



**HAL**  
open science

## Rapport du projet TRAMARE (2019-2022)

Céline Clauzel

► **To cite this version:**

Céline Clauzel. Rapport du projet TRAMARE (2019-2022). [Rapport de recherche] Ladyss; Université de Paris. 2020, pp.34. hal-03113687

**HAL Id: hal-03113687**

**<https://hal.science/hal-03113687>**

Submitted on 18 Jan 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/342122937>

# Rapport final du projet TRAMARE

Technical Report · June 2019

CITATIONS

0

READS

139

1 author:



Céline Clauzel

Paris Diderot University

67 PUBLICATIONS 560 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Reducing Human-Wildlife conflicts [View project](#)



TRAMARE [View project](#)



# Rapport du projet TRAMARE (2019-2020)

---

Financement principal : Région Ile-de-France

*Illustration : C.Gaber*

17 JUIN 2020

---

**Céline CLAUZEL**

Enseignant-chercheur  
UMR CNRS LADYSS  
Université de Paris

---

# Préambule

Le projet TRAMARE vise à co-construire avec les acteurs en charge de la biodiversité un outil cartographique d'aide à la décision pour préserver, gérer et restaurer les continuités écologiques à différentes échelles spatiales et temporelles en cohérence avec les objectifs du SRCE d'Ile-de-France. Il s'inscrit dans le thème B de l'appel régional « *Trame verte et Bleue (TVB) : Préservation, gestion et restauration des continuités écologiques* » piloté par la Région Ile-de-France et lancé en août 2018. Le projet a été financé par la Région Ile-de-France et a bénéficié d'un soutien financier complémentaire d'ARP-ASTRANCE.

**Responsable du projet : Céline Clauzel, Maître de conférences en Géographie, UMR CNRS LADYSS, Université Paris Diderot**

## **Participants :**

- Claire Godet, Ingénieur d'études (12 mois)
- Carole Gaber, Master 2 Alternance chez ARP-Astrance (12 mois)
- Arnaud Perrin, Master 1 Recherche (2 mois)

## **Résumé synthétique des tâches réalisées**

1. Réalisation d'ateliers participatifs
2. Analyse exploratoire de la base de données sur les mares de la SNPN
3. Définition de 8 profils d'espèces inféodées aux mares
4. Modélisation des réseaux de mares pour chaque profil selon 3 méthodes
5. Recherche des meilleurs emplacements pour créer de nouvelles mares

---

# Table des matières

Préambule .....	2
Table des matières .....	3
<b>Rappel des objectifs du projet TRAMARE .....</b>	<b>4</b>
Contexte et enjeux.....	4
Objectifs.....	4
Méthode.....	5
<b>1. Ateliers participatifs et fiches méthodologiques .....</b>	<b>6</b>
Atelier 1 (mai 2019) .....	6
Atelier 2 (octobre 2019) .....	8
Atelier 3 (février 2020) .....	8
Fiches d'aide à l'utilisation du logiciel Graphab.....	8
<b>2. Analyse exploratoire de la base de données sur les mares de la SNPN .....</b>	<b>9</b>
Répartition des données selon le statut de la mare .....	9
Répartition des données selon les observateurs .....	11
Essai d'un protocole de vérification des mares potentielles.....	11
<b>3. Préparation des données paysagères et écologiques .....</b>	<b>15</b>
Constitution de la carte de paysage de l'Île-de-France .....	15
Définition de huit profils d'espèces inféodées aux mares .....	16
<b>4. Modélisation des réseaux de mares .....</b>	<b>18</b>
Méthode 1 : Carte du paysage (LM).....	18
Méthode 2 : Modèle prédictif d'habitat (HSM) .....	19
Méthode 3 : Modèle combiné (HSM_LM).....	21
Comparaison des 3 méthodes.....	22
<b>5. Recherche des meilleurs emplacements pour la création de mares .....</b>	<b>24</b>
Analyse par espèce .....	24
Combinaison multi-espèces .....	26
<b>Annexes .....</b>	<b>29</b>
Annexe 1 : Détail des catégories de la carte de paysage .....	29
Annexe 2 : Résultats des modèles prédictifs d'habitat pour les 8 espèces étudiées.....	30
Annexe 3 : Courbes des valeurs des métriques en fonction des trois méthodes .....	33

---

# Rappel des objectifs du projet TRAMARE

## Contexte et enjeux

L'intensification de la pression anthropique sur les milieux contribue à diminuer et fragmenter les habitats naturels, rendant plus difficiles les déplacements des espèces animales entre les différentes taches d'habitat. Or, ces déplacements sont indispensables à la réalisation de leur cycle de vie (recherche de nourriture, migration saisonnière, dispersion juvénile). La connectivité fonctionnelle du paysage, qui permet aux individus de se déplacer entre les taches d'habitat, est donc considérée comme un facteur-clé de la viabilité des populations animales. Pour tenter de limiter les effets de la fragmentation paysagère, les politiques environnementales se sont progressivement focalisées sur l'identification et la préservation des réseaux écologiques. Les « réseaux écologiques » désignent ici à la fois les configurations paysagères qui favorisent les flux biologiques et les mesures d'aménagement du territoire qui visent à maintenir et restaurer ces flux. En France, ils se traduisent par le dispositif des Trames Vertes et Bleues (TVB).

Depuis une quinzaine d'années, de nombreuses études scientifiques ont développé des outils et des méthodes pour identifier les réseaux écologiques et évaluer l'impact des aménagements sur la connectivité. Dans ce domaine, la modélisation spatiale des réseaux écologiques par la théorie des graphes a montré sa pertinence pour représenter correctement les flux biologiques tout en limitant la quantité de données en entrée (Foltête et al., 2014 ; Galpern, 2011). Cette méthode a été par exemple utilisée pour identifier et hiérarchiser les réservoirs de biodiversité en fonction de leur importance pour la connectivité régionale (Clauzel, 2017), guider l'implantation de passage à faune pour restaurer la connectivité (Girardet et al., 2016 ; Mimet et al., 2016), évaluer l'impact de la LGV Rhin-Rhône sur la connectivité des mares (Clauzel et al., 2013) ou encore prioriser les secteurs de restauration d'habitat (Clauzel et al., 2015). D'abord développée dans le monde scientifique, la modélisation des réseaux écologiques par la théorie des graphes commence à être utilisée dans les collectivités locales et les bureaux d'études pour la gestion de la TVB, notamment à l'échelle locale (Girardet et Clauzel, 2018). Néanmoins, son transfert vers le monde opérationnel soulève encore des difficultés face aux données et aux capacités informatiques nécessaires ainsi que sur la construction et l'interprétation des modèles.

## Objectifs

L'objectif du projet TRAMARE est de co-construire avec les acteurs en charge de la biodiversité des modèles d'analyse des réseaux écologiques et les accompagner dans leur prise en main et l'interprétation des résultats. Cette modélisation spatiale vise à apporter une aide à la décision pour préserver, gérer et restaurer les continuités écologiques à différentes échelles spatiales et temporelles.

Grâce au partenariat avec la Société Nationale de Protection de la Nature (SNPN) et la mise à disposition de leur inventaire participatif des mares, le projet TRAMARE se focalise sur les réseaux de mares en Ile-de-France. La méthode est néanmoins aisément généralisable et peut être transposée à d'autres types de milieux. L'attention portée aux mares vise à combler un déficit de travaux sur ces milieux pourtant stratégiques. Malgré leur rôle prépondérant dans la fourniture de services écosystémiques, les mares font l'objet de peu de réglementations et de mesures protectrices, notamment à l'échelle paysagère. En outre, leur petite taille rend complexe leur cartographie à une échelle régionale par des procédures de classification automatique ou par photo-interprétation manuelle. Les études sur la préservation des mares et des espèces inféodées à ce milieu se limitent donc souvent à une échelle locale. Or, l'analyse du rôle des mares dans la prévention des inondations, le stockage de carbone ou de polluants, ou encore le déplacement des espèces animales implique une échelle plus large pour tenir compte des connexions potentielles. Ces fonctionnalités sont en effet d'autant plus importantes si les mares forment un réseau connecté, permettant aux flux biologiques ou hydrologiques de migrer d'une mare à une autre. Des travaux récents ont ainsi montré le rôle vital des réseaux de mares pour permettre aux amphibiens de s'adapter aux aléas météorologiques et de migrer vers le nord ou en altitude face au changement climatique. Dans cette perspective, le couplage entre la modélisation spatiale et l'inventaire participatif des mares de la SNPN est une formidable opportunité d'appliquer la théorie des graphes à une base de données inédite à l'échelle de l'Ile-de-France (22 000 mares cartographiées).

# Méthode

## Modélisation spatiale des réseaux écologiques

La méthode, déjà éprouvée à de nombreuses reprises (Foltête et al., 2014), consiste à modéliser le réseau écologique des mares à l'échelle de l'Ile-de-France en utilisant la théorie des graphes. À partir des données d'occupation du sol (MOS de l'IAU) complétées par les mares de l'inventaire de la SNPN, un graphe est construit représentant le réseau de déplacement pour un groupe d'espèces (Figure 1). Dans ce graphe, les nœuds représentent les taches d'habitat (ici, les mares), et les liens représentent les connexions potentielles entre les mares. Ces liens sont définis en tenant compte de la perméabilité du paysage (certains types d'occupation du sol sont plus facilement traversables que d'autres) et des capacités de déplacement des espèces considérées.



Figure 1 : Modélisation des réseaux écologiques par la théorie des graphes. À partir d'une carte d'occupation du sol (a), les taches d'habitat et les chemins de moindre coût sont identifiés (b). Le graphe sert ensuite de support au calcul de métriques de connectivité (c) afin de hiérarchiser les éléments en fonction de leur importance.

Une fois le graphe construit, plusieurs métriques de connectivité sont calculées afin de hiérarchiser les nœuds et les liens en fonction leur importance. Différents types de connectivité peuvent être mesurés : la surface ou la qualité de l'habitat, le nombre de connexions avec les mares voisines ou la position de centralité à l'intérieur du réseau. La modélisation par les graphes procure ainsi une évaluation quantitative et qualitative de la connectivité. Elle est réalisée avec le logiciel libre [Graphab](#) déjà utilisé sur des problématiques de hiérarchisation et de restauration des continuités écologiques (Girardet & Clauzel, 2018).

## Définition des espèces cibles

Les graphes modélisent les réseaux écologiques d'une espèce ou d'un groupe d'espèces ayant des préférences paysagères et des capacités de déplacement similaires. Pour couvrir les différents compartiments de la biodiversité, plusieurs graphes doivent être construits en fonction des exigences écologiques des espèces. Les données d'observation de la base CETTIA-IDF ainsi que des experts sont sollicités pour choisir plusieurs espèces inféodées aux mares (amphibiens, odonates, lépidoptères, etc.) aux exigences écologiques variées, en fonction des enjeux de conservation en Ile-de-France.

L'objectif est de sélectionner des espèces qui utilisent différents types de milieux terrestres pour se déplacer afin de travailler à la fois sur les continuités arborées, herbacées et de milieux humides. Par exemple, la rainette arboricole (*Hyla arborea*) apprécie les linéaires arborés et arbustifs, alors que le crapaud commun (*Bufo bufo*) peut utiliser les milieux herbacés.

---

# 1. Ateliers participatifs et fiches méthodologiques

*Objectif : Organiser trois ateliers réunissant les acteurs en charge de la gestion de la TVB pour évaluer le degré d'appropriation des méthodes de modélisation des réseaux écologiques et leur éventuel transfert dans la sphère opérationnelle.*

Structures impliquées et représentées aux ateliers : CD77 ; CD78/ENS ; CD91/CENS ; ARB IdF ; CD91/Eau ; CD93 ; GP Biodif ; SIARJA ; SNPN

## Atelier 1 (mai 2019)

Objectifs : présenter le projet TRAMARE, les objectifs et les personnes impliquées ; présenter la modélisation spatiale des réseaux écologiques par la théorie des graphes et ses applications ; identifier les besoins des gestionnaires en termes d'outils, de compétences et d'enjeux de gestion.

**Moment d'échanges autour de la question « Comment les acteurs intègrent ou non les continuités écologiques dans leurs pratiques de gestion ? »**

- Si intégration des continuités écologiques : dans quel cadre ? ; avec quels outils ? quels milieux/espèces étudiés ?
- Si pas d'intégration des continuités écologiques, pourquoi ?
- « Liste au Père Noël » : en l'absence de contraintes techniques ou financières, qu'est-ce que les acteurs souhaiteraient prendre en compte dans leurs pratiques de gestion en lien avec les continuités écologiques ?

### Résultats synthétiques :

**Les cadres** dans lesquels les participants intègrent les continuités écologiques sont très variés : PLU, sites de compensation, SAGE, différentes conventions (Convention nature en ville CD91, Convention gestion sur espaces communaux ou espaces privés), trames vertes et bleues, plans de gestion des zones humides, stratégies de l'arbre d'alignement, gestion du réseau routier.

**Les outils** utilisés pour intégrer les continuités écologiques sont peu cités, à l'exception des systèmes d'information géographique. L'identification des continuités écologiques repose finalement sur des travaux et documents préexistants, notamment le Schéma Régional de Cohérence Ecologique (SRCE). A une échelle plus fine, elle s'appuie sur des sources variées (études antérieures réalisées par des organismes scientifiques ou des bureaux d'études, zones de préemption, périmètres départementaux d'interventions foncières) et/ou sur des données d'observation (inventaires localisés, observations naturalistes participatives, expertises naturalistes).

**Les milieux** étudiés sont les prairies, les milieux aquatiques, les zones humides, les mares forestières. Les **espèces** correspondent soit à l'ensemble de la faune et la flore d'un périmètre (Espace Naturel Sensible par exemple), soit à un groupe ou une espèce en particulier (odonates, amphibiens, castors, anguilles et écrevisses à pieds blancs, etc.)

Lorsque les participants **n'intègrent pas** les continuités écologiques, c'est en partie dû aux contraintes budgétaires, au manque de connaissances des enjeux ou des milieux, ainsi qu'à l'absence de cadre réglementaire qui se traduit par un manque d'obligations et de contrôles de la part des services instructeurs sur les notions de connectivités et continuités écologiques.

Dans la « **liste au père Noël** », plusieurs sujets sont abordés : mieux préserver l'environnement (améliorer la qualité de l'eau, diminuer les pollutions agricoles) ; améliorer la connaissance (des milieux, des espèces, des documents de gestion) ; avoir des projets transversaux et une collaboration entre les différents acteurs ; intégrer la trame noire ; avoir des études de fonctionnalités des continuités écologiques sur de nombreuses zones.

## Deuxième moment d'échanges

Suite à la présentation de la théorie des graphes pour modéliser les continuités écologiques, un second moment d'échanges avait pour objectif de savoir si les acteurs souhaitaient intégrer (post-it vert) ou non (post-it orange) cette méthode dans leurs pratiques de gestion. Quelle que soit la couleur choisie, les participants devaient préciser les difficultés qu'ils pourraient rencontrer et imaginer des solutions pour les résoudre. Ces propositions ont permis d'organiser un deuxième atelier qui réponde au mieux aux attentes des participants.

