

Projet Recherche Innovation 2025-2026

Modélisation de la distribution et de la connectivité des habitats de la Cistude d'Europe (*Emys orbicularis*) en région Centre-Val de Loire



Modélisation de la distribution et de la connectivité des habitats de la Cistude d'Europe (*Emys orbicularis*) en région Centre-Val de Loire

Directeur de recherche:

M. FURET Robin

Autrice: Fanny CHABBERT

Année 2025-2026

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

Formation par la recherche, Projet recherche innovation en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet recherche innovation (PRI) situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu et encadré dans le cadre de ce projet de fin d'étude.

Je remercie tout d'abord mon tuteur Robin FURET pour m'avoir permis de connaître cette tortue d'eau douce, pour m'avoir soutenu dans le processus informatique laborieux et surtout pour m'avoir fait confiance dans la réalisation de ce travail. Ce projet m'a beaucoup appris, que ce soit sur le plan fondamental, en termes de connaissance sur l'écologie, la conservation et la gestion d'une espèce mais aussi sur le plan technique grâce à la manipulation de divers logiciels. Donc merci beaucoup.

Mes remerciements vont également à Mme Elisabeth LEHEC pour son accompagnement, son investissement et l'organisation du séminaire qui nous a permis de nous guider dans notre réflexion.

Enfin, last but not least, je remercie mes camarades de classe pour le soutien mental et technique mais surtout pour les longues heures de travail ensemble après 18h15 à la BU ou dans les salles infos...

SOMMAIRE

Avertissement	3
Remerciements	5
Sommaire	6
Table des figures et des tableaux.....	7
Introduction	8
1. Matériels et méthodes.....	9
1.1. Modèle biologique: la Cistude d'Europe	9
1.1.1. Répartition	9
1.1.2. Habitats	10
1.1.3. Reproduction	11
1.1.4. Nutrition	11
1.1.5. Menaces	12
1.1.6. Utilisation de l'espace.....	12
1.2. Zone d'étude: la région Centre-Val-de-Loire	14
1.3. Méthodes.....	16
1.3.1. BioDispersal.....	16
1.3.2. Graphab.....	20
2. Résultats.....	21
2.1. BioDispersal.....	21
2.2. Graphab.....	23
2.2.1. Résultat des calculs des métriques	24
2.3. Proposition de gestion	31
2.3.1. Ajout d'habitats favorables à la Cistude d'Europe	31
2.3.2. Mise en place de passage à faune	34
Conclusion	36
Bibliographie.....	38

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1 : Cistude d'Europe, <i>Emys orbicularis</i> (MNHN - F-G. Grandin, 2025).....	9
Figure 2: Répartition de la Cistude d'Europe en France (PNA, 2024).....	10
Figure 3: Distribution de la Cistude d'Europe dans la région Centre-Val-de-Loire, occupation du sol réalisée avec le Corine Land Cover.....	13
Figure 4: Répartition de l'occupation du sol en Centre Val de Loire (%).....	14
Figure 5: Positionnement de la réserve de Chérine au sein du département de l'Indre et des périmètres du PNR Brenne, Ramsar et Natura 2000 (DREAL Indre, 2022).....	16
Figure 6: Carte des espaces favorables à la Cistude d'Europe en région Centre-Val-de-Loire.....	23
Figure 7: Graphe de la répartition des habitats (plans d'eau) de la Cistude d'Europe dans la région Centre-Val-de-Loire, selon une approche de réseaux écologiques.....	24
Figure 8: Lien entre la distance en coût et la distance en mètre.....	25
Figure 9: Résultat du calcul par composante selon la probabilité de connectivité.....	26
Figure 10: Résultat de l'indice de centralité intermédiaire (BC) dans la région Centre-Val-de-Loire.....	27
Figure 11: Nuage de points de l'indice de centralité intermédiaire en fonction de la capacité des habitats.....	28
Figure 12: Résultat de la métrique flux d'interactions (IF) dans la région Centre-Val-de-Loire.....	29
Figure 13: Nuage de points du flux d'interaction en fonction de la capacité des habitats.....	30
Figure 14: Graphe paysager avec ajout de cinq taches visant l'amélioration de la connectivité de la région Centre-Val-de-Loire pour la Cistude d'Europe.....	32
Figure 15: Traduction sous forme de nuage de points de l'ajout de tâche face à la connectivité du graphe....	34
Figure 16: Bordure incurvée en plastique recyclé (Cerema 2021, d'après Groupe ACO).....	35

Tableau 1 : Hiérarchie de l'occupation du sol pour l'étude de la Cistude d'Europe.....	19
Tableau 2 : Tableau récapitulatif de l'étape de friction élaborée sur BioDispersal. Il souligne les choix des coefficients de friction attribués à chaque élément du site d'étude.....	20
Tableau 3 : Récapitulatif des utilités des métriques BC et IF.....	31

INTRODUCTION

Ce Projet de Recherche et Innovation s'inscrit dans un projet de recherche visant à améliorer les connaissances sur la distribution et l'utilisation des habitats par la Cistude d'Europe.

La Cistude d'Europe est une tortue d'eau douce présente en France métropolitaine et en Europe. Elle possède divers enjeux, que ce soit pour les écosystèmes ou les humains. Au niveau de l'écosystème, elle contribue à la propreté des plans et des cours d'eau en se nourrissant notamment des poissons morts. Par sa place dans la chaîne trophique, elle joue un rôle écosystémique tout au long de sa vie ; prédatée lors de sa phase juvénile, elle devient prédatrice lorsqu'elle atteint le stade adulte.

Pour les humains, la Cistude d'Europe incarne un enjeu socio-économique via le tourisme qu'elle génère. En effet, présente dans le Parc Naturel Régional de la Brenne et dans la Réserve Zoologique de la Haute Touche, en Indre, les passionnés de la faune font le déplacement pour l'observer. D'autre part, la cistude joue un rôle important dans les pratiques de gestion des parcelles agricoles. Soumise à un Plan National d'Action (PNA) pour les années 2020 à 2029, elle est protégée en France depuis 1979. Son statut de protection induit des modalités de gestion de son habitat et interdit la destruction, l'enlèvement, la capture ou la perturbation intentionnelle des œufs, des nids ou des animaux dans leur milieu naturel et son aire de répartition (PNA, 2019). C'est une espèce fragile et sensible aux perturbations.

L'étude de la Cistude d'Europe est pertinente pour ces enjeux qu'elle représente, une meilleure appréciation de son écologie, de son évolution et de sa capacité de dispersion permettrait de mettre en place des mesures de protection sur la gestion des parcelles agricoles et des zones humides. Ceci bénéficierait à diverses autres espèces partageant le même habitat, comme les oiseaux, les amphibiens ou les poissons.

Au cours de ce PRI, nous étudierons **comment la structure du paysage modère la capacité de la Cistude d'Europe à suivre ses habitats favorables en déplacement dans la région Centre-Val de Loire**. C'est-à-dire qu'il sera cherché comment le paysage dans lequel évolue la cistude est composé et comment cela peut affecter son déplacement. L'objectif de ce PRI est donc de calculer et modéliser la connectivité du territoire pour la Cistude d'Europe en Centre-Val-de-Loire.

Un **premier objectif** est de modéliser la répartition de la Cistude d'Europe dans la région. Le **second objectif** est d'identifier les habitats les plus favorables à l'espèce puis de quantifier leur connectivité dans le réseau écologique. Une première hypothèse serait de noter une forte hétérogénéité du paysage dans la région et s'attendre à un territoire favorable dans le PNR de la Brenne où la quantité de zones naturelles et de plans d'eau est plus importante. Enfin, le **dernier objectif** est de proposer des mesures de gestion permettant une meilleure connectivité entre les habitats. Nous pouvons supposer qu'en créant des espaces favorables à l'espèce et en ouvrant des corridors écologiques, la connectivité de son territoire devrait s'améliorer.

