriser les efforts de contrôle, les dispositifs de détection précoce et les stratégies de mitigation. Il s'agira notamment d'éclairer les arbitrages entre prévention en amont des chaînes d'échange, renforcement des contrôles aux points d'entrée, et surveillance ciblée des territoires les plus exposés. Cette perspective permettra de mieux intégrer le risque biologique dans l'évaluation des politiques commerciales, agricoles et environnementales.

Enfin, la thèse mobilisera des approches avancées de modélisation et de science des données, depuis des modèles probabilistes interprétables jusqu'à des méthodes d'apprentissage automatique, d'analyse de réseaux ou, lorsque les données le permettront, d'inférence causale. L'enjeu ne sera pas seulement d'améliorer la prédiction, mais aussi de produire des résultats interprétables, transférables et utiles à la décision publique. En ce sens, TRADE2INVADE ambitionne de contribuer à une meilleure anticipation des invasions biologiques dans un monde où les échanges commerciaux, les pressions anthropiques et les risques écologiques sont de plus en plus étroitement liés.

3 Plan de travail

Quatre axes de travail sont envisagés, chacun correspondant à environ trois quarts d'année de travail. Ces axes suivent la logique séquentielle des invasions biologiques : introduction, établissement, invasion/expansion, puis valorisation prédictive des modèles développés.

Axe 1 : Effets d'événements économiques majeurs sur l'introduction des espèces alien.

À partir des données d'interceptions aux frontières de l'UE (EUROPHYT/Traces), nous chercherons à quantifier l'effet de la structure des échanges commerciaux sur le risque d'introduction des espèces alien. L'analyse portera en particulier sur l'impact d'événements économiques majeurs, comme l'entrée de la Chine à l'Organisation Mondiale du Commerce, sur les flux d'introduction vers les pays européens.

Les données étudiées seront des interactions spatio-temporelles, une interaction correspondant à l'interception, dans un pays i , d'une espèce alien provenant d'un pays j . Une première approche reposera sur une modélisation probabiliste destinée à quantifier les effets des variables commerciales, géographiques et temporelles sur le risque d'introduction. Des méthodes de machine learning

pourront ensuite être mobilisées pour améliorer la prédiction de ce risque. Une difficulté centrale résidera dans les biais d'échantillonnage, la fréquence des contrôles aux frontières dépendant de décisions politiques, réglementaires ou d'accords spécifiques souvent non documentés publiquement. Cet axe mobilisera donc des compétences avancées en modélisation statistique, apprentissage et potentiellement en économétrie.

Axe 2 : Risque d'établissement et d'invasion des espèces alien. Une fois une espèce introduite, sa probabilité d'établissement puis d'invasion dépend de plusieurs facteurs : similarité ou différence entre biome d'origine et biome d'accueil (distance environnementale), pression anthropique dans les zones sources et cibles, traits biologiques de l'espèce, ainsi que potentiel adaptatif.

Dans le cadre de l'étude des effets de la structure des échanges commerciaux sur les invasions biologiques, une attention particulière sera portée à l'hypothèse de l'adaptation à l'invasion induite par les activités humaines (AIAI ; Estoup et al. 2026). Cette hypothèse propose que les perturbations répétées causées par les activités humaines dans l'aire native d'une espèce (urbanisation, agriculture intensive, artificialisation des milieux) exercent des pressions de sélection favorisant des génotypes tolérants aux environnements anthropisés. Ces génotypes pourraient ensuite présenter un avantage lors de l'introduction et de l'établissement dans des milieux également modifiés par les humains hors de l'aire native. L'hypothèse AIAI s'inscrit donc dans le cadre plus général de la pré-adaptation, tout en précisant un mécanisme particulier : l'adaptation préalable à des habitats anthropisés dans la région d'origine. L'objectif de cet axe sera d'identifier les facteurs qui conditionnent le passage de l'introduction à l'établissement puis à l'invasion, en intégrant les caractéristiques des espèces, des zones sources et des zones d'accueil.

Axe 3 : Approche intégrative des étapes de l'invasion biologique. Le troisième axe cherchera à articuler les deux premiers axes dans une approche intégrative du processus invasif. Il ne s'agira plus seulement d'étudier séparément le risque d'introduction ou le risque d'établissement, mais de modéliser l'enchaînement des principales étapes : introduction, établissement, puis invasion ou expansion sensu stricto.