## Résultats synthétiques

Couleur Post-it	Difficultés	Propositions de solutions
Vert	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manque de connaissances pour l'utilisation du logiciel (maîtrise des concepts écologiques et de la modélisation, maîtrise de l'outil et de ses possibilités d'analyse, format des données)</li> <li>- Manque d'identification des besoins opérationnels</li> <li>- Pas d'homogénéisation des logiciels utilisés par les gestionnaires</li> <li>- Manque de données</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formation au logiciel et à la modélisation à partir d'exemples concrets</li> <li>- Guide méthodologique</li> <li>- Accompagnement : Structure/ personne à contacter en cas de difficultés d'utilisation → un mail contact existe déjà : <a href="mailto:graphab@univ-fcomte.fr">graphab@univ-fcomte.fr</a></li> <li>- Mieux identifier les différents besoins des gestionnaires</li> <li>- Communication et transfert des connaissances dans les autres services (SIG notamment)</li> <li>- Apport des bases de données participatives ?</li> </ul>
Jaune	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manque de soutien/volonté politique pour travailler sur ces questions</li> <li>- Manque de temps (pour se former à l'outil, intégrer les données, réaliser les études) en plus des missions « classiques »</li> <li>- Données fragmentées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avoir un cadre réglementaire et une vraie stratégie politique sur ces questions</li> <li>- Stagiaire M2 sur ces missions</li> <li>- Intégration progressive de ces missions par les agents</li> <li>- Apport des bases de données participatives ?</li> </ul>
Orange	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Charge de travail importante (manque de personnel, manque de temps)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avoir un cadre réglementaire et une vraie stratégie politique sur ces questions</li> </ul>

## Autres points soulevés

- Comment prend en compte l'ensemble des continuités écologiques pour avoir un diagnostic global et notamment identifier les zones importantes pour la majorité des espèces ?
- Cibler les analyses sur des secteurs précis en lien avec l'expertise des participants pour intégrer des données de terrain ?
- Mise en garde sur les fiches méthodologiques : elles doivent accompagner l'utilisateur mais ne remplacent pas l'étape de réflexion en amont : quel objectif ? quelles espèces ? quelle métrique de connectivité ? Les fiches peuvent en revanche donner des indications sur le choix des données, les avantages/inconvénients de chaque choix de paramétrage au regard de l'objectif poursuivi.

**A l'issue de ce premier atelier, il a été convenu dans le cadre du projet TRAMARE de réaliser une formation d'initiation à l'outil Graphab et de rédiger des fiches d'aide à l'utilisation de l'outil.**

Après cet atelier, nous avons réalisé une première version de fiches d'aide à l'utilisation du logiciel Graphab qui conseille l'utilisateur sur le type de données à intégrer, les paramètres à renseigner, les analyses à réaliser et la façon d'interpréter les résultats, tout en les mettant en garde sur les conséquences de certains choix dans la modélisation.

---

## Atelier 2 (octobre 2019)

**Objectifs** : Formation d'initiation au logiciel Graphab sur un cas fictif et présentation de la première version des fiches d'aide à l'utilisation du logiciel Graphab.

À la suite de cet atelier, plusieurs remarques ont été apportées sur les fiches et une fiche supplémentaire sur la constitution de la carte d'occupation du sol sous QGIS a été demandée. D'après l'enquête menée auprès des participants, un troisième atelier était souhaité pour appliquer la modélisation des réseaux écologiques sur un cas concret.

## Atelier 3 (février 2020)

**Objectifs** : Réaliser toutes les étapes d'analyse à partir d'un cas concret d'étude : réalisation d'une carte d'occupation du sol, modélisation et analyse des réseaux de mares, interprétation des résultats.

Après recensement des données disponibles et des terrains étudiés par les participants, le choix a été fait de travailler sur le bassin-versant de la Juine et le triton crêté.

## Fiches d'aide à l'utilisation du logiciel Graphab

Cinq fiches synthétiques ont été réalisées sur la modélisation des réseaux écologiques par la théorie des graphes. Elles abordent toutes les étapes, de la construction de la carte de paysage sous QGIS, aux différentes applications possibles en passant par une aide aux choix de paramétrage et à l'interprétation des résultats.

Elles ont été réalisées par l'équipe Graphab et mis en forme par la SNPN. Elles sont accessibles librement sur ResearchGate (<https://www.researchgate.net/project/Graphab-project>) ou sur les liens ci-dessous :

[Fiche0\\_Graphab\\_Utilisation de QGIS](#)

[Fiche1\\_Graphab\\_Introduction](#)

[Fiche2\\_Graphab\\_Construire un graphe](#)

[Fiche3\\_Graphab\\_Métriques](#)

[Fiche4\\_Graphab\\_Applications](#)

## 2. Analyse exploratoire de la base de données sur les mares de la SNPN

| Travail réalisé par Carole Gaber sur la base Mares\_SNPN en date de février 2019.

Le projet TRAMARE s'appuie sur un inventaire des mares réalisé depuis 2010 à l'échelle de la région par la SNPN. Jusqu'en 2013, un travail d'identification et de caractérisation des mares sur le terrain a été effectué. Depuis 2013, le protocole est ouvert à tous les observateurs qui peuvent participer à l'inventaire (Seguin et al., 2013). En 2013, 2015 et 2016, un rapport d'activité a été édité permettant de connaître l'avancement de l'inventaire (Guittet et al., 2015). La notion de mares utilisée par la SNPN est celle la plus généralement adoptée soit « une étendue d'eau de moins de 5000m<sup>2</sup> qui peut être permanente ou temporaire, d'origine naturelle ou anthropique et ayant une faible profondeur » (Sajaloli et Dutilleul, 2001). Cette définition, large, permet d'intégrer des mares d'origine naturelle ou anthropique, aux régimes hydriques variés et associées à des contextes et fonctions diverses (Photo 1).

### Répartition des données selon le statut de la mare

Les mares sont géolocalisées et classées dans une de ces quatre catégories :

- **Mare potentielle (56%)** : mare identifiée à partir d'orthophotographies et/ou de cartes topographiques mais sans vérification terrain
- **Mare vue (17%)** : mare dont la présence a été confirmée par une observation sur le terrain. L'observateur doit a minima renseigner les informations suivantes : Nom de l'observateur ; Date de l'observation ; Localisation précise de la mare ; Contexte de la mare (forêt de feuillus, prairie mésophile ou humide, culture, milieu urbain, etc.).
- **Mare caractérisée (23%)** : mare ayant été vue et ayant fait l'objet d'une description précise à l'aide d'une [fiche de caractérisation fournie par la SNPN](#). Elle permet de juger de l'état de conservation, du stade d'évolution de la mare et des menaces effectives.
- **Mare disparue (3%)** : mare identifiée à partir d'orthophotographies et/ou de cartes topographiques mais qui n'a pas été retrouvée lors de l'observation sur le terrain.

Ce protocole d'inventaire a permis de constituer une base de données conséquente avec 23 065 mares, réparties de manière inégale entre les départements franciliens (Tableau 1 et Figure 2).

Département	Mares potentielles	Mares vues	Mares caractérisées	Mares disparues	Total des données
75	0	82	23	0	105
77	7109	1262	2533	243	11147
78	3149	838	948	206	5141
91	1383	1158	1241	166	3948
92	136	22	64	1	223
93	149	55	56	4	264
94	150	290	138	10	588
95	892	302	417	38	1649
Total	12968	4009	5320	668	23065

Tableau 1 : Répartition des mares en fonction de son statut et du département.

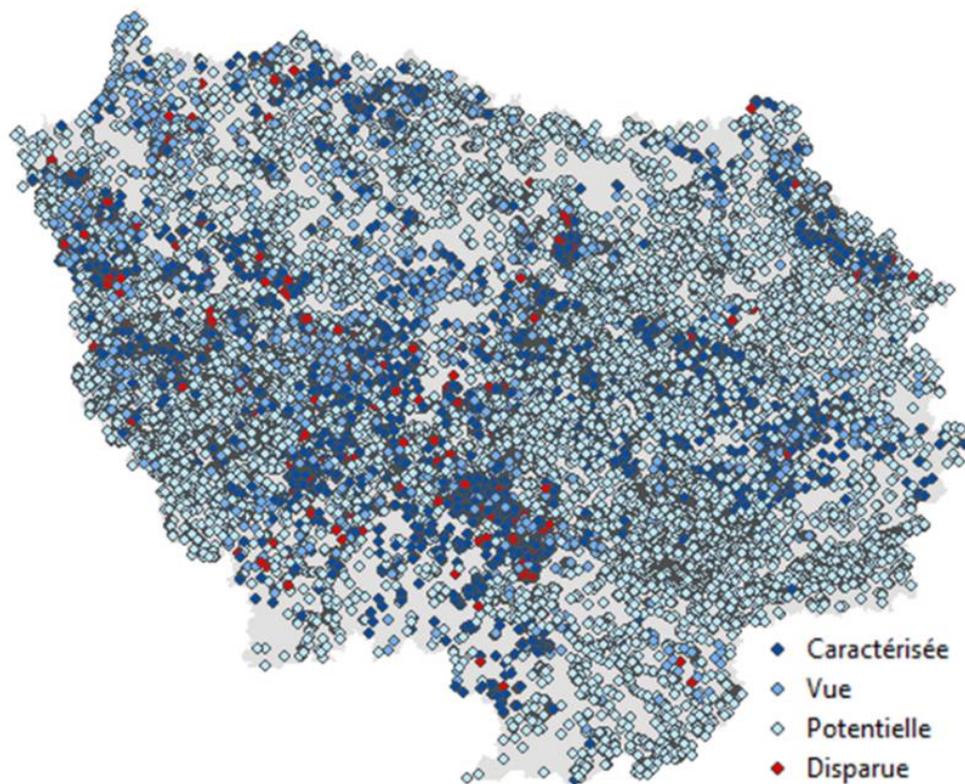


Figure 2 : Localisation des mares de l'inventaire SNPN en fonction du statut de la mare

La comparaison des cartes localisant les mares potentielles et des mares observées sur le terrain (« vue » ou « caractérisée ») révèle un biais d'observation (Figure 3). Si la carte des mares potentielles révèle une répartition relativement homogène sur l'ensemble de l'Île-de-France, la carte des mares observées sur le terrain fait apparaître des zones sous-prospectées, notamment dans les zones très urbanisées du nord de l'Île de France (Val d'Oise) mais aussi dans la Brie champenoise (Seine et Marne), la Vallée de la Seine ou le Bocage gâtinais (sud).

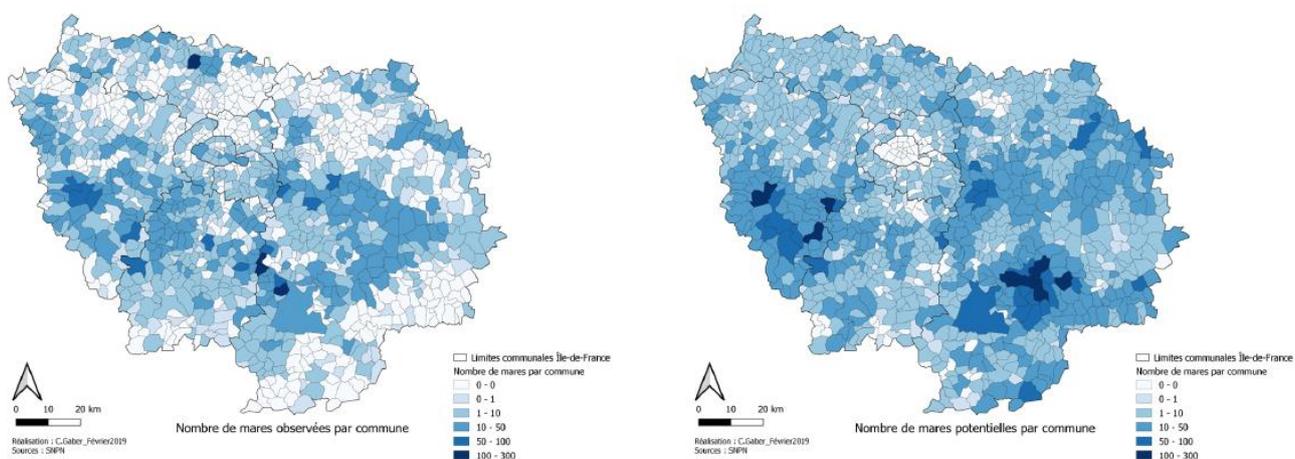


Figure 3 : Carte de répartition des mares « observées » (gauche) et « potentielles » (droite) par commune

## Répartition des données selon les observateurs

On distingue cinq grands types de contributeurs à la base de données (Figure 4) :

- La SNPN (34%, en bleu) dont les observations se répartissent sur l'ensemble de l'Île-de-France
- L'ONF (20%, en jaune) qui a mené plusieurs campagnes de collecte systématique de données sur les secteurs forestiers
- Les associations, dont on note une grande diversité (23) et un nombre variable de données collectées. Les principales contributrices sont ATENA 78, NaturEssonne et l'IASEF (+ 200 mares géolocalisées chacune).
- Les Parcs Naturels Régionaux (PNR) et les Réserves Naturelles (RN) (17% en violet)
- Les conseils départementaux (10%, en gris), notamment celui de la Seine-et-Marne.

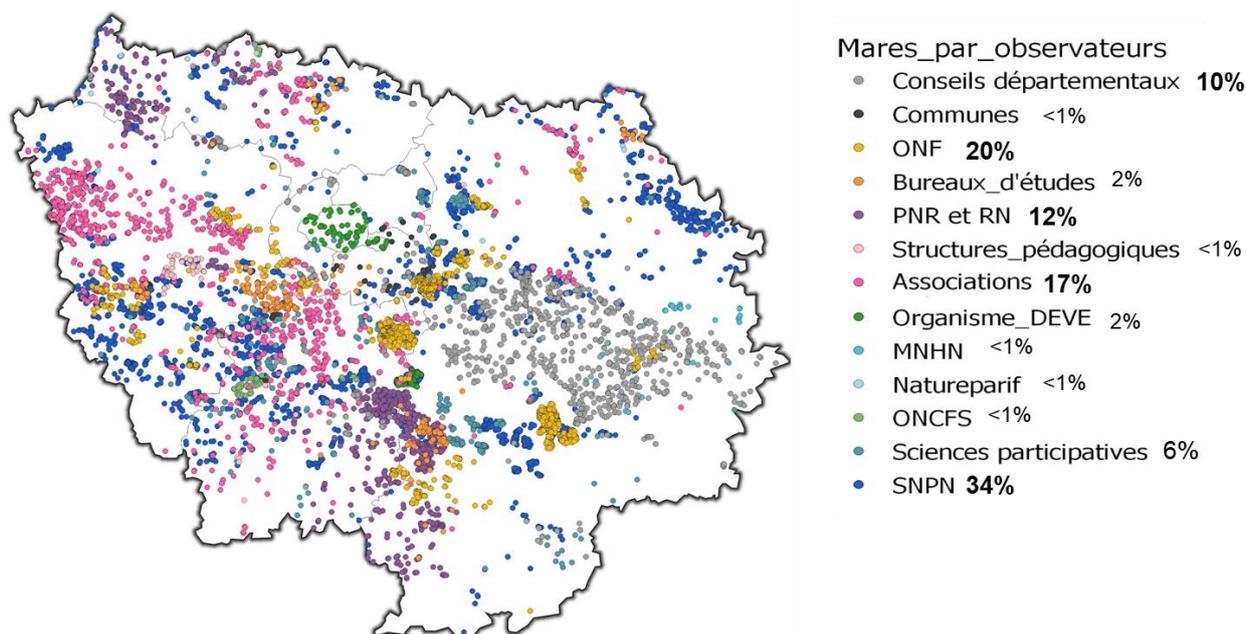


Figure 4 : Répartition des mares observées selon les types d'observateurs

*La répartition inégale des observations à l'échelle de l'Île-de-France, ainsi que la forte proportion de mares potentielles (56%) n'ayant pas fait l'objet de vérification terrain, nous a conduit à réfléchir sur la manière de vérifier l'existence de ces mares de manière systématique.*

## Essai d'un protocole de vérification des mares potentielles

*Cette sous-partie a été réalisée par Arnaud Perrin, étudiant de Master 1 Biologie*

L'objectif de cette étude est de construire et tester un protocole permettant de vérifier l'existence des mares potentielles de façon « automatique » en s'appuyant sur la présence d'espèces végétales caractéristiques des milieux humides.