1. Matériels et méthodes

1.1. Modèle biologique: la Cistude d'Europe

La Cistude d'Europe est l'une des 2 tortue d'eau douce présente naturellement en France métropolitaine, avec l'Emyde lépreuse (*Mauremys leprosa*) (Maran & Frétey, 2023). Elle appartient à la famille des Emydidae. Ce reptile se distingue des tortues terrestres par sa carapace plus lisse, plus hydrodynamique et sa queue plus longue. Elle est de couleur brun foncé à noirâtre avec, souvent, de fines taches ou stries jaunes. De par ses divers habitats, elle possède des griffes sur ses pattes palmées lui permettant de creuser le sol pour chercher de la nourriture ou y pondre ses œufs (MNHN, 2025). En termes de statut de protection, la Cistude d'Europe est considérée comme quasi-menacée à échelle mondiale et est strictement protégée. A échelle européenne, elle est classée comme « espèce d'intérêt communautaire » dans la Directive « Habitat, Faune et Flore » du 21/05/1992. Enfin, elle est strictement protégée en France depuis 1979 (PNA, 2019).



Figure 1 : Cistude d'Europe, *Emys orbicularis* (MNHN - F-G. Grandin, 2025)

1.1.1. Répartition

L'aire de répartition d'*Emys orbicularis* s'étend de l'Europe de l'Ouest à la mer d'Aral au Kazakhstan et du Maghreb à la Lituanie. Sa distribution a varié au cours de l'évolution climatique de la planète. En France, elle est présente naturellement dans 4 grands foyers : l'Aquitaine, la Camargue, la Provence et en Brenne (Indre) (Figure2). Le site de la Brenne dispose de l'une des densités de plans d'eau (habitat de la cistude) les plus importantes de France (2500 étangs/58 000 ha). Il offre ainsi un terrain privilégié pour l'étude de l'espèce (Clarté 2020).

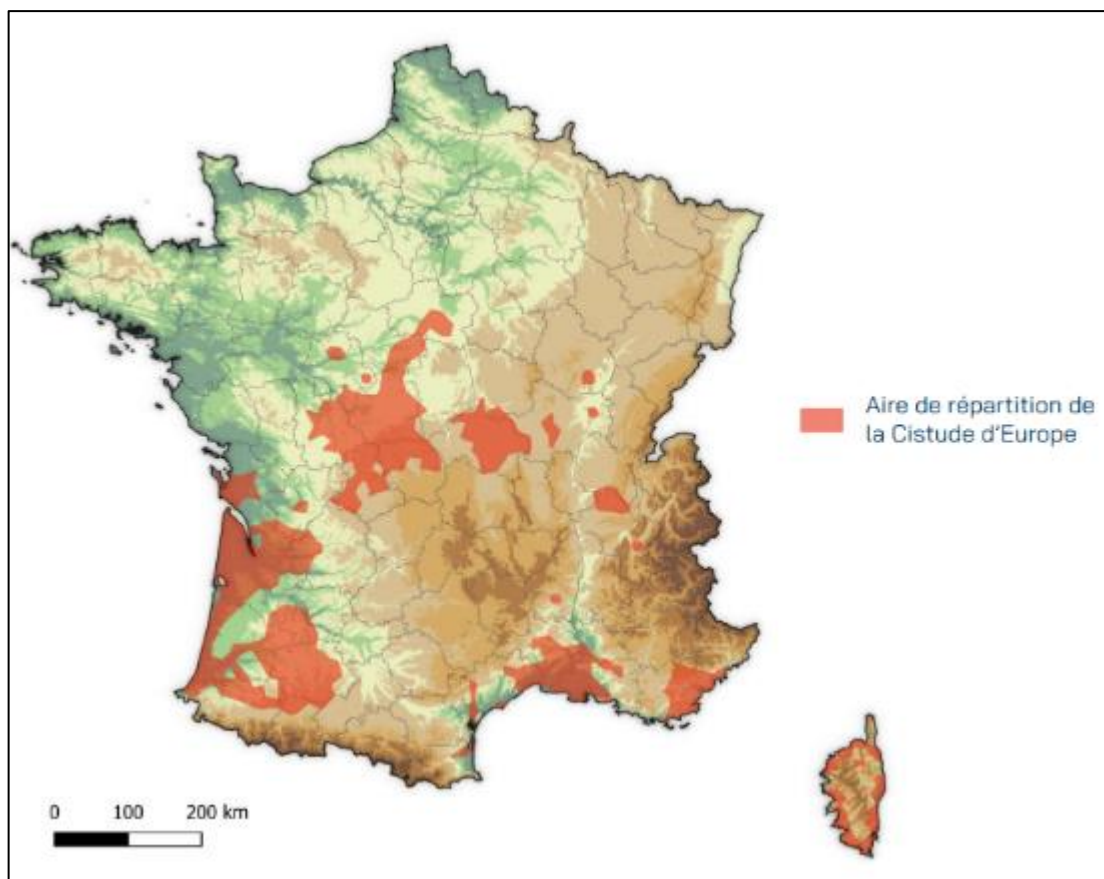


Figure 2: Répartition de la Cistude d'Europe en France (PNA, 2024)

1.1.2. Habitats

La Cistude d'Europe est une espèce semi-aquatique dont le cycle de vie est structuré par l'alternance saisonnière et la complémentarité entre milieux aquatiques et terrestres. Il peut être distingué 2 cycles de vie selon les saisons : une phase active de février/mars à octobre/novembre et une phase d'hivernation (Beau,2019).

C'est une espèce sédentaire, elle se déplace de 40 à 80 mètres par jour en moyenne (Agence Gaiadomo, 2012) et migre seulement en cas de nécessité, lors d'un assec estival par exemple. Dès lors, elle peut parcourir plus d'1km pour trouver un autre étang qui lui est favorable. Les adultes passent l'essentiel de leur période d'activité dans des habitats aquatiques calmes tels que les étangs, marais, bras morts, canaux et zones humides à végétation dense, caractérisés par des fonds vaseux favorables à l'alimentation, au repos et à l'enfouissement. Ces milieux offrent également des sites de thermorégulation indispensables, notamment sous la forme de troncs flottants, d'amas de végétaux ou de berges exposées. Les individus les utilisent pour s'insoler tout en conservant une capacité de fuite rapide vers l'eau. La tortue est adepte de la chaleur, dès que la température extérieure est de 4°C supérieure à celle de l'eau, elle en sort. Son optimum de température est de 25°C. Lors des trop fortes chaleurs atteintes à la fin de

l'été, l'activité de la cistude ralentie pour se protéger. Pour ses sites de pontes, la cistude utilise des espaces peu végétalisés. Une végétation trop dense ou un embroussaillage représente un obstacle pour elle.

À l'approche de l'hiver, la cistude entre en phase de léthargie : elle réduit fortement son activité et se dirige vers des zones à végétation aquatique dense ou s'enfouit dans la vase, où les conditions thermiques et d'oxygénation permettent la survie durant la période froide. Elle hiverne d'octobre à mars sous la vase (dans les étangs, en bord de roselière le plus souvent) et sort de l'hivernage dès les premiers jours d'insolation continue, à partir de fin février.

1.1.3. Reproduction

La reproduction illustre la double dépendance de l'espèce à l'eau et à la terre : l'accouplement se déroule exclusivement en milieu aquatique, généralement au printemps, tandis que la ponte intervient en milieu terrestre. L'accouplement s'effectue de mars à octobre avec un pic d'activité entre avril et mai. La ponte a lieu principalement entre mai et juillet sur des sols chauds, non inondables, sableux ou sablo-limoneux, bien dégagés, à une distance du point d'eau pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres. Les femelles effectuent alors des déplacements parfois importants, pouvant dépasser plusieurs centaines de mètres, afin de rejoindre des zones ouvertes, bien exposées et aux sols meubles, telles que les prairies ou friches, conditions nécessaires au bon développement embryonnaire. Les jeunes naissent dès le mois d'août et jusqu'à l'automne après un développement embryonnaire de deux à quatre mois. Après l'émergence, les juvéniles rejoignent rapidement les zones humides, où ils occupent des microhabitats peu profonds et fortement végétalisés, offrant à la fois ressources alimentaires et protection contre la prédation. L'espérance de vie serait de 40 à 60 ans, voire plus de 100 ans en captivité (Vallée Hérault, 2020).