Cette approche permettra d'évaluer comment les facteurs commerciaux, géographiques, environnementaux et biologiques interagissent au cours du processus d'invasion. Elle visera notamment à déterminer si certaines routes commerciales, certaines régions sources ou certains contextes environnementaux sont associés non seulement à un risque accru d'introduction, mais aussi à une probabilité plus élevée d'établissement et d'expansion. Cet axe constituera ainsi le cadre de synthèse permettant de relier les dynamiques économiques étudiées dans l'axe 1 aux mécanismes écologiques et évolutifs étudiés dans l'axe 2.

Axe 4 : Capacités prédictives des modèles développés. Le quatrième axe visera à évaluer la capacité prédictive des modèles développés dans les axes précédents. Une première étape consistera à tester rétrospectivement les modèles sur des événements économiques connus, afin de déterminer s'ils auraient permis d'anticiper des modifications du risque d'introduction, d'établissement ou d'invasion.

Dans un second temps, ces modèles pourront être appliqués à des scénarios prospectifs liés à de grands accords commerciaux récents ou à venir, par exemple l'accord entre l'Union européenne et le MERCOSUR. L'objectif sera d'estimer comment la modification des flux commerciaux, de leur intensité ou de leur origine géographique pourrait affecter le risque d'invasions biologiques en Europe.

Cet axe devra toutefois tenir compte des limites des bases de données actuellement disponibles, notamment leur incomplétude, leur hétérogénéité et les biais liés aux dispositifs de surveillance. Les prédictions produites devront donc être accompagnées d’une évaluation explicite de leur incertitude. À terme, cet axe visera à déterminer dans quelle mesure les modèles développés peuvent contribuer à l’aide à la décision pour la surveillance, la prévention et la gestion des invasions biologiques.

4 Résultats attendus

Les travaux devront être publiés dans des revues scientifiques. Les outils numériques mobilisés ou développés spécifiquement pour répondre aux questions posées devront être mis à disposition de la communauté.

5 Modalités d’encadrement et contexte de travail

La personne en doctorat sera co-dirigée par Sophie Donnet (DR INRAE), Arnaud Estoup (DR INRAE) et Estelle Gozlan (CR INRAE). Ces chercheurs portent respectivement la composante Modélisation-Apprentissage, Biologie et Economie du projet. L’encadrement sera assuré par des réunions hebdomadaires avec les trois encadrants au début (en visio avec Arnaud Estoup), ce rythme sera à adapter par la suite en fonction des directions prises par la thèse.

Le/la doctorante sera localisé(e) sur le Campus Agronomique Paris Saclay situé à Palaiseau. Sur ce campus, il/elle disposera d’un bureau. Les unités PSAE et MIA-PS partagent les mêmes locaux. Des visites au CBGP seront organisées.

Environnement MIA-PS Pour la partie modélisation/apprentissage, la personne en doctorat profitera de l’environnement scientifique de l’équipe SOLsTIS de l’unité MIA Paris-Saclay qui regroupe un vingtain de chercheurs permanents et autant de doctorants / post-doctorants en apprentissage statistiques pour les sciences du vivant. Un séminaire hebdomadaire de statistiques y est organisé, ainsi qu’un séminaire des doctorants. L’unité dispose aussi d’un groupe de travail sur les pratiques de code R et python très actif. L’unité s’intègre dans le tissu de l’apprentissage statistique du plateau de Saclay et des animations scientifiques qui s’y rattachent.

Environnement PSAE : Pour la modélisation des flux commerciaux et de l’impacts de chocs commerciaux sur la géographie des échanges, la personne en doctorat pourra bénéficier de l’expertise des économistes de l’unité Paris-Saclay Applied Economics. PSAE est une UMR INRAE et AgroParisTech localisée sur le campus AgroParisTech de Saclay. Elle regroupe une soixantaine de membres permanents, des chercheurs et des enseignants-chercheurs de ces deux institutions ainsi que des ingénieurs, techniciens et personnels administratifs.

Environnement CBGP : Composé de près de 90 agents permanents d’INRAE, de l’IRD, du Cirad et l’Institut Agro Montpellier, le Centre de Biologie pour la Gestion des Populations (CBGP), est situé dans l’agglomération de Montpellier. Les recherches qui y sont menées s’inscrivent dans le cadre des menaces liées aux arthropodes phytophages attaquant les cultures ou les forêts, aux espèces envahissantes, et aux réservoirs de zoonoses. Le candidat intégrera l’axe thématique « Évo-

lution contemporaine des populations » au sein duquel plusieurs programmes de recherche portent plus spécifiquement sur l'évolution d'insectes invasifs et/ou ravageurs des cultures et sur leur adaptation aux agrosystèmes.