- **Sous-objectif 1** : Identifier les espèces caractéristiques des milieux humides et aquatiques (appelé dans la suite du texte « espèces ZH ») à partir des bases de données du CBNBP (base Flora, Conservatoire Botanique National du Bassin Parisien) et CETTIA (Base de données naturalistes d'Île-de-France).

- **Sous-objectif 2** : Comparer la répartition des espèces caractéristiques des milieux humides (espèces ZH) et des espèces non caractéristiques autour des mares caractérisées/vues et des mares potentielles.
- **Sous-objectif 3** : Classer les mares potentielles en fonction de leur probabilité d'existence et réaliser des vérifications terrains sur un échantillon de mares pour vérifier leur présence.

### **Sous-objectif 1 – Identifier les espèces caractéristiques des milieux humides**

Les bases de données mobilisées sont la base CETTIA (Agence Régionale de la Biodiversité en Ile de France) et la base Flora (CBNBP).

La base CETTIA recense les observations de faune et de flore issues d'associations naturalistes et d'amateurs et qui alimentent le SINP régional (Système d'Information sur la Nature et les Paysages). Le protocole d'acquisition reposant sur une démarche participative, la couverture spatiale des observations est inégale et les données collectées ne sont pas exhaustives. L'absence d'observation d'espèces caractéristiques des milieux humides autour d'une mare ne signifie ainsi pas forcément que ce type de végétation n'est pas présent sur le terrain, il est possible que l'observateur n'aie pas renseigné toutes les espèces présentes (manque de temps, problème d'identification de la plante, etc.). La base FLORA est construite par le CBNBP et recense les observations de flore issues d'inventaires de terrains effectués par tout type de botanistes et en particulier ceux du réseau des correspondants du Conservatoire.

Les deux bases sont assemblées, et seules les données localisées à moins de 100m des mares sont retenues. Parmi elles, les espèces caractéristiques des milieux humides ont été identifiées à partir de la liste des espèces végétales inféodées aux zones humides identifiées et recensées dans le territoire du Bassin de la Seine par le CBNBP. L'aquaticité des plantes, correspondant au degré d'immersion de celles-ci dans l'eau (de 1 : faiblement immergée à 5 : totalement immergée), y est notifiée pour chaque espèce.

Une liste de 121 espèces de plantes caractéristiques des milieux humides et aquatiques est obtenue, correspondant à 2578 relevés issus de la base FLORA et 2849 de la base CETTIA.

### **Sous-objectif 2 – Comparer la répartition des espèces caractéristiques ou non des milieux humides autour des mares caractérisées/vues et des mares potentielles**

*Hypothèse : les mares caractérisées/vues regrouperaient un pourcentage important des observations correspondant à des espèces caractéristiques des milieux humides et aquatiques. Si cette hypothèse est vérifiée, on peut en déduire que les mares potentielles ayant un pourcentage similaire d'espèces ZH ont une forte probabilité d'exister.*

Pour chaque mare inventoriée par la SNPN (caractérisées/vues ; potentielles), le pourcentage d'observation d'espèces ZH sur le total des observations est analysé.

Sur les 22 985 mares recensées par la SNPN, seulement 6 990 (30%) ont des relevés faunistiques et/ou floristiques dans un voisinage de 100m. Sur ces 6 990 mares, 1018 mares caractérisées/vues et 491 mares potentielles présentent des relevés d'espèces caractéristiques des milieux humides et aquatiques (espèces ZH). La proportion de mares associées à des observations d'espèces ZH est donc très faible par rapport au nombre total de mares de la SNPN (6,5%).

En moyenne, les mares caractérisées/vues ont 65 observations d'espèces, dont 5% d'espèces ZH ; les mares potentielles ont 31 observations d'espèces, dont 2% d'espèces ZH. En reprenant l'hypothèse initiale, on peut alors supposer que les mares potentielles ayant un pourcentage similaire d'espèces ZH à celui des mares caractérisées/vues (soit 5%) ont une forte probabilité d'exister. Cela représente 301 mares sur les 3113 mares potentielles présentant des relevés de flore.

Néanmoins, ces résultats sont à interpréter avec prudence car le pourcentage d'observation d'espèces ZH reste très faible pour la grande majorité des mares, qu'elles soient caractérisées/vues ou potentielles. De plus, le nombre important de valeurs extrêmes correspondant à des mares où de très nombreux relevés de faune et de flore (> 200) ont été effectués peut fausser l'analyse statistique des distributions.

### Sous-objectif 3 – Classer les mares potentielles en fonction de leur probabilité d'existence et réaliser des relevés de terrain

A partir des résultats précédents, une classification en quatre catégories a été établie (Figure 5) :

- 1- Forte probabilité d'existence. Mares contenant beaucoup d'observations faune-flore et ayant un fort pourcentage d'espèces ZH → 37 mares (1,2 %).
- 2- Forte probabilité d'existence. Mares contenant peu d'observations faune-flore mais ayant un fort pourcentage d'espèces ZH → 156 mares (5 %).
- 3- Faible probabilité d'existence. Mares contenant beaucoup d'observations faune-flore mais avec un faible pourcentage d'espèces ZH → 548 mares (17,6 %).
- 4- Faible probabilité d'existence. Mares contenant peu d'observations faune-flore et avec un faible pourcentage d'espèces ZH → 2372 mares (76,2 %).

**Hypothèse : Si pour un échantillon réduit, les relevés de terrain confirment la présence ou l'absence de la mare potentielle en fonction de la catégorie concernée, les résultats peuvent être généralisés à l'ensemble des mares de la catégorie.**

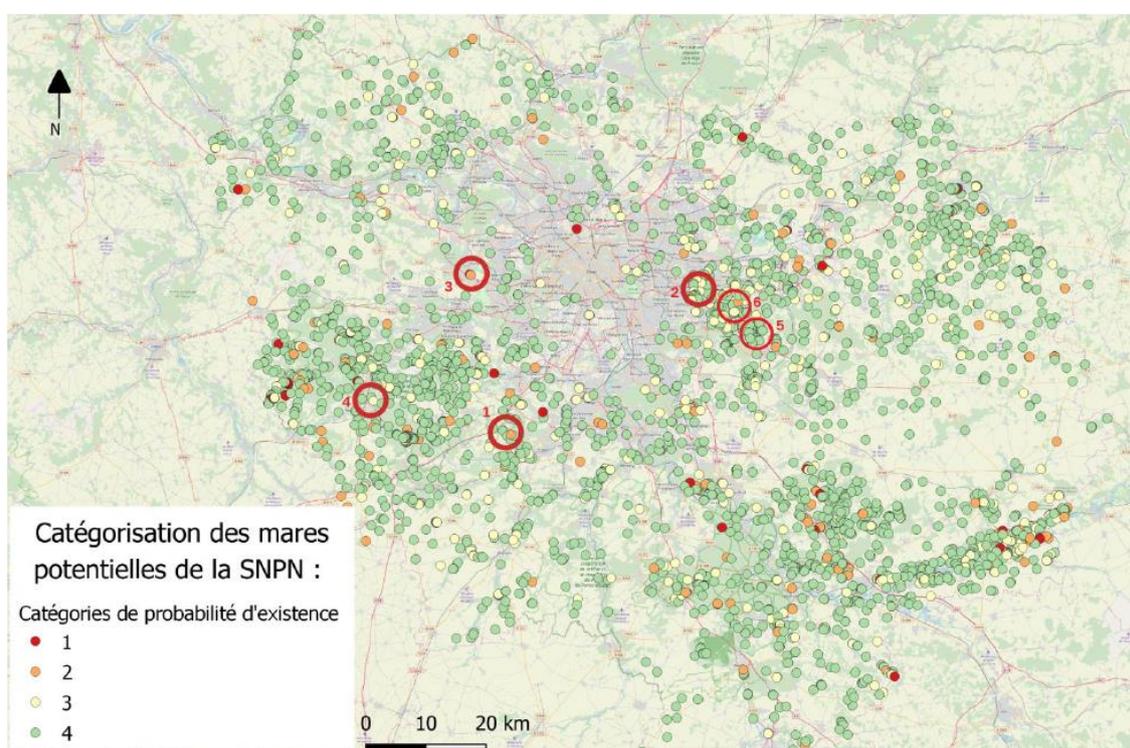


Figure 5 : Répartition des différentes catégories de mares potentielles en fonction de leur probabilité d'existence, et secteurs de vérification terrain

La vérification de la présence des mares potentielles ciblées s'est faite en partenariat avec la SNPN en 3 phases de prospection : la première le 27 mars 2019 à Breuillet Village (cercle 1) ; la seconde du 8 au 10 avril à Noisy-le-Grand (2), Noisy-le-Roi (3) et Le Perray (4) ; la dernière le 23 et 24 avril à Ozoir-la-Ferrière et Roissy-en-Brie (5 et 6).

Sur les 34 mares potentielles prospectées, seules deux mares n'ont pas été validées (Tableau 2). Ces deux mares appartiennent à la catégorie « 4 », c'est-à-dire avec la plus faible probabilité de présence. L'une de des mares potentielles était finalement un bassin de rétention, non considéré comme une mare par la SNPN (Photo 1 gauche). La seconde avait complètement disparue et remplacée par des surfaces artificialisées. Il est à noter que les mares temporaires, asséchées au moment de la prospection, ont été considérées comme présentes par les experts de la SNPN (Photo 1 droite).



Photo 1 : Bassin de rétention localisé comme « mare potentielle » (gauche) ; Exemple d'une mare temporairement asséchée les jours de prospection (droite). Source : A. Perrin

Lieux	Mare de Catégorie 1	Mare de Catégorie 2	Mare de Catégorie 3	Mare de Catégorie 4	Total de Mares
1 : Breuillet Village		3/3		4/4	7/7
2 : Noisy-le-Grand, Bois St-Martin		1/1	1/1	8/9	10/11
3 : Noisy-le-Roi	1/1	1/1			2/2
4 : Le Perray, La Bichonnerie	2/2	1/1	1/1	5/6	9/10
5 : Roissy-en-Brie			4/4		4/4
	<b>3/3 100 %</b>	<b>6/6 100 %</b>	<b>6/6 100 %</b>	<b>17/19 89,4 %</b>	<b>32/34 94,1 %</b>

Tableau 2 : Résultats de la prospection des mares potentielles effectuée au printemps 2019

*Les résultats semblent indiquer que les mares des catégories 1, 2 et 3 ont de très fortes probabilités d'exister. Néanmoins, le nombre de mares prospectées étant faible, la fiabilité des résultats est incertaine. La poursuite de ces vérifications serait donc utile bien que le nombre de mares ayant des observations flore est faible (3113 sur 22 985 mares potentielles). Par conséquent, ce protocole permettrait de valider au maximum la présence de 3113 mares potentielles.*

### 3. Préparation des données paysagères et écologiques

*Travail réalisé par Carole Gaber dans le cadre de son alternance à ARP-Astrance*

#### Constitution de la carte de paysage de l'Île-de-France

La modélisation des réseaux écologiques s'appuie classiquement sur une carte de paysage, représentant l'habitat ainsi que les éléments paysagers favorables ou défavorables aux déplacements de l'espèce ou du groupe d'espèces étudiés.

Dans le cadre du projet TRAMARE, plusieurs bases de données ont été mobilisées pour construire cette carte :

- Le Mode d'Occupation du Sol (MOS), un inventaire numérique de l'occupation des sols en ÎdF, mis à jour en 2017. Il est élaboré à partir de photographies aériennes d'une résolution de 15 cm par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme. Les 81 catégories initiales ont été regroupées en une quinzaine de catégories en fonction de leur degré de perméabilité vis-à-vis des espèces cibles (Annexe 1).
- La BDTOPO de l'IGN pour le réseau routier distinguant les routes principales (nationales et autoroutes) et les routes départementales et pour les surfaces en eau. Un tri a été effectué pour distinguer les surfaces d'eau stagnante et les cours d'eau libre. De même, certains éléments ont été supprimés comme les tronçons de cours d'eau enterrés ou surélevés.
- La base de données des mares de la SNPN contenant les mares potentielles, vues et caractérisées. Ces données étant sous forme de points géolocalisés, nous n'avons pas d'information sur la surface de chaque mare. Nous considérons donc ici que toutes les mares ont la même surface. Les mares ont été classées en plusieurs catégories en fonction du contexte paysager (milieux ouverts ; milieux forestiers ; etc.).
- A noter, la base ECOMOS qui cartographie de manière détaillée les milieux naturels en Île-de-France, n'a pas été mobilisée en raison du décalage temporel trop grand des données (2008, contre 2017 pour le MOS).

*L'ajout des éléments linéaires présents dans les bases BDTOPO ou BDCARTO de l'IGN est essentielle car ces éléments sont relativement mal représentés dans le MOS (Figure 6).*



Figure 6 : Exemple de milieux mal représentés dans le MOS (routes secondaires, rivières)

Les différentes catégories paysagères sont ensuite combinées en respectant un ordre de superposition cohérent avec l'écologie de l'espèce (cf. Fiche0\_Graphab\_Utilisation de QGIS pour plus de détails). La

résolution spatiale choisie (10 m) est un compromis entre les temps de calcul à l'échelle régionale et la nécessité de représenter des éléments paysagers relativement fins (Figure 7).



Figure 7 : Extrait de la carte de paysage initiale et finale après ajout des éléments linéaires

## Définition de huit profils d'espèces inféodées aux mares

Dans le cadre du projet TRAMARE, plusieurs profils d'espèces ont été construits de manière à couvrir un large spectre de la biodiversité : degré de spécialisation varié (généralistes ou spécialistes) ; exigences écologiques différentes pour l'habitat de reproduction (mares forestières ou mares de milieux ouverts), capacités de déplacements journaliers et annuels (dispersion) variées ainsi qu'un nombre de points de présence suffisant pour que les modèles soient robustes. Les données de présence ont été extraites de la base naturaliste régionale CETTIA regroupant à la fois des données protocolées provenant d'inventaires et des données participatives. Une revue de la littérature et des études antérieures<sup>1</sup> ont permis d'identifier les caractéristiques écologiques des espèces en termes d'habitats aquatiques et terrestres, de milieux favorables ou défavorables aux déplacements et de capacité de déplacement journalier et annuel (Sahraoui et al. 2017 ; Gaber 2019).