1.1.4. Nutrition

La Cistude d'Europe est une espèce omnivore et opportuniste dont l'alimentation s'effectue principalement en milieu aquatique. Elle fréquente notamment les zones riches en végétation, telles que les herbiers de myriophylles (*Myriophyllum spicatum*), les peuplements de nénuphars (*Nuphar lutea*, *Nymphaea alba*) ainsi que les roselières (Vallée Hérault, 2020). Dans les étangs, la Cistude adopte également un comportement charognard et peut consommer des cadavres de vertébrés, notamment des poissons, des oiseaux ou de petits mammifères. Son régime alimentaire est dominé par les invertébrés aquatiques, incluant insectes, mollusques, crustacés et leurs larves, mais peut aussi comprendre des poissons affaiblis ou morts, des œufs de poissons, des œufs et des têtards d'amphibiens, ainsi que des sangsues. Par ailleurs, la Cistude consomme occasionnellement des végétaux aquatiques et

contribue à la dispersion et à la germination du Nénuphar blanc (*Nymphaea alba*). Plus rarement, elle est capable de capturer de petites proies vertébrées, telles que des oisillons ou des micromammifères, qu'elle immobilise sous l'eau avant de les consommer.

1.1.5. Menaces

La Cistude d'Europe fait face à de nombreuses menaces tout au long de sa vie, qu'elles soient directes à l'espèce ou portées sur son biotope. Les juvéniles sont prédatés par divers mammifères: blaireaux, renards, martre, fouine, pie bavarde, ... (Liuzzo *et al.*, 2024). Ces derniers pratiquent le creusement induisant la destruction des nids. Il est estimé à 1 chance sur 100 les probabilités d'un jeune d'atteindre l'âge adulte (chiffre variable selon les études) (Vallée Hérault, 2020).

Plus globalement, pour l'espèce en général, les menaces sont variées : l'altération de son habitat, les pesticides ou encore les espèces exotiques envahissantes comme la Tortue de Floride, tortue d'eau domestiquée et relâchée à tort dans le milieu naturel. En effet, l'habitat de la cistude étant varié, elle est particulièrement sensible à l'altération de ces milieux, qu'il s'agisse de l'assèchement des zones humides, de l'endiguement des berges, de la rectification des cours d'eau ou de l'urbanisation. La fragmentation des habitats limite ses déplacements, essentiels pour l'accès aux sites de reproduction et au maintien des échanges génétiques entre populations. Elle peut également augmenter la mortalité lors des déplacements terrestres, notamment par collisions routières.

À ces pressions s'ajoutent la dégradation de la qualité de l'eau liée aux pollutions agricoles et domestiques, notamment l'usage de pesticides, qui affectent directement les ressources alimentaires et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. D'autres facteurs aggravants incluent le dérangement causé par les activités de loisirs (pêche, canotage, baignade) ainsi que la prédation accrue des nids. L'ensemble de ces menaces combinées fragilise durablement les populations de Cistude d'Europe et explique la nécessité de mesures de conservation ciblées et à long terme.

1.1.6. Utilisation de l'espace

Pour assurer ses déplacements, la cistude peut utiliser des corridors écologiques mais généralement, en raison de la petite distance à parcourir et de l'effort engendré, elle choisira un itinéraire direct. Elle peut emprunter des bras de rivières ou bien des milieux boisés, qui seraient ses milieux terrestres préférentiels pour assurer son déplacement (étude portée sur l'observation de mâles) (Clarté, 2020). Ses déplacements sont motivés par la recherche de nourriture, de site de ponte pour les femelles ou encore afin de trouver des habitats plus favorables (refuge, température, végétation) (Clarté, 2020).

Dans la région Centre-Val-de-Loire, 3207 points d'observation ont été recensés de 1990 à 2025. Il est possible qu'il y ait plusieurs individus par point. Sur la carte (Figure 3) ci-après, il est visible qu'elle occupe plutôt :

- Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole
- Systèmes culturaux et parcellaires complexes
- Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants
- Plans d'eau
- Tous types de forêts, marais et même certains tissus urbains

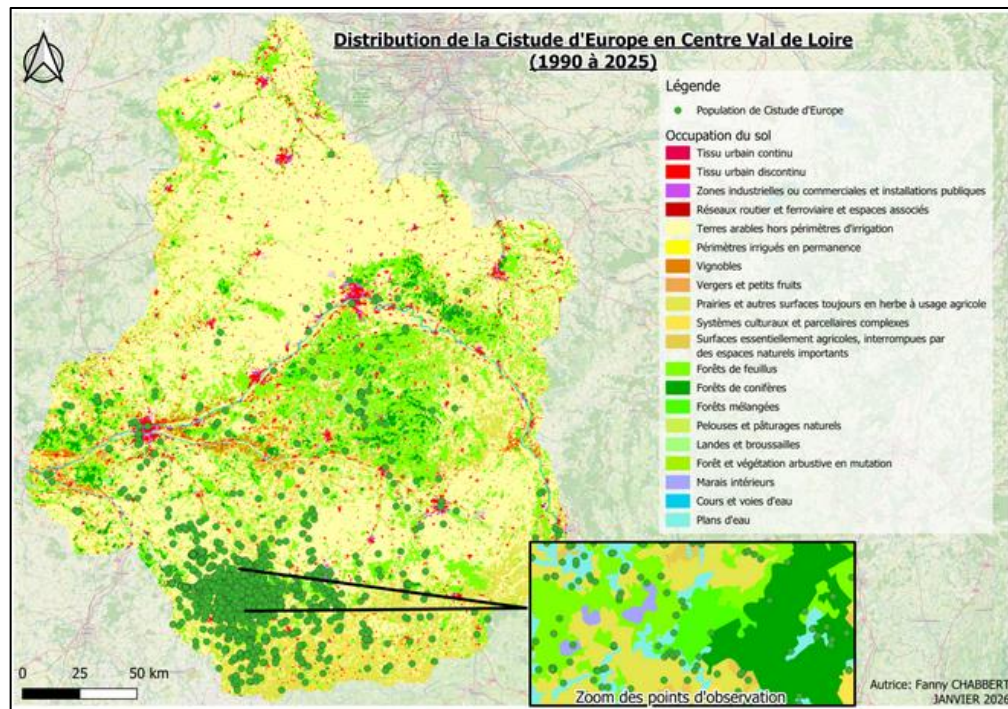


Figure 3: Distribution de la Cistude d'Europe dans la région Centre-Val-de-Loire, occupation du sol réalisée avec le Corine Land Cover

L'étude d'une espèce permet une meilleure compréhension de son cycle de vie et des interactions qu'elle peut avoir avec le milieu et les autres êtres-vivants. La Cistude d'Europe est étudiée depuis plusieurs décennies et nous savons qu'elle joue un rôle important dans l'écosystème. Elle participe à l'équilibre de l'écosystème en étant prédatée et prédatrice, mais aussi en favorisant la dispersion de certaines espèces végétales comme le nénuphar blanc. Son statut de protection actuel impacte les pratiques de gestion des cours d'eau ou des zones agricoles qui prennent davantage en compte ses périodes d'activités (reproduction notamment). Ainsi, protéger une espèce c'est protéger toutes celles partageant le même biotope.