Environnement ORCAE : La thèse bénéficiera, sous différentes formes, du soutien de plusieurs scientifiques impliqués dans la structure INRAE ORCAe (Off-site Research Center for the Anticipation of Emerging pests in plant health). ORCAe est une « équipe-projet » INRAE hors-les-murs, multi-unité et multi-département, composée d'un noyau dur de 12 scientifiques (Core Leader Team incluant les trois encadrants de la thèse), leaders dans leurs domaines, et couvrant de manière complémentaire les diverses dimensions (biologie, société, économie ; modélisation ; etc) en jeu dans le domaine des invasions biologiques, tant sur le plan de la recherche que sur le plan de l'innovation.

6 Profil attendu

La personne en doctorat sera rattachée à l'école doctorale ABIES. Afin de mener à bien le projet, elle devra avoir un bagage solide en apprentissage/modélisation. Elle devra prouver une forte motivation pour les sciences de l'environnement et faire preuve d'un intérêt marqué pour l'économie et la biologie. Le profil attendu est celui d'un(e) étudiant(e) ayant obtenu un M2 avec une forte composante modélisation/apprentissage ou issu d'une école d'ingénieur généraliste

Elle devra avoir un niveau d'anglais lui permettant la bonne compréhension d'articles scientifiques ainsi que la rédaction d'articles.

Bibliographie

- Bonnamour A., Gippet J.M.W., Bertelsmeier C. (2021). Invasive species are more likely to establish in countries with recently negotiated trade agreements. *Ecology Letters*, 24, 2418–2432. DOI : [10.1111/ele.13863](https://doi.org/10.1111/ele.13863)
- Hulme P.E. (2021). Unwelcome exchange : International trade as a direct and indirect driver of biological invasions worldwide. *One Earth*, 4, 666–679. DOI : [10.1016/j.oneear.2021.04.015](https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.04.015)
- IPBES. (2023). *Thematic Assessment Report on Invasive Alien Species and their Control*. IPBES secretariat, Bonn, Germany. DOI : [10.5281/zenodo.7430682](https://doi.org/10.5281/zenodo.7430682)
- Levine J.M., D'Antonio C.M. (2003). Forecasting biological invasions with increasing international trade. *Conservation Biology*, 17, 322–326. DOI : [10.1046/j.1523-1739.2003.02038.x](https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2003.02038.x)
- Pyšek P., Hulme P.E., Simberloff D., Bacher S., Blackburn T.M., Carlton J.T., Dawson W., Essl F., Foxcroft L.C., Genovesi P., et al. (2020). Invasive alien species and the future of ecosystems. *Biological Reviews*, 95, 1511–1534. DOI : [10.1111/brv.12627](https://doi.org/10.1111/brv.12627)
- Reino L., Figueira R., Beja P., Araújo M.B., Capinha C., Strubbe D. (2017). Networks of global bird invasion altered by regional trade ban. *Science Advances*, 3, e1700783. DOI : [10.1126/sciadv.1700783](https://doi.org/10.1126/sciadv.1700783)
- Seebens H., et al. (2015). Global trade will accelerate plant invasions in emerging economies under climate change. *Global Change Biology*, 21, 4128–4140. DOI : [10.1111/gcb.13021](https://doi.org/10.1111/gcb.13021)
- Seebens H., Blackburn T.M., Dyer E.E., Genovesi P., Hulme P.E., Jeschke J.M., Pagad S., Pyšek P., van Kleunen M., Winter M., Essl F. (2017). No saturation in the accumulation of alien species worldwide. *Nature Communications*, 8, 14435. DOI : [10.1038/ncomms14435](https://doi.org/10.1038/ncomms14435)

- Ollier S., Bertelsmeier C. (2022). Precise knowledge of commodity trade is needed to understand invasion flows. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 20, 467–473. DOI : [10.1002/fee.2509](https://doi.org/10.1002/fee.2509)
- Estoup A., Hulme P., Hodgins L., Gautier M., Lombaert E., Dhami M., McGaughran A., Hufbauer A.R. (2026). *Habitat modification in the native range promotes invasion*. En révision à *Trends in Ecology & Evolution*. <https://hal.science/hal-05549889>