Selon ces différents critères, huit profils d'espèces ont été définis (Tableau 3), chacun étant illustré par une espèce correspondant à la description du profil : sept d'amphibiens (Alyte accoucheur *Alytes obstetricans* ; Crapaud commun *Bufo bufo* ; Crapaud calamite *Epidalea calamita* ; Triton crêté *Triturus cristatus* ; Rainette arboricole *Hyla arborea* ; Grenouille rousse *Rana temporaria* ; Salamandre tachetée *Salamandra salamandra*) et un reptile (Couleuvre à collier *Natrix natrix*).

Pour chacun des profils, les différentes catégories de la carte de paysage ont été classées en fonction de leur degré de résistance aux déplacements. Ces valeurs de résistance sont définies selon une échelle logarithmique : 1 pour l'habitat ; 10 pour les milieux très favorables aux déplacements ; 100 pour les milieux neutres ; 1000 pour les milieux défavorables et 10 000 pour un milieu infranchissable (Tableau 4). Ce tableau a été soumis à plusieurs experts en herpétologie (Ligue de Protection des Oiseaux AURA-Isère, Société Herpétologique de France). Cette consultation pour relecture, sans modifier de manière conséquente les valeurs attribuées, a permis de les ajuster plus finement pour tenir compte des spécificités locales. Les experts ont également souligné que les distances de dispersion citées dans la littérature étaient souvent sous-estimées.

<sup>1</sup> La liste des espèces de cohérence de Trame Verte et Bleue (Sordello et al. 2011 ; Le SRCE d'île de France (2013). Tome 1 : Les composantes de la Trame Verte et Bleue ; La déclinaison régionale du Plan National d'Actions en faveur des odonates (Houard et al. 2013) ; Ouvrages naturalistes (Bensettiti & Gaudillat, 2004 ; Lescure & Massary, 2012 ; Grand et al., 2014) ; Les fiches synthèses bibliographiques sur les traits de vie de différentes espèces disponibles sur le site de l'INPN ; Base de données d'observations CETTIA

Profil d'espèces	Type d'habitat	Exemple d'espèces	Nombre d'observations CETTIA	Distance journalier	Distance dispersion maximale
Espèces dépendantes d'un réseau de mares (habitats variés)	Mares	Rainette arboricole <i>Hyla arborea</i>	372	500 m	4000 m
Espèces forestières de faible densité, arbustes, prairies	Mares forestières	Couleuvre à collier <i>Natrix natrix</i>	750	200 m	3000 m
		Grenouille rousse <i>Rana temporaria</i>	1038	200 m	9000 m
Espèces forestières	Mares forestières	Salamandre tachetée <i>Salamandra salamandra</i>	130	50 m	100 m
Espèces pouvant utiliser de grands plans d'eau comme habitat	Mares et toutes les surfaces en eau	Crapaud commun <i>Bufo bufo</i>	9608	200 m	2500 m
Espèces des milieux ouverts, spécialistes des milieux temporaires. Tolérants aux environnements artificiels (carrière, sablière)	Mares, excepté celles en cœur de forêt	Crapaud calamite <i>Epidalea calamita</i>	322	200 m	2500 m
Espèces de milieu ouvert, tolérantes des milieux urbains		Alyte accoucheur <i>Alytes obstetricans</i>	413	100 m	150 m
Espèces de milieux ouverts et milieux arbustifs dépendantes d'un réseau de mares denses		Triton crêté <i>Triturus cristatus</i>	485	100 m	1000 m

Tableau 3 : Liste des huit profils d'espèces inféodées aux mares retenus dans le projet TRAMARE

Profils	Lisière forestière	Forêt	Arbustif	Prairie	Culture	Carrière	Espace vert urbain	Milieu artificiel	Route principale	Route secondaire	Bâti	Rivière	Etangs	Fleuve	Mare
<i>Alytes obstetricans</i>	10	100	10	10	100	10	10	100	10000	1000	10000	10	10	100	1
<i>Bufo bufo</i>	10	10	10	100	100	1000	100	100	10000	1000	10000	100	1	1000	1
<i>Epidalea calamita</i>	100	1000	10	10	100	10	100	100	10000	1000	10000	10	10	100	1
<i>Hyla arborea</i>	10	100	10	10	1000	1000	100	1000	10000	1000	10000	10	10	100	1
<i>Natrix natrix</i>	10	100	10	10	1000	100	1000	1000	10000	1000	10000	10	1	100	1
<i>Rana temporaria</i>	10	10	10	10	100	100	100	10	10000	100	10000	10	1	1000	1
<i>Salamandra salamandra</i>	10	10	100	100	1000	1000	100	1000	10000	1000	10000	10	10	100	1
<i>Triturus cristatus</i>	10	10	10	10	1000	100	100	100	10000	1000	10000	10	10	1000	1

Tableau 4 : Valeurs de résistance associées à chaque catégorie de la carte de paysage de l'Île-de-France pour chaque profil d'espèces

## 4. Modélisation des réseaux de mares

Travail réalisé par Claire Godet dans le cadre de son contrat d'Ingénieur d'études

Les modèles de réseaux écologiques peuvent être construits de différentes manières selon les données biologiques disponibles et les choix de paramétrage (Foltête et al., 2020). Nous avons fait le choix ici d'explorer la variabilité des résultats en fonction de trois méthodes de construction des graphes paysagers :

- 1) A partir d'une carte de paysage pour délimiter les taches d'habitat et calculer les chemins de moindre-coût (LM, dans la figure 8)
- 2) A partir d'un modèle prédictif d'habitat croisant données d'occurrence et variables environnementales pour délimiter les taches d'habitat et calculer les chemins de moindre-coût (HSM)
- 3) A partir d'une combinaison des deux méthodes précédentes : le modèle prédictif d'habitat pour délimiter les taches d'habitat et la carte de paysage pour calculer les chemins de moindre-coût (HSM\_LM)

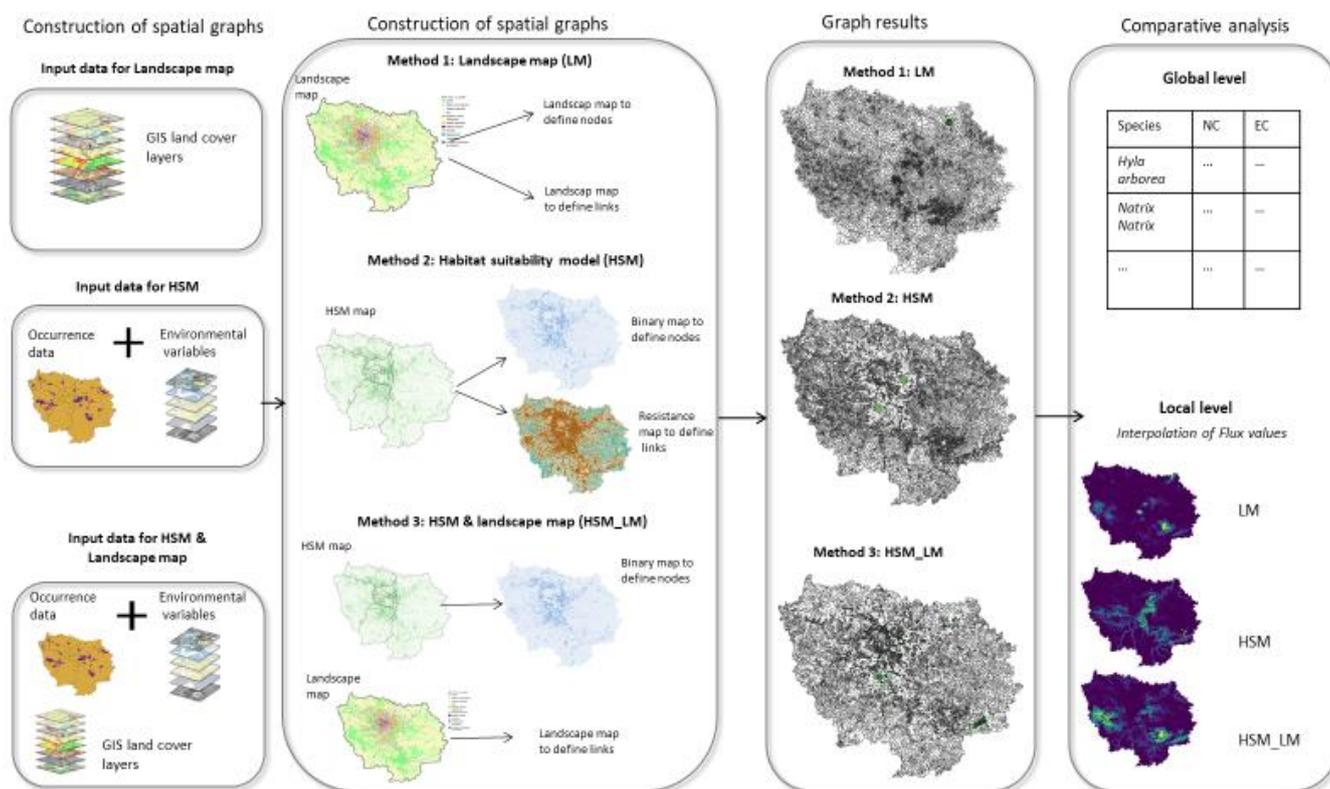


Figure 8 : Protocole méthodologique de comparaison des 3 méthodes de construction des graphes paysagers

### Méthode 1 : Carte du paysage (LM)

Cette méthode est largement utilisée pour construire les graphes paysagers et ne requiert pas nécessairement de données biologiques (Galpern et al. 2011). À partir de la carte de paysage, les taches d'habitat optimal pour les espèces étudiées sont sélectionnées pour définir les nœuds dans le graphe. Dans notre étude, nous avons sélectionné différentes catégories de mares en fonction des préférences de chaque profil d'espèces (Tableau 3). Les mares provenant de données ponctuelles issues de la base SNPN, elles ont toutes la même superficie (un pixel de 100m<sup>2</sup>). La qualité des taches d'habitat a été définie comme la surface de milieux terrestres favorables dans un voisinage quotidien autour des mares (Clauzel et al. 2013 ; Sahraoui et al. 2017). Les liens entre les mares

ont été calculés en distance-coût pour tenir compte de la perméabilité du paysage, et seuls ceux dont la distance est inférieure à la distance de dispersion du profil d'espèces sont conservés.

## Méthode 2 : Modèle prédictif d'habitat (HSM)

Fondée sur le concept de la « niche écologique », le modèle prédictif d'habitat consiste à mettre en relation les données de présence d'une espèce avec un ensemble de variables environnementales susceptibles de jouer un rôle sur sa présence. Le modèle prédictif renseigne sur la force et la contribution de chacune de ces variables environnementales dans l'explication de la variation de la réponse biologique. Il généralise ensuite cette relation à l'ensemble de la zone d'étude pour produire une carte de la distribution potentielle de l'espèce en fonction de la distribution des valeurs des variables environnementales significatives. Cette carte de probabilité de présence est ensuite catégorisée en habitat/non habitat en ne retenant que les plus fortes valeurs de probabilité de présence pour délimiter l'habitat optimal. Les valeurs dans la catégorie « non habitat » sont ensuite utilisées pour paramétrer les valeurs de résistance aux déplacements.

### Construction du modèle prédictif d'habitat

A partir d'une revue de littérature, 23 variables environnementales susceptibles de jouer un rôle sur la distribution de chaque espèce ont été définies (Tableau 5).

Catégorie	Variable	Résolution	Source
Bioclimatique	NDVI	30 m	Landsat 8 (layers band 5 et band 4) NDVI = (NIR - R)/(NIR+R) August 2019
	Températures	250 m	BIOCLIM dérivée de MODIS LST
	Précipitations	1 km	Chelsea (Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas)
Topographique	Pente	25 m	Modèle numérique de terrain
	Rugosité	25 m	
Composition paysagère dans 3 tailles de buffer (50 m; 190 m; 490 m)	Forêt	10 m	Carte de paysage
	Prairie	10 m	
	Carrière	10 m	
	Eau	10 m	
	Zone artificialisée	10 m	
Proximité	Distance à la route la plus proche	10 m	
	Distance à la rivière la plus proche	10 m	
	Distance à la mare la plus proche	10 m	

Tableau 5 : Liste des 23 variables environnementales testées dans les modèles prédictifs d'habitat

Nous avons utilisé le logiciel libre MaxEnt 3.4.2 (Phillips et al. 2017) basé sur le principe du maximum d'entropie en conservant les paramètres par défaut. La robustesse de chaque modèle a été examinée par une validation croisée.

***Le détail des variables environnementales les plus contributives à la présence de chaque espèce est présenté en Annexe 2.***

### Résultat du modèle prédictif d'habitat

Une carte prédictive d'habitat a été générée pour chaque espèce à l'échelle de l'Ile-de-France (Figure 9), avec des valeurs échelonnées de 0 (probabilité nulle de présence) à 1 (probabilité maximale de présence). Compte tenu des réponses différentes des variables en fonction des espèces, les cartes de probabilité de présence sont chacune très différentes. Avant même de les intégrer dans la modélisation des réseaux écologiques, elles fournissent un diagnostic intéressant sur les potentialités d'habitat de chacune des espèces étudiées ainsi que sur les habitats multi-espèces. La proportion de la région Ile-de-France occupée par des taches d'habitat varie selon les espèces, entre 0,55% pour la salamandre tachetée et 15,30% pour la grenouille rousse. La combinaison des

huit cartes d'habitat (Figure 10) révèle que 68% de la région ne contient pas d'habitat potentiel (principalement les zones urbaines et les terres d'agriculture intensive). Seulement 7% (846 km<sup>2</sup>) de la région correspond à des habitats communs à plus de 4 espèces, ce qui est logique compte tenu des exigences écologiques variées des 8 espèces retenues. Ces zones sont caractérisées par une forte densité de plans d'eau (étangs, rivières et zones humides), situées dans quelques massifs forestiers (Figure 10a), ou dans des vallées fluviales telles que la vallée de la Seine dans le sud-est (Figure 10b).

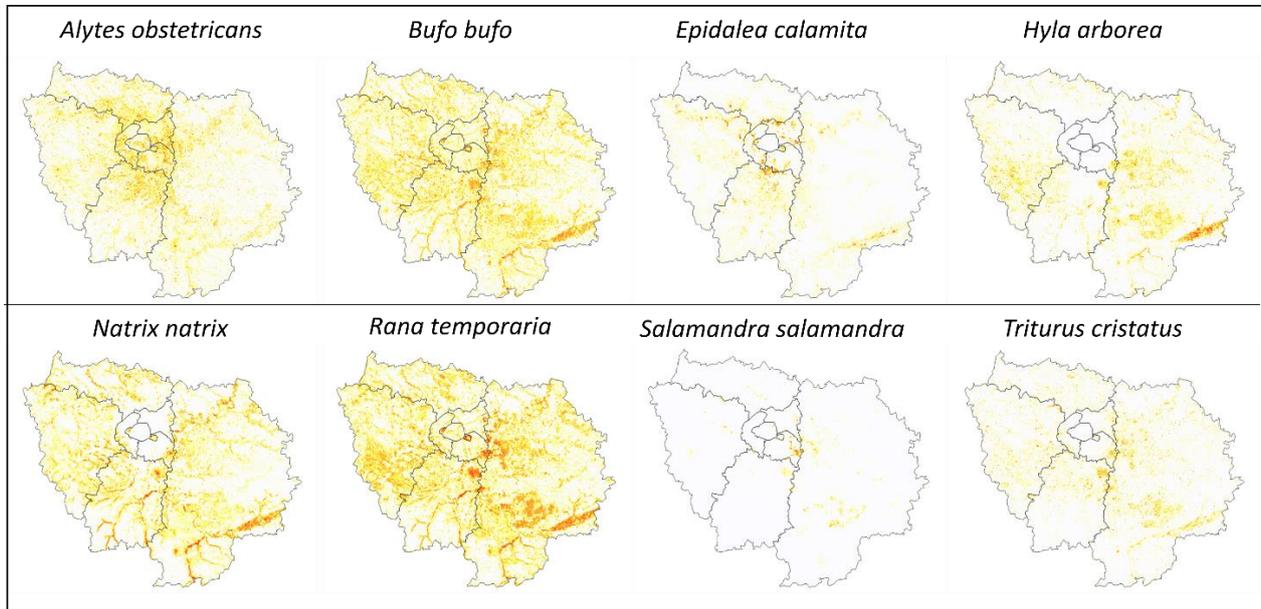


Figure 9 : Carte prédictive d'habitat pour chaque espèce, allant du blanc (probabilité nulle de présence) à rouge (probabilité maximale)

Cette carte de valeurs continues est transformée en carte binaire - habitat/non habitat - en ne retenant comme habitat que les valeurs les plus fortes de probabilité de présence. La valeur seuil utilisée (à partir de quelle probabilité le pixel est considéré comme habitat pour l'espèce ?) peut être définie de différentes manières mais est toujours spécifique à l'espèce. Après avoir comparé 13 méthodes, Liu et al. (2013) ont montré que la valeur maximisant la sensibilité et la spécificité (max SSS) produisait des résultats cohérents quelque que soient les données utilisées. Nous avons donc choisi ce critère pour déterminer sur chaque carte, l'habitat optimal de l'espèce.