1.2. Zone d'étude: la région Centre-Val-de-Loire

Dans le cadre de ce projet de recherche, la zone d'étude est la région Centre-Val-de-Loire. Cette région est connue pour son agriculture et notamment ses productions céréalières et viticoles. Les terres cultivées représentent 50% du territoire, les prairies à usages agricoles près de 20% tandis que les forêts de feuillus couvrent 17% du territoire (Figure 3). Par conséquent près des ¾ du territoire est dédié à l'agriculture.

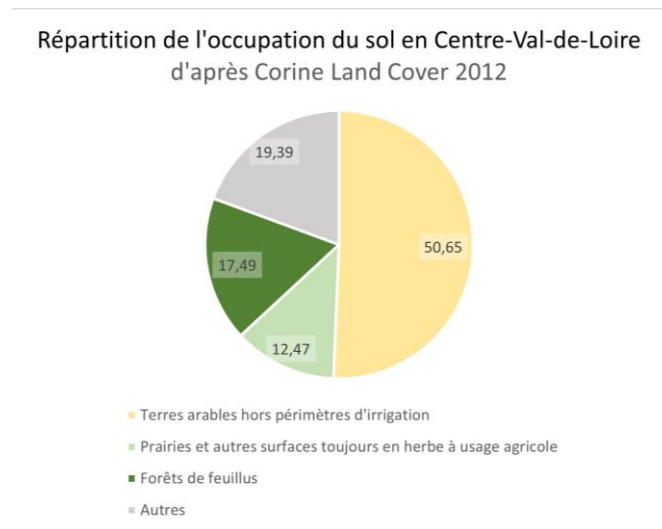


Figure 4: Répartition de l'occupation du sol en Centre Val de Loire (%)

Par ailleurs, plus propice pour l'espèce étudiée, il est retrouvé beaucoup de zones humides comprenant des marais et des étangs dans le département de l'Indre (36). La Réserve Naturelle Nationale (RNN) de Chérine présente dans le Parc Naturel Régional (PNR) de la Brenne accueille le foyer de cistude le plus important de la région puisque 2 403 individus ont été recensés sur la zone alors que la région accueille une population de 3 207 individus, d'après les données mobilisées pour cette étude.

Le PNR couvre une superficie de 183 000 ha et près de 3 300 étangs y sont recensés représentant près de 4% de la surface du parc. Ces surfaces en eau sont le support d'activités économiques dont l'aquaculture de poissons d'eau douce produisant environ 800 tonnes de poissons par an (PNR, 2025). Cette activité engendre des pratiques de gestion spécifiques : d'octobre à avril, les étangs sont vidangés et pêchés.

L'étang qui est le plus en aval de la chaîne d'étangs commence à se vider et à être pêché. Il se remplira d'eau par la vidange de l'étang situé en amont. Selon sa surface, un étang peut se vider en quelques jours ou en quelques semaines.

Par ailleurs, l'élevage extensif et l'agriculture céréalière sont également présents au sein du Parc:

- L'élevage bovin, concentré dans les exploitations du centre Brenne et sur la partie Bocagère au Sud du Parc où la prairie reste dominante,
- L'élevage ovin, plutôt localisé en petite Brenne et Boischaut Sud. Malheureusement cet élevage s'effondre depuis plusieurs années pour des raisons économiques mais aussi sanitaires (fièvre catarrhale),
- L'élevage caprin s'étend sur les aires d'appellations des fromages AOP Poulligny-Saint-Pierre et Valençay.
- La culture céréalière se situe sur la bordure ouest du Parc.

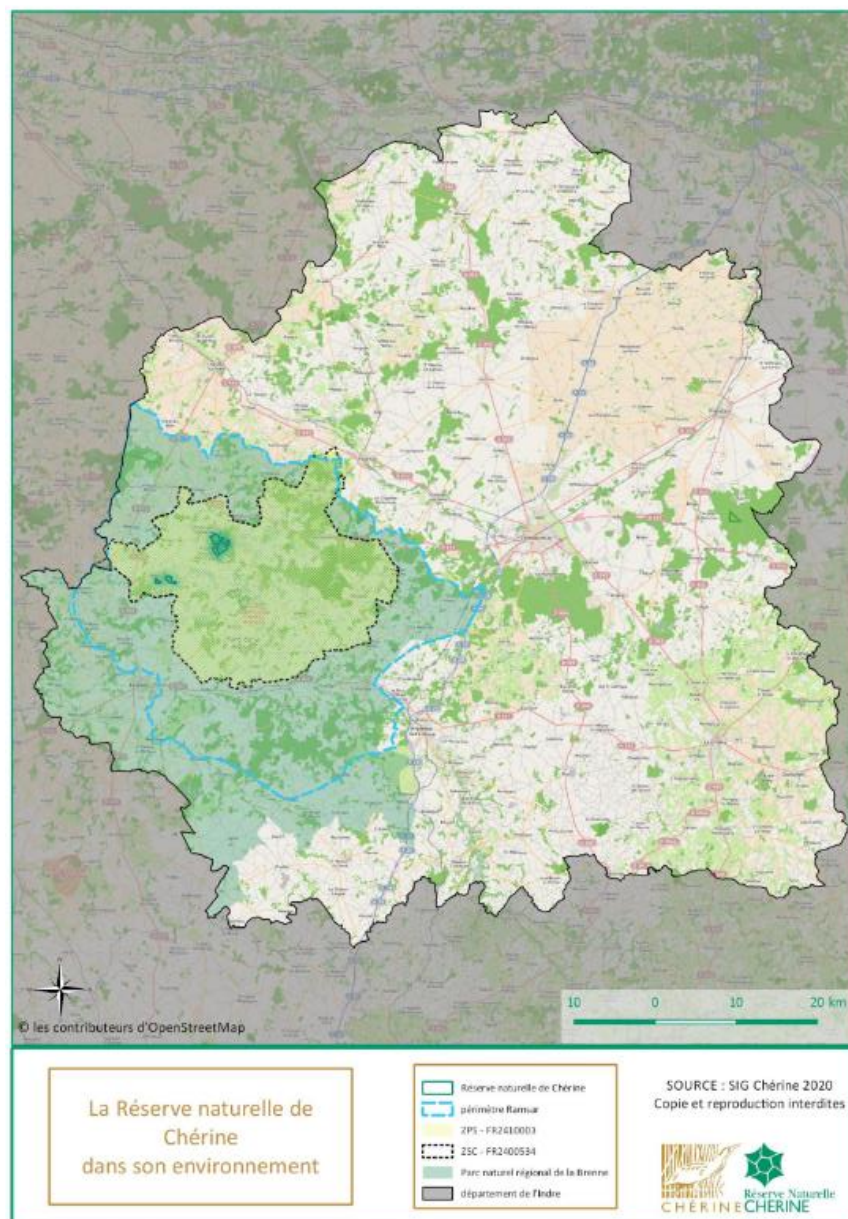


Figure 5: Positionnement de la réserve de Chérine au sein du département de l'Indre et des périmètres du PNR Brenne, Ramsar et Natura 2000 (DREAL Indre, 2022)

1.3. Méthodes

Pour mener à bien ce projet de recherche et innovation, dont l'objectif était de visualiser la répartition de la Cistude d'Europe dans la région Centre-Val-de-Loire et de quantifier la connectivité de ses habitats, diverses sources de données ont été utilisées.

Les **données d'occurrence de l'espèce** sont issues de 3 sources différentes:

- Gbif: Global Biodiversity Information Facility
- INPN: L'inventaire National du Patrimoine naturel
- SINP (Système d'Information de l'Inventaire du Patrimoine naturel)

Ces tables csv ont été triées afin de prendre les données de présence spécifiques à la région Centre, des années 90 à aujourd'hui et avec une précision supérieure à 1 000m.

Ensuite, afin d'avoir une première impression de la répartition de la cistude dans la région, ses données ont été importées sur QGis avec une cartographie Corine Land Cover de 2012. Il a pu être observé un regroupement très important de la population dans l'Indre, au niveau du PNR de la Brenne (Figure 3).

Pour poursuivre l'analyse, deux logiciels sont utilisés pour répondre aux objectifs de l'étude: QGis, avec l'extension BioDispersal et Graphab. Ces logiciels sont complémentaires, l'utilisation de Graphab ne peut s'effectuer seulement à la suite de l'obtention de carte générées par BioDispersal.

1.3.1. BioDispersal

BioDispersal est une extension de QGis servant à cartographier les réseaux ou continuités écologiques par le calcul d'aires potentielles de dispersion des espèces en se basant sur la perméabilité des milieux.

BioDispersal définit une procédure en 7 étapes depuis le prétraitement des données jusqu'au calcul des aires de dispersion.

1. Définition des paramètres généraux
2. Déclaration des sous-trames
3. Sélection et classification des données d'entrée
4. Fusion et hiérarchisation des données sélectionnées
5. Définition des coefficients de friction
6. Pondération des couches de friction si nécessaire (étape optionnelle)
7. Calcul des aires de dispersion

Dans le cadre de cette étude sur la Cistude d'Europe, seules les étapes de 1 à 5 seront réalisées. L'objectif de ce traitement de données est d'obtenir des couches rasters dites de "fusion" et de "friction" afin de pouvoir les exploiter sur le logiciel Graphab. Ces deux couches permettent de traduire l'occupation du sol selon des paramètres choisis spécifiquement pour cette espèce et d'y associer des "coefficients de friction", c'est-à-dire un score en fonction de sa capacité à être perméable ou non à la cistude.

Données mobilisées:

- **Corine Land Cover (CLC) 2012** de la région Centre Val de Loire au format vecteur, résolution 10 mètres
- **BD TOPO** de la région: renseigne les informations sur les infrastructures présentes au sol, qu'elles soient naturelles ou anthropiques (routes, hydrographie, plan d'eau,...)

Pour l'étude, il a été important de savoir quels éléments du sol étaient intéressant à prendre en compte en fonction de l'écologie de la cistude. Selon les projets et les espèces étudiées, il ne sera pas pris en compte les mêmes éléments au sol car ils ne représentent pas tous des obstacles ou des corridors.

A noter qu'il a été choisi de travailler avec une résolution de 100 mètres au lieu de 10 mètres en raison du temps de travail du logiciel. Il est possible que cette perte de précision ait un impact sur les analyses ci-après.

Déclaration des sous-trames

Une seule sous trame a été créée pour cette étude car une seule espèce est étudiée et son habitat est propre à un milieu.

Etape de sélection

Ici les couches sélectionnées étaient les **tronçons de routes**, classés par catégorie: autoroutes, principales, régionales, locales et bretelles d'insertion. Puis les **tronçons hydrographiques** classés par largeur: 0 à 15 mètres, 15 à 50 mètres, supérieurs à 50 mètres, en attentes de mises à jour et sans objet. Les **voies ferrées** et les **plans d'eau** ont également été sélectionnées sans être catégorisés. Enfin, en couche d'occupation du sol, le vecteur **CLC** a été catégorisé selon les codes CORINE attribuant un nombre à chaque type d'habitat. Plus de 350 types d'habitats codés sont classés selon des attributs physiologiques généraux, la composition des communautés végétales, des facteurs biogéographiques ou écologiques. Les habitats peuvent être naturels, semi-naturels ou artificiels. Il existe 4 niveaux de codes, augmentant la précision de la description de l'habitat. Ici, il a été choisi de catégoriser les habitats par niveau 2, offrant 13 sous catégories pour la couche d'occupation du sol.

Etape de fusion

L'étape de fusion consiste à hiérarchiser les classes créées précédemment. C'est-à-dire que les paramètres les plus impactant pour l'espèce sont arbitrairement classés afin de mettre en avant leur rôle d'obstacle pour la cistude. Ici, les éléments les plus fragmentant ont été placés en haut car ils vont écraser ceux qui sont en dessous.

Nom
Bretelle
Autoroute
Route principale
Route régionale
Route locale
Voies ferrées
Hydrographie supérieure à 50 mètres
Hydrologie en attente de mise à jour
Hydrographie comprise entre 15 et 50 mètres
Hydrologie sans objet
Hydrographie comprise entre 0 et 15 mètres
Plans d'eau
Occupation du sol

Tableau 1: Hiérarchie de l'occupation du sol pour l'étude de la Cistude d'Europe

A l'issue de cette étape, une fusion est effectuée permettant de générer un fichier raster d'occupation du sol.

Etape de friction

Lors de cette étape, il est attribué de manière arbitraire un coefficient de friction à chaque classe. Il est donc important de savoir l'écologie de l'espèce. Il a été décidé d'attribuer les coefficients suivants pour la cistude dans l'étude:

Classe	Description	Coefficient de friction	Justification
Habitat			
Hydrologie de 0 à 15 mètres		1	
Plan d'eau		1	

Occupation du sol 41	Zones humides intérieures	1	Espaces naturels où la Cistude d'Europe réalise son cycle de vie.
Occupation du sol 51	Eaux continentales	1	
Milieux très favorables			
Occupation du sol 32	Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	10	Espaces naturels utilisés par la Cistude d'Europe pour se déplacer ou pondre.
Occupation du sol 33	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	10	
Occupation du sol 23	Prairies	10	
Hydrologie de 15 à 50 mètres		10	
Hydrologie_maj		10	
Hydrologie sans objet		10	
Milieux neutres			
Occupation du sol 14	Espaces verts artificialisés, non agricoles	50	Espaces utilisables par la Cistude d'Europe mais non favorables.
Occupation du sol 22	Cultures permanentes	50	
Occupation du sol 31	Forêts	50	
Hydrologie de largeur > 50m		50	
Milieux défavorables			
Occupation du sol 24	Zones agricoles hétérogènes	100	Espaces artificialisés, combinant des utilisations dangereuses pour l'espèce.
Route régionale	1 à 2 voies	100	
Route locale	1 à 2 voies	100	
Occupation du sol 21	Terres arables	500	
Milieux très défavorables			
Route principale	2 voies minimum	1 000	Espaces artificialisés, combinant des utilisations mortelles pour l'espèce.
Autoroutes		10 000	
Bretelles	Insertion voies rapides	10 000	
Voies ferrées		10 000	
Occupation du sol 11	Zones urbanisées	10 000	
Occupation du sol 12	Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication	10 000	
Occupation du sol 13	Mines, décharges et chantiers	10 000	

Tableau 2: Tableau récapitulatif de l'étape de friction élaborée sur BioDispersal. Il souligne les choix des coefficients de friction attribués à chaque élément du site d'étude.

A terme de cette étape, il est généré une couche de friction mettant en lumière les espaces favorables à l'espèce et ceux qui ne le sont pas (cf. Figure 6 en 2.1.).

1.3.2. Graphab

Le logiciel Graphab permet de modéliser les réseaux écologiques à partir de la théorie des graphes. C'est un outil réunissant à la fois la construction et la visualisation des graphes, les analyses de connectivité et il permet de faire les liens avec des données externes. L'interface présente un graphe paysager constitué d'un ensemble de nœuds connectés par des liens. Les nœuds représentent les habitats préalablement définis pour une ou plusieurs espèces et les liens représentent les chemins de déplacement potentiels. A chaque lien est associé une distance en mètre et une distance en coût de déplacement, c'est-à-dire l'investissement de devra investir un individu pour la parcourir d'un habitat à un autre.

La théorie des graphes définit divers types de graphes :

- Un graphe est dit connexe si tous les nœuds sont interconnectés, il n'a qu'une seule composante. Dans ce cas, en écologie, une espèce peut donc se déplacer entre chaque habitat, le milieu est perméable.
- Un graphe est dit non connexe s'il existe diverses composantes et donc des nœuds sont isolés. Dans ce cas, un réseau écologique apparaît comme fragmenté et imperméable.