### Du modèle prédictif d'habitat aux graphes paysagers

Pour chaque profil d'espèces, la carte binaire d'habitat a été utilisée pour définir les taches d'habitat optimal qui deviendront les nœuds dans le graphe paysager. À la différence de l'approche précédente utilisant une carte de paysage, les taches d'habitat ne correspondent pas forcément à l'emprise stricte d'une mare mais peuvent intégrer d'autres milieux, ceux qui réunissent les variables environnementales considérées comme les plus contributives dans l'explication de la présence de l'espèce. La qualité de ces taches d'habitat « composite » a été définie comme la surface de la tache pondérée par la valeur moyenne de qualité d'habitat issu du modèle prédictif à l'intérieur de cette tache (Dufлот et al. 2018).

Le calcul des liens en distance-coût s'appuie sur des valeurs de résistance définies comme l'inverse des valeurs de qualité d'habitat du modèle prédictif : les fortes valeurs de probabilité de présence (hors habitat) sont considérées comme très favorables aux déplacements et ont une valeur de résistance faible, et inversement. Une fonction exponentielle négative a été appliquée pour transformer les valeurs de qualité d'habitat en valeurs de résistance aux déplacements (Keeley et al. 2016 ; Dufлот et al. 2018). Cette fonction a attribué une valeur de résistance de 10 000 lorsque la probabilité de présence était nulle ; et 1 lorsque cette probabilité était supérieure ou égale au seuil définissant l'habitat. La forme exponentielle de la transformation renforce l'effet barrière des zones défavorables.

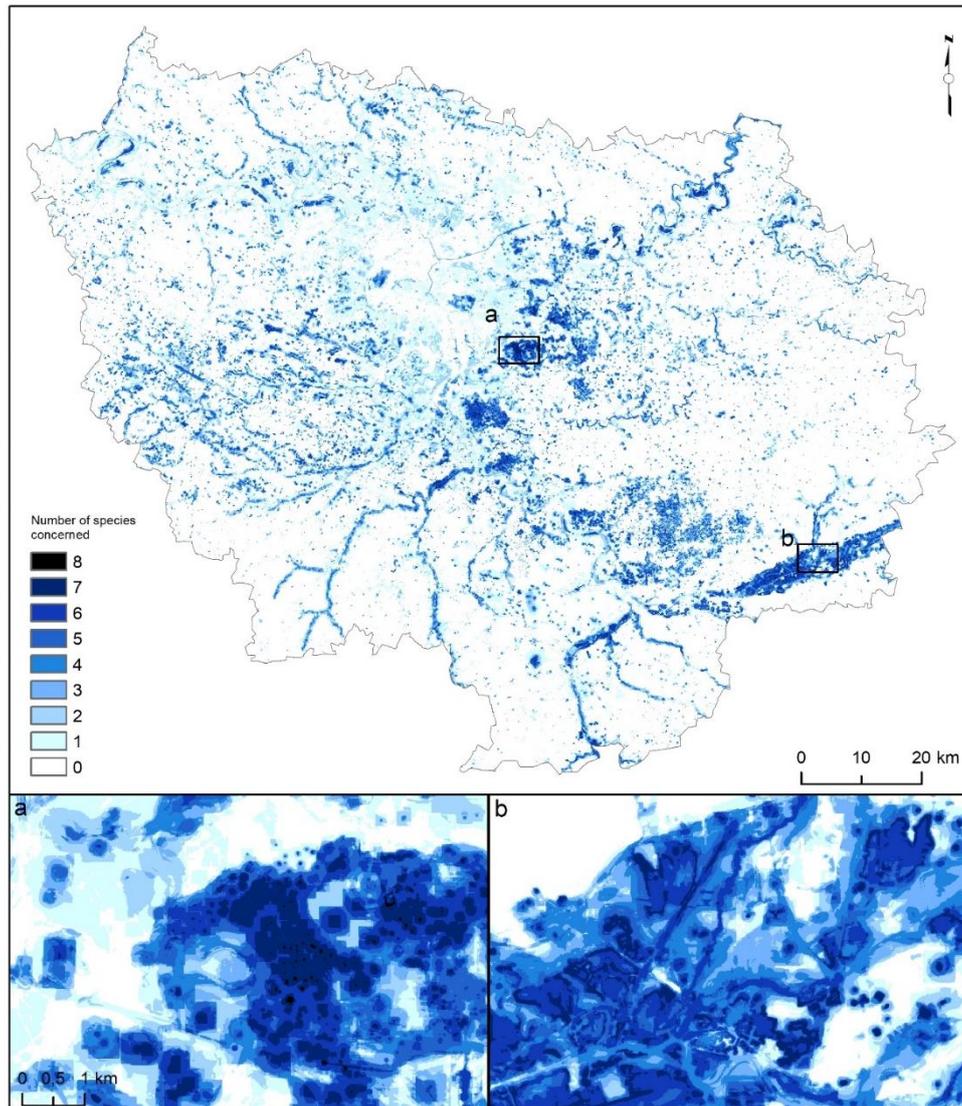


Figure 10 : Combinaison des 8 cartes binaires d'habitat issues des modèles prédictifs. L'intensité de la couleur indique un nombre croissant d'espèces partageant un habitat commun.

### Méthode 3 : Modèle combiné (HSM\_LM)

Cette méthode combine les deux précédentes. Les taches d'habitat (nœuds du graphe) et leurs qualités sont définies à partir des modèles prédictifs, puis superposées à la carte du paysage précédemment créée (voir méthode 1) pour constituer une nouvelle catégorie. Les liens entre les taches d'habitat ont été calculés à partir des valeurs de résistance attribuées à chaque catégorie de la carte du paysage.

Cette combinaison permet de pallier certaines limites inhérentes à chacune des méthodes. D'une part, la délimitation des taches d'habitat à partir de modèles prédictifs permet d'intégrer les données biologiques dans la construction du modèle (Foltête et al. 2020) et d'être donc plus « réaliste » qu'une simple approche paysagère. D'autre part, dériver les valeurs de résistance aux déplacements d'un modèle prédictif d'habitat conduit à mélanger deux processus écologiques, la sélection d'habitat et le mouvement. Un tel choix suppose que le choix de déplacement à travers le paysage suit des facteurs similaires à la sélection de l'habitat, ce qui n'est pas toujours vrai (Zeller et al. 2012 ; Ziolkowska et al. 2012). Utiliser les connaissances sur l'écologie de l'espèce issues souvent d'expérimentations *in situ* (marquage-recapture ou radio-traçage) pour attribuer les valeurs de résistance semble donc une alternative pertinente.

---

## Comparaison des 3 méthodes

### Protocole d'analyse

Les étapes précédentes ont conduit à la construction de trois graphes paysagers pour chaque espèce, représentant leur réseau écologique potentiel. Les graphes résultants et leurs valeurs de connectivité ont été comparés à différentes échelles. Parmi les nombreuses mesures de connectivité disponibles dans la théorie des graphes (Galpern et al. 2011), nous avons sélectionné deux mesures de connectivité globale (à l'échelle de l'ensemble du graphe) et une mesure de connectivité locale (à l'échelle des nœuds).

- (1) Une métrique topologique : le nombre de composantes (NC). Une composante (c'est-à-dire une sous-partie du graphe) correspond à l'espace dans lequel l'espèce peut se déplacer sans rencontrer de barrières. La limite entre deux composantes indique que l'espèce située dans une composante ne peut pas atteindre une autre composante parce que la distance est trop longue et/ou trop coûteuse. C'est un indicateur simple du niveau de fragmentation du réseau (plus le nombre de composantes est élevée, plus le réseau est fragmenté).
- (2) Une métrique pondérée : la Connectivité équivalente (EC). L'EC est dérivée de l'indice de probabilité de connectivité (PC ; Saura et Pascual-Hortal 2007), correspondant à la probabilité que deux individus tirés au hasard dans la zone d'étude puissent entrer en contact, soit parce qu'ils sont localisés dans la même tache d'habitat, soit parce qu'ils sont dans deux taches connectées. L'EC est ainsi défini comme « la quantité d'habitat accessible » et intègre à la fois la surface d'habitat et l'intensité des connexions entre les taches d'habitat. La métrique est pondérée par la qualité des taches d'habitat et la distance des liens.

Les valeurs de NC et EC ont été comparées en faisant varier la distance de dispersion utilisée pour élaguer le graphe dans le cas de NC et pour pondérer la métrique EC.

- (3) Une métrique locale pondérée : Flux (F), qui est un indicateur de la dispersion potentielle d'une tache d'habitat ou inversement vers cette tache (Urban et Keitt 2001 ; Saura et Torné 2009).

Comme la distribution spatiale des nœuds de chaque graphe pour une même espèce peut être différente entre la méthode 1 et les deux autres, les valeurs de Flux ont été interpolées et normalisées pour faciliter la comparaison visuelle de la connectivité locale entre les méthodes et entre les espèces.

### Résultats

Pour la plupart des espèces, la méthode 2 (modèle prédictif d'habitat) génère moins de composantes et un niveau de connectivité globale plus élevée que les deux autres (annexe 3). Cela est probablement liée à une plus grande surface d'habitat, entre 100 % et 150 % plus élevée que dans la méthode 1. Non seulement la quantité totale d'habitat est plus importante, mais les taches, plus nombreuses et plus larges, sont également mieux connectées les unes aux autres.

L'interpolation des valeurs de la métrique Flux permet de comparer la répartition spatiale des zones de plus forte connectivité entre les méthodes et pour chaque espèce. On note une très grande variabilité des résultats entre les 3 méthodes (Figure 11). D'une manière générale, la méthode 1 (carte de paysage) génère des potentiels plus faibles et moins nombreux de connectivité, que les deux autres. À l'inverse, la méthode 2 présente le potentiel de connectivité le plus élevé. La méthode combinée (3) semble être intermédiaire. Si les "points chauds" de connectivité (c'est-à-dire les zones de connectivité les plus élevées, en jaune) se trouvent à peu près aux mêmes endroits entre les trois méthodes, les zones de connectivité moyenne (en vert), souvent de forme linéaire (vallées) ou compacte (forêt) apparaissent beaucoup plus dans la méthode 2.

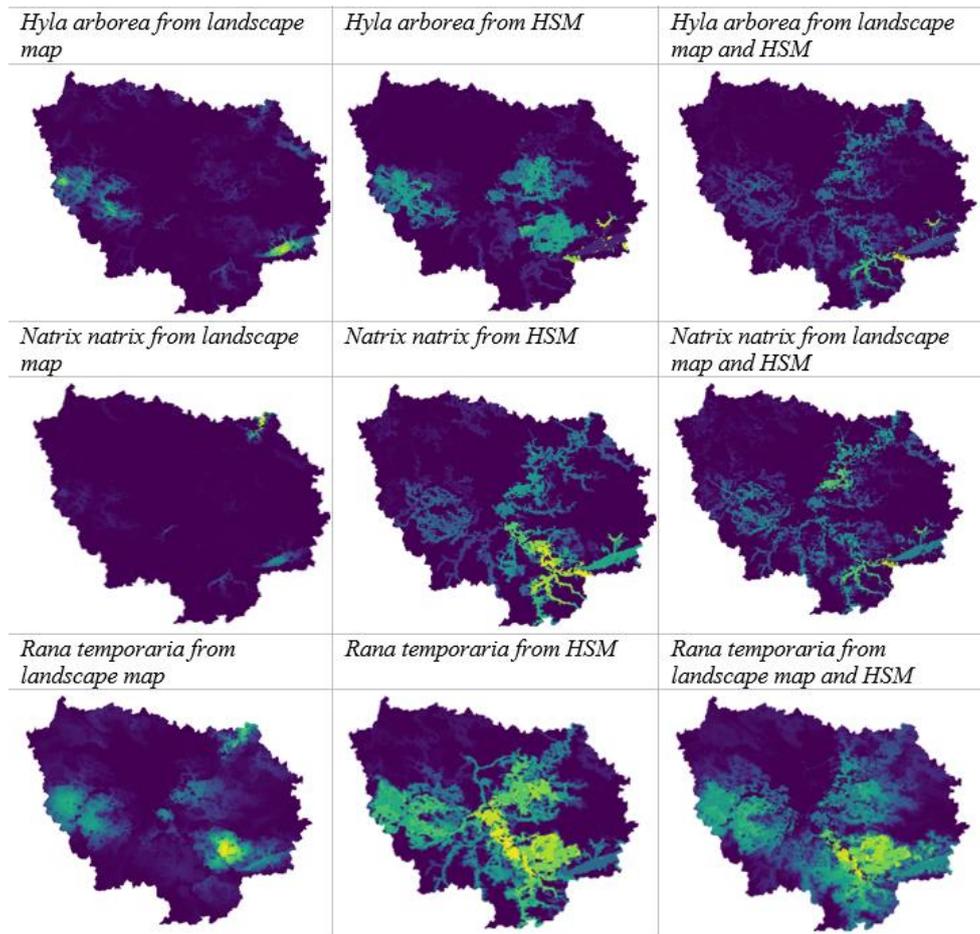


Figure 11 : Potentiel de connectivité résultant d'une interpolation des valeurs locales de Flux. Les valeurs ont été standardisées de 0 (connectivité nulle, en violet) à 1 (connectivité forte, en jaune). Extrait de 3 espèces.

Malgré ces différences, les trois méthodes mettent en évidence des zones similaires de faible connectivité, en raison de l'absence d'habitat ou de la présence de milieux défavorables. Ces zones se localisent principalement dans la partie nord-ouest (très urbanisée) et l'est (très agricole) de l'Île-de-France ainsi que dans le centre (ville de Paris).