L'objectif ici est de représenter les habitats de la Cistude d'Europe dans la région Centre-Val-de-Loire et leurs connectivités. Il est également souhaité de mettre en lumière ceux qui sont bien connectés et ceux qui sont isolés.

Par conséquent, grâce aux couches de fusion et de friction générées par BioDispersal, il sera possible de les utiliser sur Graphab afin de créer des graphes puis de calculer des métriques. Les métriques permettent de caractériser la connectivité du graphe. Elles peuvent être calculées à différentes échelles : locales pour chaque nœud ou habitat, par composante ou globale. Les calculs prennent en compte la capacité de dispersion de l'espèce en coût, c'est-à-dire le coût maximal que peut donner l'espèce à chaque déplacement.

Méthode dans le cas de l'étude de la Cistude d'Europe :

Pour initier cette étude, il a été nécessaire de définir les paramètres généraux:

- Carte du paysage : couche de fusion (raster) créée avec BioDispersal
- Connexité des tâches: 8 connexité*
- Code habitat: 25 (équivalent aux plans d'eau)
- Code hors-zone: - 9999 (défini par BioDispersal)
- Superficie minimale=0.01ha et max 1000m

*"8-connexité" a été sélectionné par soucis de temps de travail sur le logiciel. Ce choix influence la définition des tâches mais permettra tout de même un résultat cohérent.

Le choix du **code habitat** est important, il est possible d'en sélectionner plusieurs mais ici seuls les plans d'eau sont définis comme tels. En effet, ils restent le milieu de vie privilégié pour les cistudes.

Enfin, le choix de la **capacité de dispersion** est assez difficile, selon la littérature la cistude peut effectuer jusqu'à 5 km. Néanmoins, dans l'étude il est souhaité montrer le déplacement moyen des individus pour réaliser leur cycle de vie. Par conséquent, une distance de **3 km** a été choisie, correspondant à une valeur de 269 coûts.

A la suite de la création du graphe, il est possible de calculer des **métriques destinées à caractériser la connectivité du graphe**. Il existe différents niveaux d'application de ces métriques:

- Les métriques globales caractérisent le graphe entier
- Les métriques par composante caractérisent la connectivité interne de chaque composante (ou sous-graphe)
- Les métriques locales caractérisent la connectivité de chaque élément du graphe, nœud ou chemins

Les résultats de chacune de ces métriques sont présentés dans la partie 2.2.

2. Résultats

A l'issue de ces manipulations, il a pu être produit différentes cartes afin de déterminer le territoire de la Cistude d'Europe en Centre-Val-de-Loire et son réseau écologique.

Toutes les figures ci-après ont été réalisées par l'auteurice à partir des données précisées en partie 1.

2.1. BioDispersal

La carte de friction générée sur BioDispersal se présente comme suit :

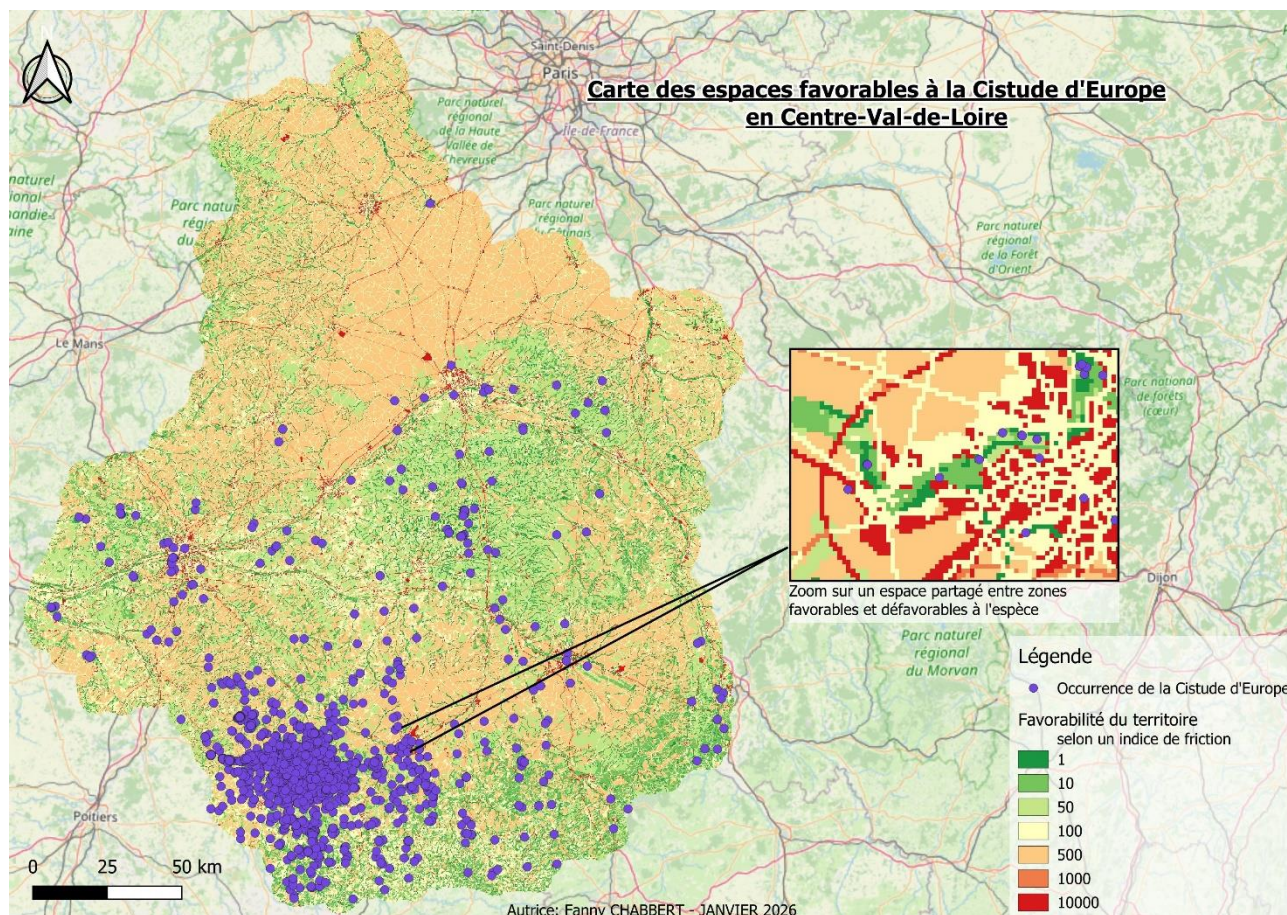


Figure 6 : Carte des espaces favorables à la Cistude d'Europe en région Centre-Val-de-Loire

Créée à partir des coefficients de friction choisis arbitrairement, cette cartographie montre que la présence de cistude est globalement sur des espaces qui lui sont favorables, ayant un indice de friction compris entre 1 et 10. Ces espaces sont logiquement les zones humides (marais, cours d'eau, plans d'eau) et des prairies ou milieux à végétation basse. On note que l'espèce est présente dans des milieux urbains, sous condition d'avoir des cours d'eau les traversant. Ceci signifie donc que les cours d'eau remplissent leur rôle de corridor écologique.

Globalement ce sont les départements situés sur la moitié sud qui lui sont les plus favorables, dont l'Indre où le foyer est le plus important. Il est possible d'imaginer des routes, des corridors reliant chaque point d'occurrence mais certains restent isolés. Une analyse par graphe écologique avec Graphab va permettre de modéliser précisément la connexion entre chaque habitat.

2.2. Graphab

La réalisation du graphe a déterminé de nombreuses composantes sur le territoire traduisant un espace fractionné (Figure 7). La quantité d'habitat apparaît assez importante, notamment le long de la Loire et dans le PNR de la Brenne. Ce constat fait écho à la distribution des individus observés, bien que les foyers soient moins dispersés sur la région. En effet, en reprenant la figure 6, il était notable l'absence de présence de la cistude sur la moitié Nord de la région alors que sur le graphe de nombreux habitats y sont présents. Ceci peut s'expliquer par le morcellement de la région. Chaque quadrilatère représente un réseau écologique, appelé composante, ses limites sont des infrastructures infranchissables pour l'espèce. Par conséquent, nous pouvons supposer que le fait que le territoire soit divisé ne permet pas à la cistude de rejoindre des lieux qui lui sont favorables.

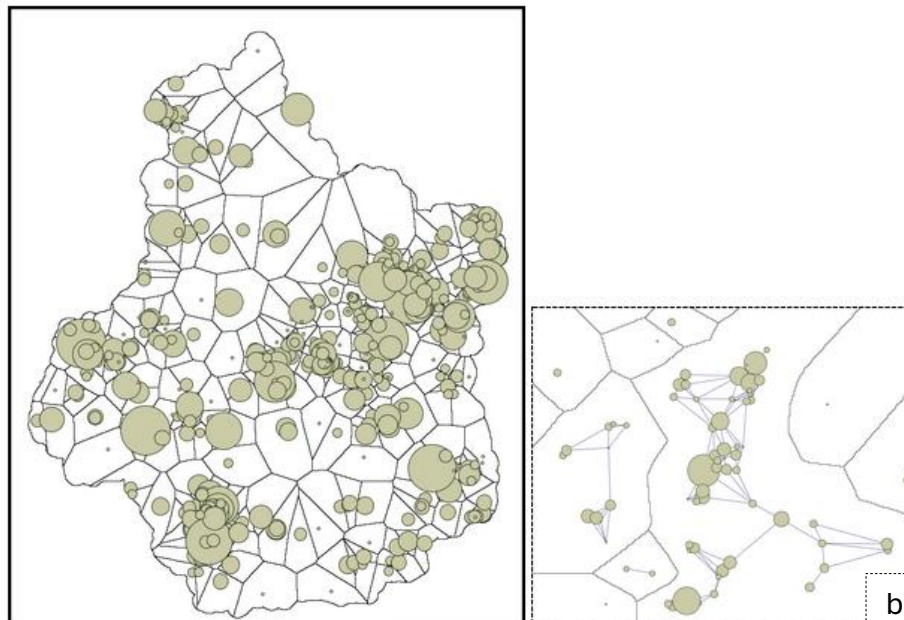


Figure 7: Graphe de la répartition des habitats (plans d'eau) de la Cistude d'Europe dans la région Centre-Val-de-Loire, selon une approche de réseaux écologiques

La figure 7b permet de mieux comprendre les relations et les séparations entre chaque habitat. Les nœuds les plus larges sont ceux ayant un potentiel démographique plus important, c'est-à-dire qu'ils peuvent accueillir beaucoup d'individus. Ceci a été calculé grâce à l'information donnée concernant la taille minimale de l'habitat lors de la construction du graphe, ici la taille minimale est égale à 0,01 ha. Chaque nœud est connecté à un autre si le territoire le permet. Il a été choisi de ne pas prendre en compte le coût maximal de déplacement de la cistude pour la création du graphe car il était souhaité de voir l'ensemble des liens existants entre les habitats. C'est donc un graphe non-seuillé.

2.2.1. Résultat des calculs des métriques

Pour calculer des métriques, deux paramètres sont nécessaires : la distance maximale pouvant être réalisée par l'espèce et la probabilité que les déplacements s'effectuent sous cette distance. Dans cette étude, il a été décidé qu'une distance de 3 km serait celle régissant les déplacements de la Cistude d'Europe, sous une probabilité de 95%.

Le graphe ci-après image la corrélation entre une distance en mètres et une distance en coût (Figure 8) pour cette étude. Il est visible que lorsque la distance métrique augmente alors le coût de déplacement augmente aussi, néanmoins les autres de grandeurs sont différents.

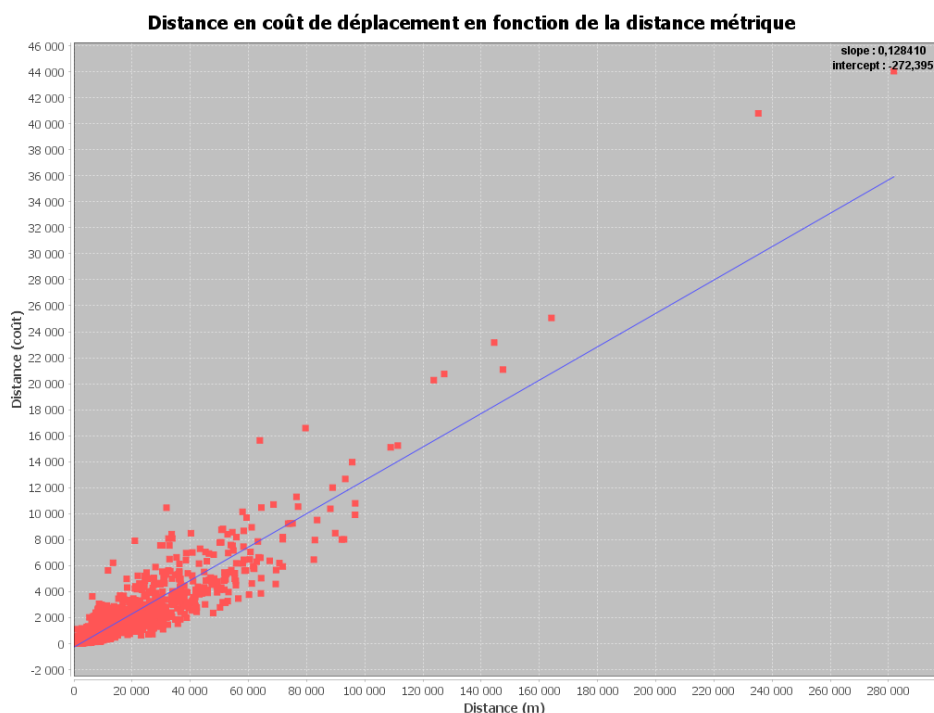


Figure 8 : Lien entre la distance en coût et la distance en mètre

Globale

L'intérêt de calculer des métriques globales est de comparer le niveau de connectivité au sein du réseau. Pour cette étude, il a été choisi de calculer la Connectivité équivalente (EC), indiquant la quantité d'habitat atteignable, en tenant compte de la surface d'habitat totale et des connexions entre les taches d'habitat.

- **Globale** : EC_d269_p0.05 : [1 888 935.44] pour p=0.05

P est la probabilité qu'un individu effectue ses déplacements en-deçà d'une certaine valeur. Ici, il a été choisi p=0,05 car il a été jugé par la littérature que la cistude effectuerait

effectivement la majorité de ses déplacements dans un rayon inférieur ou égal à 3km. Rappelons que d'après *Beau, 2019*, les cistudes femelles effectuent leur ponte à proximité immédiate de leur habitat voire à une centaine de mètres. Malgré cela, il arrive que certains individus doivent chercher plus loin l'endroit idéal pour leur nid, une distance cumulée de 2,7km a eu été parcourue par une femelle. Ainsi, il y a 95% de chance que l'espèce réalise des déplacements dans une distance de 3 km et 5% de chance de se déplacer au-delà.

Ce résultat peut être utilisé lors d'un projet d'aménagement afin de voir si les travaux influent sur la connectivité du territoire.

Par composante

Le **calcul de métrique par composante** permet d'évaluer la connectivité écologique au sein de chaque composante. Il est possible d'utiliser diverses approches pour étudier la connectivité. Dans le cadre de cette étude, il a été choisi d'utiliser la "Probabilité de connectivité" (PC) afin de voir si dans la composante deux individus pouvaient se croiser. Pour une distance en coût de 269 (=3 km) et une probabilité p de 0,05.