***Cette grande variabilité dans l'identification des zones de forte connectivité souligne l'importance de tenir compte de l'incertitude inhérente à tout modèle. Il est ainsi recommandé de mener des analyses de sensibilité en faisant varier les paramètres et de se focaliser sur les résultats convergents en cas de préconisations opérationnelles.***

## 5. Recherche des meilleurs emplacements pour la création de mares

*Travail réalisé par Claire Godet dans le cadre de son contrat d'Ingénieur d'études*

A partir des graphes paysagers construits selon la méthode 3 combinant modèle prédictif d'habitat et carte de paysage, nous avons cherché à identifier les meilleurs emplacements pour la création de nouvelles mares, c'est-à-dire ceux qui augmenteraient potentiellement le plus la connectivité. Réalisée pour chacune des 8 espèces, les résultats sont ensuite combinés pour tenter d'identifier les emplacements qui permettraient de bénéficier à un maximum d'espèces.

Pour réduire les temps de calcul, et parce qu'une telle analyse n'est pas forcément pertinente à l'échelle de l'ensemble de l'Île-de-France, nous avons appliqué le protocole à une sous-partie de 150 km<sup>2</sup> sur une grille de 15 093 points régulièrement espacés de 100 m. Cette zone (Figure 12) est localisée au sud-ouest de Paris entre Bois d'Arcy et Palaiseau et englobe le plateau de Saclay, la forêt domaniale de Versailles au nord et une partie de la vallée de la Chevreuse au Sud.

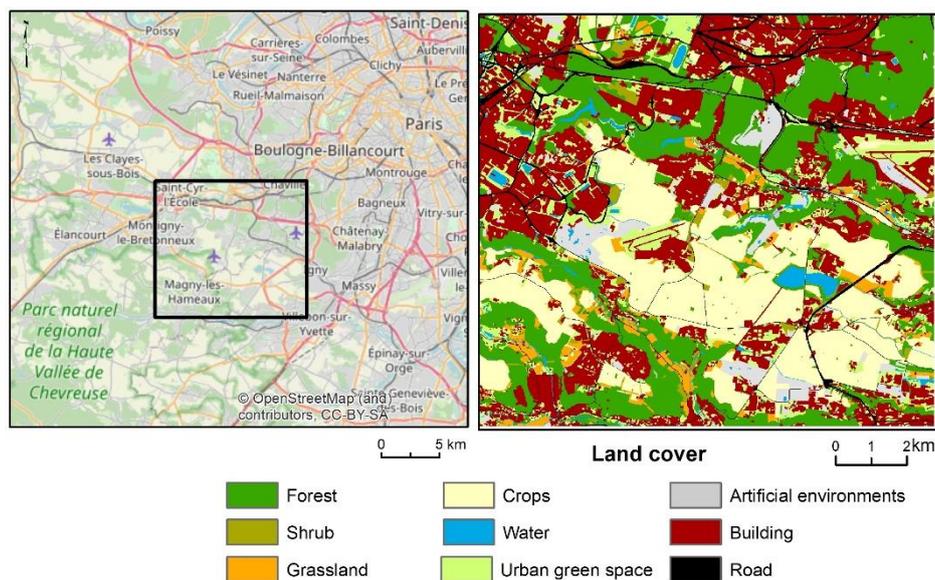


Figure 12. Zone d'étude pour la recherche des meilleurs emplacements pour de nouvelles mares

### Analyse par espèce

#### Protocole méthodologique

A partir du graphe élagué à la distance de dispersion de chaque espèce, nous avons appliqué la méthode proposée par Foltête et al. (2014) et déjà testée par Clauzel et al. (2015) et Mimet et al. (2016). Elle consiste à (1) calculer une métrique globale quantifiant la connectivité initiale du réseau, (2) appliquer une grille d'échantillonnage d'une résolution donnée à la zone d'étude, puis (3) évaluer la contribution potentielle de chaque cellule en quantifiant l'augmentation de la connectivité apportée par l'ajout d'un nouveau nœud et des nouveaux liens entre ce nœud et les autres nœuds existants. Après avoir testé toutes les cellules, l'algorithme valide celle pour laquelle l'ajout d'un nœud produit la plus forte augmentation de la métrique de connectivité. Nous avons choisi la métrique EC (connectivité équivalente) de Saura et al. (2011).

#### Résultats

L'analyse des réseaux écologiques avant le processus d'ajout de taches révèle de fortes différences de connectivité entre les espèces (Tableau 6 et Figure 13). Les réseaux écologiques du crapaud commun, de la grenouille rousse et, dans une moindre mesure, de la couleuvre à collier présentent la connectivité la plus élevée en raison de la grande superficie d'habitat potentiel (en bleu sur la figure 13). Les réseaux écologiques du triton

crêté, de la rainette arboricole, du crapaud calamite et de l'alyte accoucheur ont un niveau de connectivité sept fois plus faible, en raison d'un habitat beaucoup moins étendu et beaucoup plus déconnecté. La salamandre tachetée est la seule espèce dont le réseau a une très faible connectivité, avec seulement 16 taches d'habitat potentiel, presque toutes déconnectées.

Espèces	EC initial (m <sup>2</sup> )	Taux de variation (%)		
		Minimum	Moyen	Maximum
Alyte accoucheur, <i>Alytes obstetricans</i>	2328493	0.00108	0.0148	2.0039
Crapaud commun, <i>Bufo bufo</i>	17066498	0.00054	0.2238	0.3408
Crapaud calamite, <i>Epidalea calamita</i>	1847265	0.00042	0.1335	1.5207
Rainette arboricole, <i>Hyla arborea</i>	2562923	0.00043	0.0629	1.7516
Couleuvre à collier, <i>Natrix natrix</i>	13797042	0.00095	0.0731	0.3616
Grenouille rousse, <i>Rana temporaria</i>	16125400	0.00029	0.2062	0.2450
Salamandre tachetée, <i>Salamandra salamandra</i>	17265	0.55110	0.5614	8.6042
Triton crêté, <i>Triturus cristatus</i>	3267325	0.00168	0.1357	38.3911

Tableau 6. Valeur initiale de connectivité (mesurée par la métrique Connectivité équivalente) et taux de variation minimum, moyen et maximal de cette métrique, après le test des 15 093 emplacements pour l'ajout d'une nouvelle mare.

Pour la majorité des espèces, l'ajout d'une nouvelle mare dans le réseau, même au meilleur emplacement, n'augmente que très faiblement la connectivité globale (< 2 %), sauf pour le Triton crêté, pour lequel le gain atteint 38,4 % et dans une moindre mesure, pour la Salamandre tachetée (8,6 %). Le gain important de connectivité pour le triton crêté s'explique par la reconnexion des deux plus grandes composantes du graphe suite à l'ajout de la nouvelle mare (Figure 13). Pour les autres espèces, les faibles gains correspondent à des contextes radicalement différents.

Dans le premier cas qui concerne le crapaud commun, la grenouille rousse ou le crapaud calamite, les réseaux écologiques sont initialement déjà très bien connectés avec une forte densité de taches d'habitat et de connexions. Dans cette configuration, l'ajout d'une nouvelle mare n'améliore que marginalement un niveau déjà élevé de connectivité.

Dans le second cas, les réseaux écologiques sont extrêmement fragmentés, soit en raison d'une faible densité d'habitat (par exemple la salamandre tachetée), soit en raison d'une matrice paysagère défavorable séparant les principales zones d'habitat (par exemple, la partie centrale des réseaux de la rainette arboricole et la couleuvre à collier). Dans ces deux configurations, l'ajout d'une seule mare ne suffit pas à améliorer de manière significative la connectivité globale. Néanmoins, dans le dernier cas, l'ajout cumulatif de plusieurs mares (Clauzel et al., 2015) dans la zone centrale pourrait permettre de reconnecter les deux principales sous-parties du réseau et améliorer ainsi considérablement la connectivité.

**Ces résultats incitent à interpréter les valeurs de connectivité en association avec la configuration initiale du réseau afin de recommander les mesures les plus pertinentes pour la conservation des espèces étudiées.**

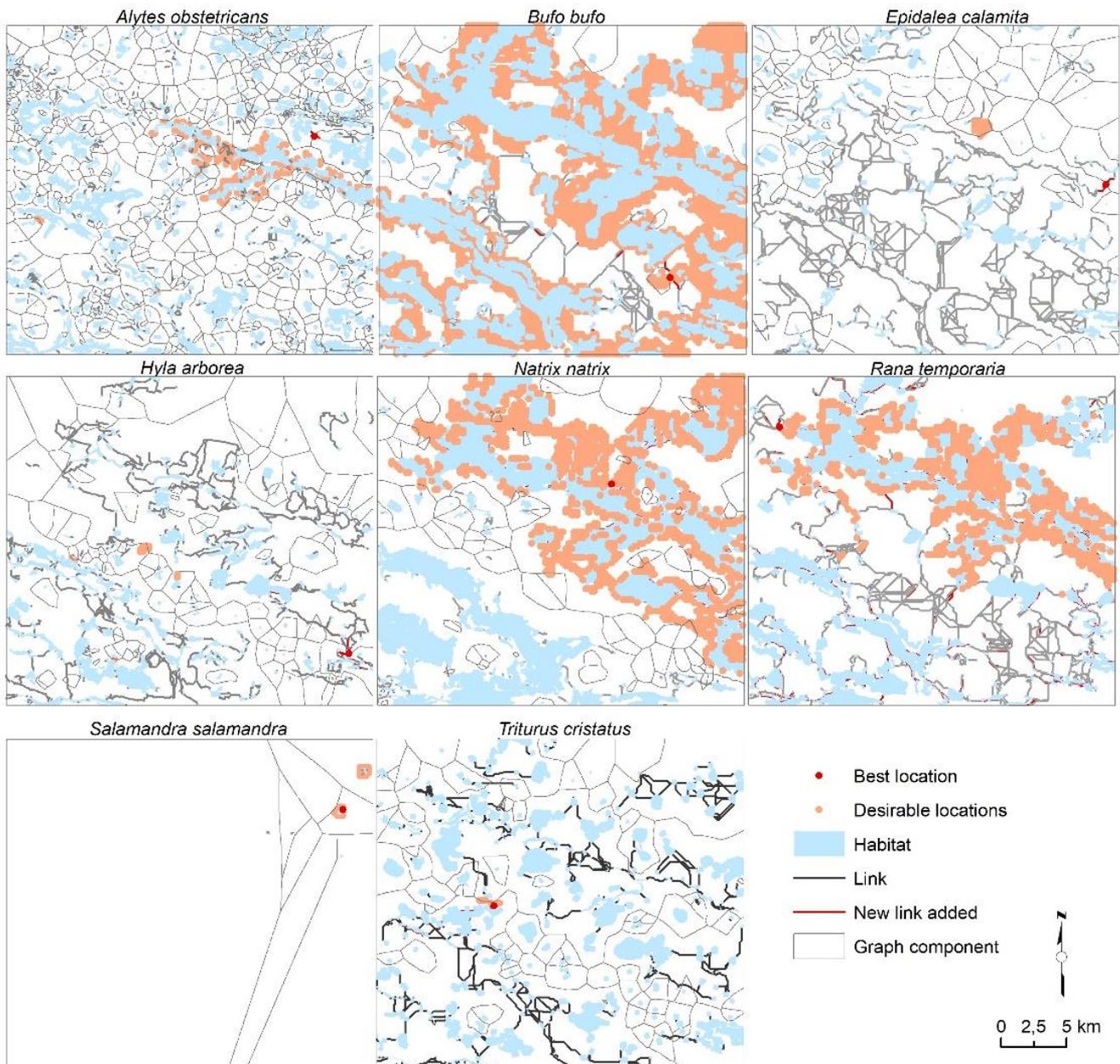


Figure 13. Réseau écologique de chaque espèce, élagué à la distance de dispersion et localisation des meilleurs emplacements pour l'ajout d'une nouvelle mare en fonction du gain en connectivité. « Les meilleurs emplacements » (orange) correspondent à la classe regroupant les plus fortes augmentations de la connectivité. Leur nombre varie en fonction des espèces. « Le meilleur emplacement » (rouge) est celui qui fournit la plus forte augmentation.

## Combinaison multi-espèces

### Protocole méthodologique

Le protocole décrit dans la section précédente permet de connaître le gain de connectivité pour chacun des 15 093 emplacements testés et pour chaque espèce. Ces résultats sont ensuite combinés à l'aide d'une analyse multivariée (analyse par composante principale, suivie d'une classification *k-means*) afin d'identifier les meilleurs emplacements dans une approche multi-espèces, c'est-à-dire qui permettent d'optimiser la connectivité pour le plus grand nombre d'espèces.

### Résultats

Les deux premières composantes de l'ACP expliquent 45% de la variance totale. Les espèces les mieux représentées par ces composantes sont le crapaud commun (80%), la grenouille rousse (65%), la rainette arboricole, l'alyte accoucheur et le crapaud calamite (50%). La première composante hiérarchise les

emplacements pour cinq espèces (grenouille rousse, crapaud commun, couleuvre à collier, crapaud calamite et rainette arboricole) et le second axe pour deux espèces (alyte accoucheur et triton crêté). La disposition presque orthogonale de plusieurs espèces (Figure 14) dans l'APC indique qu'il n'y a potentiellement pas de correspondance spatiale dans les meilleurs endroits, et qu'aucun compromis ne peut être trouvé pour tenir compte des huit espèces. Ce résultat est somme toute logique, compte tenu des profils écologiques diversifiés des espèces.

La faible variance expliquée (Tableau 7) peut s'expliquer par le grand nombre de points d'échantillonnage ayant pas ou peu de gain de connectivité et le faible nombre de zones testées communes en raison des configurations diversifiées de réseau directement liées à l'écologie des espèces (forestières versus milieux ouverts).

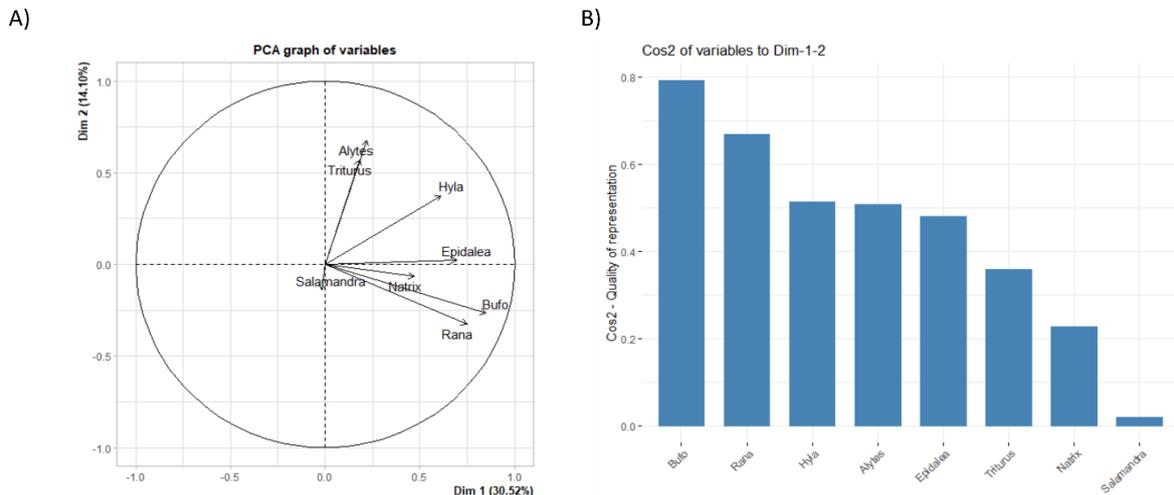


Figure 14. A) Les huit espèces projetées sur le plan formés par les deux premières composantes de l'ACP ; B) histogramme de la contribution de chaque espèce aux deux premières composantes.

Composante	Valeur propre	% de variance	Variance cumulée %
1	2.4412414	30.515517	30.51552
2	1.1277741	14.097176	44.61269
3	1.0391739	12.989674	57.60237
4	0.9782465	12.228082	69.83045
5	0.9220738	11.525923	81.35637
6	0.7297676	9.122094	90.47847
7	0.4675788	5.844735	96.32320
8	0.2941439	3.676799	100.00000

Tableau 7. Valeur propre et variance cumulée pour chaque composante de l'ACP.

L'algorithme de classification a identifié 4 clusters à l'intérieur desquels les gains en connectivité apportés par l'ajout d'une nouvelle mare pour chacune des 8 espèces sont relativement homogènes (Figure 15). L'analyse conjointe de la composition paysagère et des gains de connectivité pour chaque espèce à l'intérieur de chaque cluster permet de les caractériser.

Le cluster 2 apparait comme le plus intéressant pour améliorer la connectivité multi-spécifique, au maximum pour 5 espèces. Il est composé majoritairement de forêt (43%) et se localise sur les bordures forestières, à l'interface avec les terres agricoles.

Le cluster 3, qui fournit la plus forte augmentation de connectivité pour le crapaud commun et la grenouille rousse, est principalement occupé par l'agriculture (49 %).

Le cluster 4 (contenant à la fois des surfaces artificialisées à 39 % et des forêts à 34 %) regroupe des valeurs moyennes de gain en connectivité pour le crapaud commun, la grenouille rousse, la couleuvre à collier et le crapaud calamite.

Enfin, le cluster 1, caractérisé par une forte présence des surfaces artificialisées (89 %), présente les plus faibles valeurs de gain en connectivité pour toutes les espèces.

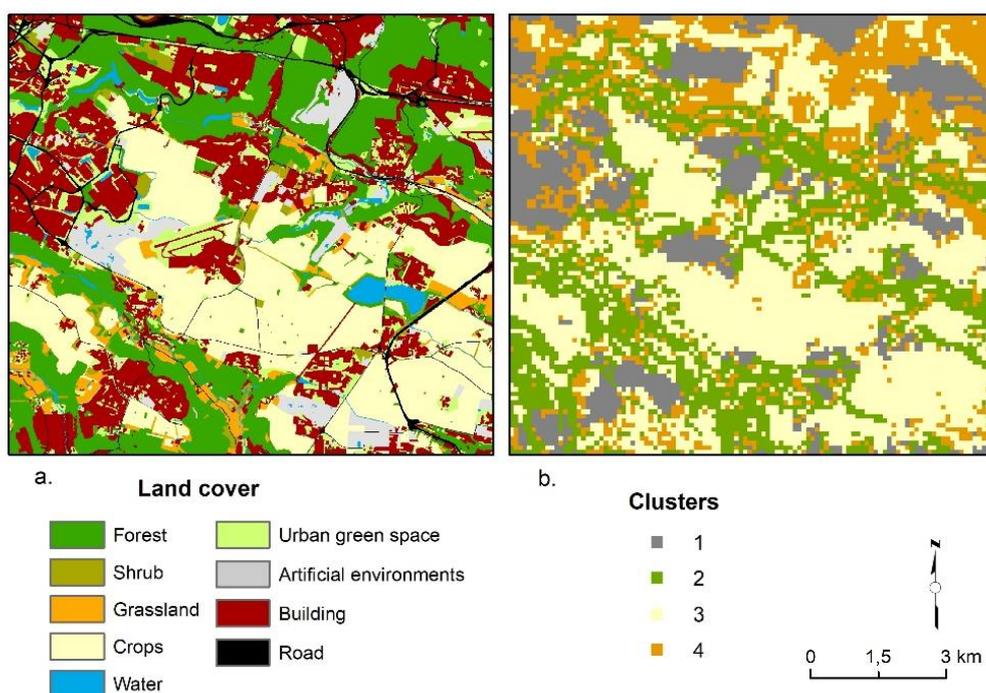


Figure 15. Carte de paysage (a) et projection des 4 clusters (b).

## Bilan du projet TRAMARE

Sur le plan opérationnel, le projet a permis de faire connaître, former et faciliter l'appropriation de l'outil Graphab par les gestionnaires en charge de la biodiversité en Ile-de-France. La co-construction des modèles, l'analyse de cas concrets et l'aide à l'interprétation des résultats ont été accompagnés de fiches méthodologiques, disponibles en libre accès, afin de rendre les gestionnaires autonomes dans l'utilisation de l'outil et faciliter sa réutilisation lors des mises à jour de données et/ou d'enjeux.

Sur le plan écologique, les résultats ont permis de développer une connaissance fine du réseau des mares en Ile-de-France qui pourra être mobilisée dans la gestion et l'évaluation de la TVB et dans les actions de conservation d'espèces menacées inféodées à ce milieu. Appliquée ici aux mares, la méthode est reproductible et peut être généralisée à d'autres types de milieux terrestres (sous-trames forestière, prairiale, agricole, etc.) afin d'identifier les secteurs stratégiques à préserver en priorité ou les secteurs les moins bien connectés en vue d'une restauration de milieux.

Sur les données participatives des mares, les variations dans le temps et dans l'espace de la pression d'observation sur les territoires ont été analysées. Cela a par exemple permis d'identifier les secteurs sous-observés qui pourront faire l'objet de campagnes de sensibilisation pour augmenter le nombre d'observations. A terme, l'objectif est de couvrir de manière équilibrée le territoire francilien afin d'avoir une cartographie la plus exhaustive possible des mares.

Sur le plan scientifique, si la modélisation spatiale des réseaux écologiques est reconnue depuis 15 ans, son couplage avec des données participatives soulève des enjeux à la fois statistiques (cohérence et homogénéité des données) et écologiques (représentativité des données). La mobilisation de ces données qui se généralisent offre un potentiel extrêmement fort pour améliorer le réalisme écologique des modèles et construire des scénarii en lien avec les enjeux écologiques des territoires.

## Bibliographie

- Bensettiti F., Gaudillat V., 2004. Cahiers d'habitats Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 7. Espèces animales. La Documentation française. 353 pp.
- Clauzel C., Girardet X., Foltête J.C., 2013. Impact assessment of a high-speed railway line on species distribution: Application to the European tree frog (*Hyla arborea*) in Franche-Comté, *Journal of Environmental Management*, 127: 125-134.
- Clauzel C., Bannwarth C., Foltête J.C., 2015. Integrating regional-scale connectivity in habitat restoration: An application for amphibian conservation in eastern France, *Journal for Nature Conservation*, 23: 98-107.
- Clauzel C., 2017. Evaluating and mitigating the impact of a high-speed railway on connectivity: a case study with an amphibian species in France. In Borda-de-Agua L., Barrientos R., Beja P. Pereira H., *Railway Ecology*, Springer, 215-228
- Cormier L., Lajarte ABD, Carcaud N., 2010. La planification des trames vertes, du global au local: réalités et limites. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <http://cybergeo.revues.org/index23187.html>
- Duflot R., Avon C., Roche P., Bergès L., 2018. Combining habitat suitability models and spatial graphs for more effective landscape conservation planning: An applied methodological framework and a species case study. *Journal for Nature Conservation* 46, 38–47
- Foltête J.C., Girardet X., Clauzel C., 2014. A methodological framework for the use of landscape graphs in land-use planning. *Landscape and Urban Planning* 124:140–150
- Foltête, J.-C., Savary, P., Clauzel, C., Bourgeois, M., Girardet, X., Saharoui, Y., Vuidel, G., Garnier, S., 2020. Coupling landscape graph modeling and biological data: a review. *Landscape Ecology* 35,1035–1052.
- Gaber C., 2019. Etude de la connectivité des réseaux de mares franciliens dans une perspective opérationnelle. Rapport de mémoire de Master 2 Bioterre, Université Paris 1 Sorbonne, 89 p.
- Galpern P., Manseau M., Fall A., 2011. Patch-based graphs of landscape connectivity: A guide to construction, analysis and application for conservation. *Biological Conservation* 144(1), 44–55
- Girardet X., Clauzel C., 2018. [Graphab : 14 réalisations à découvrir](#), [En ligne].
- Girardet X., Foltête J.C., Clauzel C., Vuidel G., 2016. Restauration de la connectivité écologique : proposition méthodologique pour une localisation optimisée des passages à faune, *Vertigo*, [En ligne], Hors-série 24.
- Grand D., Boudot J.-P., Doucet G., 2014. Cahier d'identification des libellules de France, Belgique, Luxembourg et Suisse. Biotope, Mèze, (Collection Cahier d'identification), 136p.
- Guittet, V., Laporte, M., Seguin, E., Zimolo, A., 2015. Prendre en compte la préservation des mares dans la gestion forestière-guide pratique, SNPN / CRPF. ed Keeley ATH., Beier P., Gagnon JW., 2016. Estimating landscape resistance from habitat suitability: effects of data source and nonlinearities. *Landscape Ecology* 31(9):2151–2162
- Lescure J. & de Massary J.C. (coords.) (2012). *Atlas des amphibiens et des reptiles de France*. Ouvrage collectif de la société herpétologique de France. Biotope, Mèze ; Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris (Collection Inventaires & biodiversité), 272 p.
- Liu, C., White, M., Newell, G., 2013. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of biogeography* 40, 778–789.
- Mimet A., Clauzel C., Foltête J.C., 2016. Locating wildlife crossings for multispecies connectivity across linear infrastructures, *Landscape Ecology*, 31: 1955-1973
- Passerault M., 2010. *La trame verte et bleue: Analyse du concept et réflexions méthodologiques pour sa traduction dans le Schéma Régional de Cohérence Ecologique*. Mémoire de Master 2, Université de Poitiers / DREAL Franche-Comté, 143 p.
- Phillips S.J., Dudík M., 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31, 161–175.
- Urban D, Keitt T (2001) Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective. *Ecology* 82(5):1205-1218
- Saharoui, Y., Foltête, J.-C., Clauzel, C., 2017. A multi-species approach for assessing the impact of land-cover changes on landscape connectivity. *Landscape Ecology*. 32, 1819–1835.
- Sajaloli B., Dutilleul C., 2001, *Les mares, des potentialités environnementales à revaloriser*, Rapport final du Programme National de Recherche sur les Zones Humides "Les mares, des potentialités environnementales à revaloriser", Centre de Biogéographie-Écologie (UMR 8505 CNRS - ENS LSH), 142 p
- Saura, S., Pascual-Hortal, L., 2007. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning* 83, 91–103.
- Saura S., Torné J., 2009. Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. *Environmental Modelling Software* 24(1):135-139
- Saura, S., Rubio, L., 2010. A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape. *Ecography*.
- Seguin E., Bricault B., Guittet V., Melin M., 2013. La reconquête des zones humides en Île-de-France –Bilan 2013. Société nationale de protection de la nature. 164 p
- Sordello, R., Comolet-Tirman, J., De Massary, J.-C., Dupont, P., Haffner, P., Rogeon, G., Siblet, J.-P., Tourroult, J., Trouvilliez, J., (2011). *Trame verte et bleue. Critères nationaux de cohérence. Contribution à la définition du critère sur les espèces*. Rapport d'étude No. SPN 2011-21. Service du Patrimoine Naturel, Muséum National d'Histoire Naturelle.
- Zeller KA., McGarigal K., Whiteley AR., 2012. Estimating landscape resistance to movement: a review. *Landscape Ecology* 27(6):777–797
- Ziółkowska E., Ostapowicz K., Kuemmerle T., Perzanowski K., Radeloff VC., Kozak J., 2012. Potential Habitat Connectivity of European Bison (*Bison Bonasus*) in the Carpathians. *Biological Conservation* 146(1) :188-196

# Annexes

## Annexe 1 : Détail des catégories de la carte de paysage

Milieu	Habitat (raster)	Détail	Postes MOS	Autres Informations
Lisière forêts	Lisière (1)			Construction à l'aide d'un tampon inversé de 10m à partir de la couche forêt
Forêts	Forêt (2)	Bois ou forêt, coupes ou clairières, peupleraies	1, 2, 3	
Esp. ouverts arbustifs	Arbustif (3)		4	
Prairies	Prairie (4)		7	
Cultures	Culture (5)	Grandes cultures (terres labourées) et vergers, pépinières, maraîchage, horticulture	6, 8, 9	Nb : les cultures sous serres ont été incluses dans la couche bâti
Carrières	Carrière (6)	Carrières et sablières sans végétation	79	
Esp. verts urbains	Vert Urbain (7)	Parcs et jardins liés à l'habitat, cimetières, surfaces engazonnées diverses, friches	13 à 17 26 à 28	
Milieus artificialisés	Artificialisé (8)	Terrains ouverts dédiés à une utilisation sportive ou de loisir. Espaces ouverts, le plus souvent associés à des infrastructures. Chantiers et décharges.	18 à 25 80	
GITT	GITT (9)	Infrastructures de transports types grandes routes et voies ferrés. Autoroutes et nationales.	73, 74	Identification des types de voies routières à l'aide de la couche IGN.
Routes secondaires	Routes (10)	Routes départementales et locales, identifiées via les couches IGN		Les liaisons locales et routes les plus petites routes ne sont pas répertoriées afin de ne pas être identifiées comme des milieux larges et barrières
Bâti	Bâti (11)	Tout type d'infrastructures bâties, habitats, activités, équipement divers	10 29 à 72 75 à 78	Le bâti diffus et dense est ici confondu, la résolution de la carte représente les occupations des sols à proximité
Petits cours d'eau et berges	Eau type 2 (12)	Cours de moins de 7,5m de larges, permanent (couche IGN) Berges sans activités portuaires, de stockages, non bâties ou aménagées	5	
Plans d'eau	Etangs (13)	Eaux stagnantes, grands mares, étangs	11	Couches IGN et MOS complémentaires
Eaux courantes larges	Eau type 1 (14)	Cours d'eau larges, fleuves	12	Couches IGN et MOS utilisées. Complétées pour «recouvrir» les potn
Mares	Mares (15)	Mares caractérisées, vue et potentielles du protocole SNPN		
Mares forestières	Mares forestières (16)	Mares situées à moins de 100m au delà des lisières forestières ou d'un espace ouvert arbustif		
Mares de cœur de forêt	Mares cœur forêt (17)	Mares située à plus de 500m d'une lisière forestière vers le cœur des massifs		

Tableau 1 : Description des catégories de la carte de paysage réalisée dans le cadre du projet TRAMARE

## Annexe 2 : Résultats des modèles prédictifs d'habitat pour les 8 espèces étudiées

Pour l'ensemble des espèces excepté la salamandre tachetée, la « distance à la mare la plus proche » et la « surface en eau » sont logiquement les variables qui contribuent le plus au meilleur modèle prédictif. La distance à la mare est corrélée négativement (plus la distance à la mare est faible, plus la probabilité de présence est forte) à la présence de la plupart des espèces avec une forte contribution pour le triton crêté (69,5 %) et la rainette arboricole (44,6 %) et une contribution moindre pour la couleuvre à collier et le crapaud commun (15 et 12 %). La proportion de surface en eau est, elle, corrélée positivement avec de fortes contributions pour le crapaud commun (51%), et de plus faibles pour l'alyte accoucheur (16%) et le triton crêté (13%).

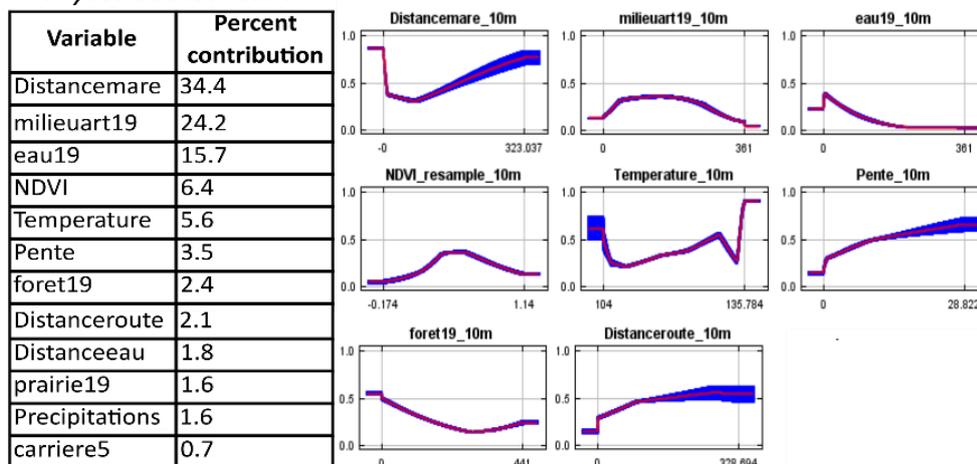
Certaines variables ne sont significatives que pour quelques espèces en fonction de leurs traits écologiques. La proportion de forêt est par exemple positivement corrélée à la présence d'espèces connues pour apprécier les milieux forestiers (salamandre tachetée 30,5%, grenouille rousse 27,7%, crapaud commun 18,6% et couleuvre à collier 16,9%). La proportion de milieux artificialisés joue un rôle significatif pour les deux espèces tolérantes à ce type de milieux : l'alyte accoucheur (24,2%) qui tolère les milieux urbains et le crapaud calamite qui apprécie les carrières (14,8%). Alors que la réponse de la première variable a une forme quasi linéaire (plus la proportion de forêt est importante, plus la probabilité de présence est élevée), celle de la seconde variable a une forme gaussienne où seules les valeurs moyennes de proportion en milieux artificialisés sont positivement corrélées à la présence des deux espèces, les valeurs les plus faibles et les plus fortes sont à l'inverse corrélées négativement.

Pour toutes les variables de composition paysagère, la taille de voisinage la plus significative est 500 m pour toutes les espèces, à l'exception de l'alyte accoucheur et du triton crêté où le voisinage de 200 m était plus significatif.

Les températures sont significatives uniquement pour le modèle du crapaud calamite (32,1%), pour laquelle la probabilité de présence est maximale pour des températures moyennes annuelles entre 12°C et 13,6°C. Les valeurs élevées de précipitations totales annuelles (> 700 mm) sont, elles, corrélées à la présence de la salamandre tachetée (17,4%).

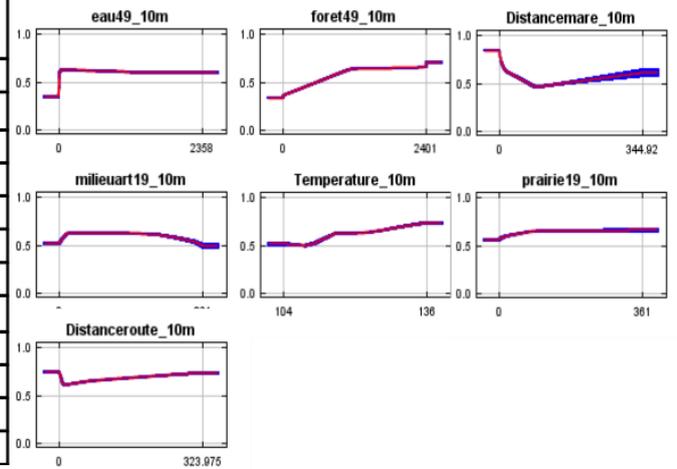
### Liste des variables les plus contributives (> 2%) et courbe de la réponse pour les 8 espèces étudiées

#### *Alytes obstetricans*



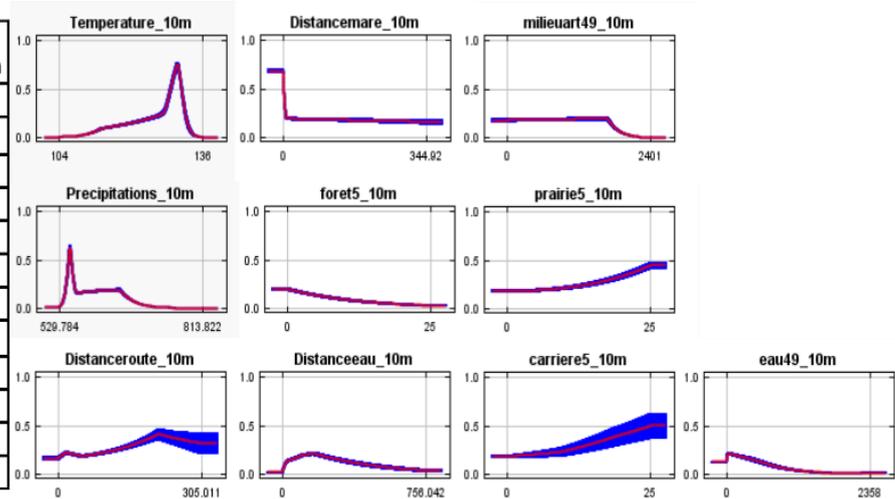
### Bufo bufo

Variable	Percent contribution
eau49	51
foret49	18.6
Distancemare	12.7
milieuart19	6.7
Temperature	3
prairie19	2.7
Distanceroute	2
Distanceeau	1.2
eau5	0.9
Precipitations	0.7
NDVI	0.2
Pente	0.2



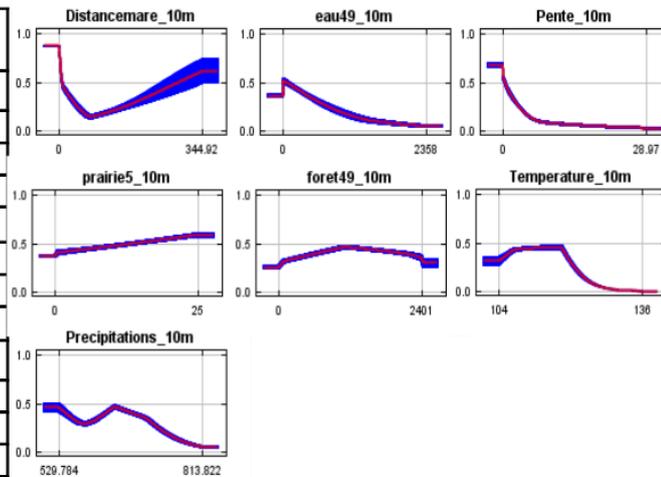
### Epidalea calamita

Variable	Percent contribution
Temperature	32.1
Distancemare	22
milieuart49	14.8
Precipitations	8.6
foret5	5.4
prairie5	5
Distanceroute	3.4
Distanceeau	2.9
carriere5	2.5
eau49	2.1
NDVI	0.9
Pente	0.3



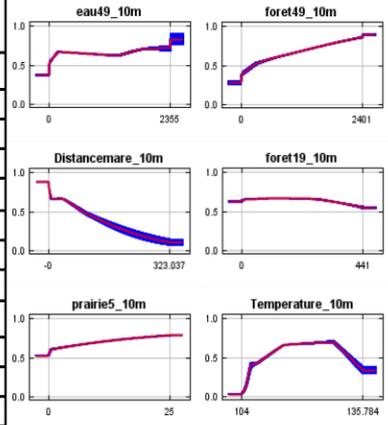
### Hyla arborea

Variable	Percent contribution
Distancemare	44.6
eau49	20.9
Pente	8.4
prairie5	7.8
foret49	5.8
Temperature	3.7
Precipitations	2.3
milieuart49	1.9
NDVI	1.9
Distanceroute	1.7
Distanceeau	0.6
carriere49	0.4



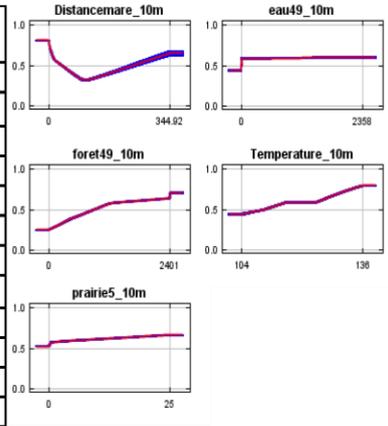
*Natrix natrix*

Variable	Percent contribution
eau49	36.5
foret49	16.9
Distancemare	15
foret19	9.4
prairie5	7.9
Temperature	6.5
Distanceeau	1.7
NDVI	1.6
milieuart49	1.5
Precipitations	1.4
Distanceroute	1.1
Pente	0.4



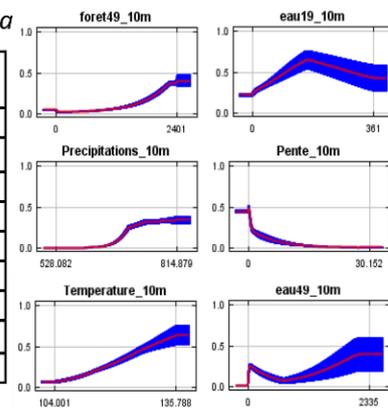
*Rana temporaria*

Variable	Percent contribution
Distancemare	33
eau49	30.8
foret49	27.7
Temperature	2.9
prairie5	2
Precipitations	1.3
milieuart5	0.8
Distanceroute	0.4
Pente	0.4
Distanceeau	0.3
NDVI	0.3
carriere19	0.1



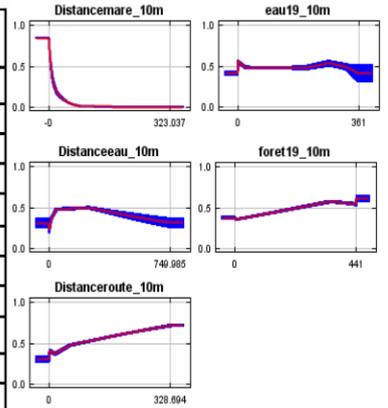
*Salamandra salamandra*

Variable	Percent contribution
foret49	30.5
eau49	23.9
Precipitations	17.4
Pente	13.1
Temperature	6
eau19	5.3
prairie49	1.8
NDVI	1.5
Distanceeau	0.5



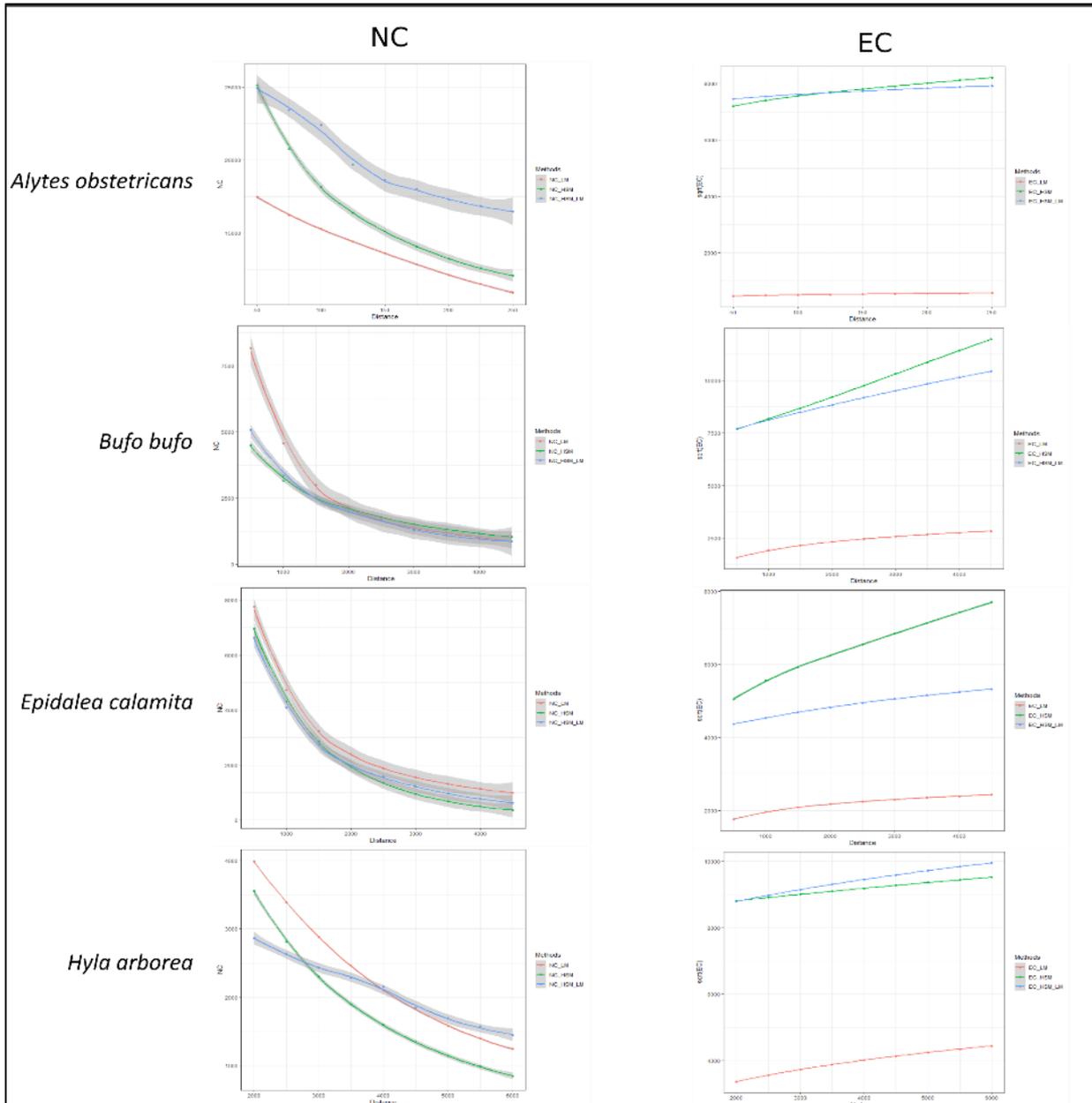
*Triturus cristatus*

Variable	Percent contribution
Distancemare	69.5
eau19	13
Distanceeau	4.3
foret19	3
Distanceroute	2.1
milieuart49	1.8
prairie5	1.7
Temperature	1.6
Precipitations	1.2
Pente	1.2
NDVI	0.6



## Annexe 3 : Courbes des valeurs des métriques en fonction des trois méthodes, extrait sur quatre espèces

Courbe rouge : méthode 1 (LM) ; courbe bleue : méthode 2 (HSM) ; courbe verte : méthode 3 (HSM\_LM)  
 NC (nombre de composantes) calculé pour différents élagages de graphes (en mètres)  
 EC (connectivité équivalente) calculée avec différentes distances de dispersion.





*Illustration : C.Gaber*

Référence :

Clauzel C., 2020. Rapport final du projet TRAMARE. Université de Paris, 34p.