La carte suivante a été obtenue (figure 9).

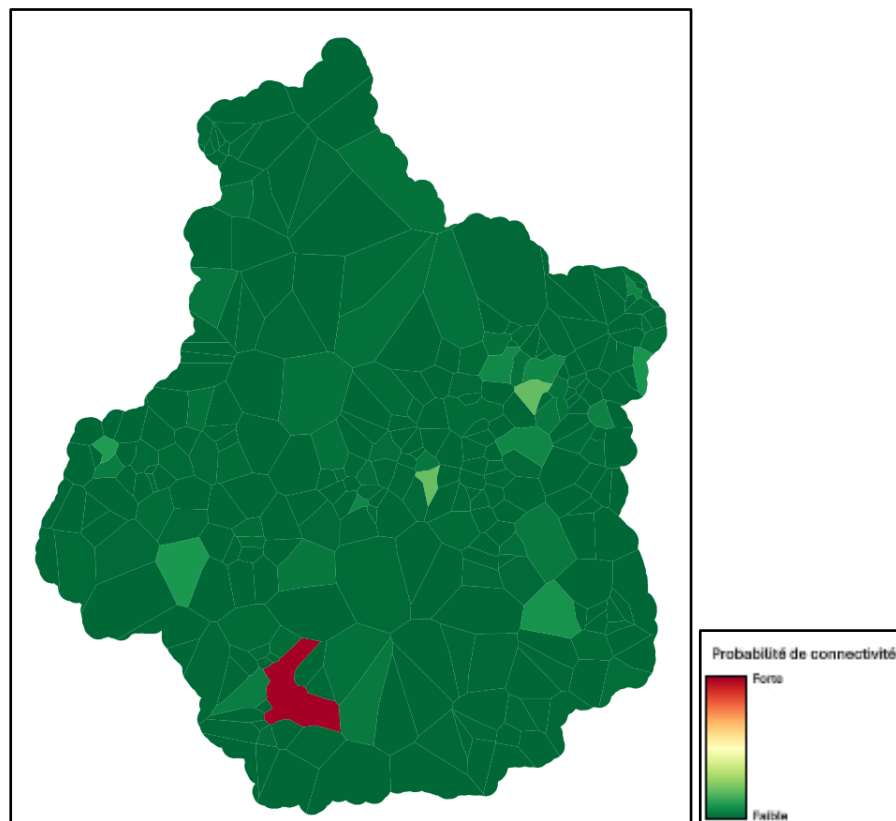


Figure 9: Résultat du calcul par composante selon la probabilité de connectivité

Il est visible que dans l'Indre et plutôt dans le PNR de la Brenne il y a une forte probabilité que deux individus se rencontrent (couleur rouge). Le vert signifie que la probabilité que deux individus entrent en contact est faible voire nulle. C'est généralement le cas dans les endroits où il n'y a pas d'habitat propice. Par conséquent, à part le sous réseau rouge, il y a seulement au Nord Est (Sud d'Orléans) où la probabilité augmente traduisant des territoires un peu connectés. Il serait alors intéressant de voir comment les habitats sont reliés entre eux au sein d'une composante.

Locale

Enfin une **analyse par l'habitat** a pu être effectuée afin de déterminer la place d'un réservoir de biodiversité au sein d'un réseau écologique. C'est une analyse structurale du graphe. Pour se faire, deux méthodes ont été utilisées:

- **Indice de centralité intermédiaire** (Betweenness Centrality) : il renseigne sur la place d'un nœud dans un réseau, c'est-à-dire combien il y a de chemins moindre coût qui passent par ce nœud-là (Figure10). La valeur de BC est forte pour:
 - o Un nœud s'il est traversé par beaucoup de chemins
 - o Un arc s'il peut être fréquemment utilisé par l'espèce

• Distance en coût=269

p=0.05

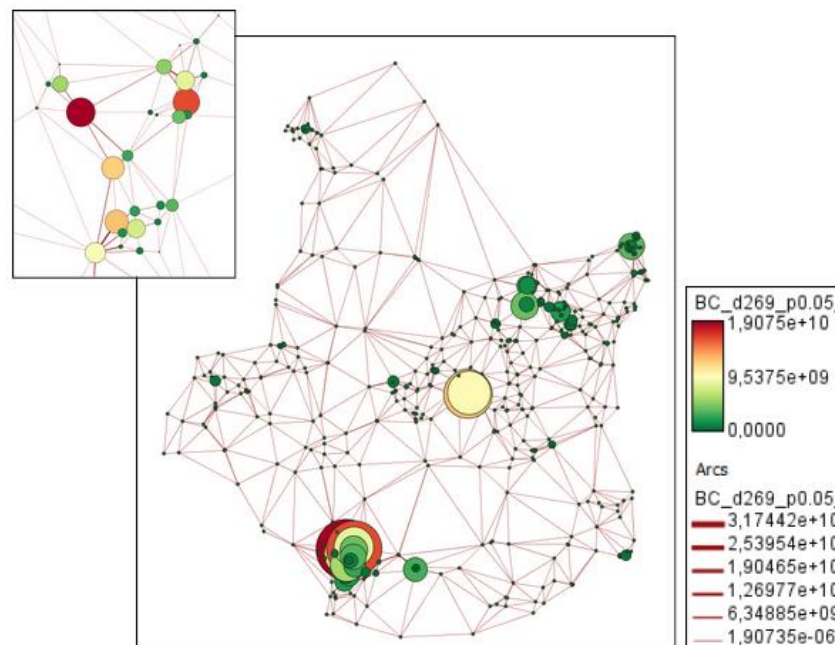


Figure 10: Résultat de l'indice de centralité intermédiaire (BC) dans la région Centre-Val-de-Loire

Dans le contexte de cette étude, la **centralité d'intermédierité (BC)** met en évidence les plans d'eau jouant un rôle structurant dans la connectivité globale du réseau d'habitats favorables

à la Cistude d'Europe. A travers ce graphe, il est renseigné le flux potentiel traversant un habitat et un arc: plus un habitat est rouge plus il est traversé par un grand nombre de plus courts chemins. Par conséquent, il y a une forte probabilité pour qu'ils soient utilisés, ils jouent le **rôle d'habitat relais** permettant des échanges entre sous graphes. De la même manière, plus un arc est épais plus il peut être utilisé par l'espèce pour se déplacer à l'intérieur de la composante, toujours selon les paramètres renseignés en entrée. C'est-à-dire que le chemin ne possède pas un coût très élevé. Dans le zoom à gauche, la tâche rouge est stratégique car elle permet de connecter des sous réseaux. Un fort enjeu de gestion émerge alors de cette analyse sur cette zone ; il est nécessaire de la préserver. Concrètement, les fortes valeurs font références aux plans d'eau et aux corridors les plus utilisés pour parcourir le réseau écologique au sein de la composante. Ils constituent des éléments clés pour la cohérence spatiale du réseau écologique.

Parallèlement, les **tâches vertes** correspondent à des habitats (plans d'eau) **peu reliés** au reste du réseau écologique. Néanmoins, ils jouent également un rôle important dans le graphe car il arrive que ce soit eux qui permettent le ralliement entre deux îlots d'habitat. Il faut donc préserver les chemins qui leur permettent d'être connectés et potentiellement créer de nouveaux habitats sur ces espaces.

Globalement, **peu d'habitat ayant une forte connectivité sont représentés** sur le graphe et les arcs ont en majorité une connectivité assez faible, c'est-à-dire qu'ils ne permettent pas de relier beaucoup d'habitats parce que leur utilisation engendre un coût trop élevé pour la cistude.

Enfin, à travers la figure 11, il est visible que plus la taille de l'habitat augmente plus sa connectivité croît. Ce modèle reste néanmoins assez relatif, puisque la pente est assez douce et qu'il y a de nombreux habitats à faible capacité mais ayant un BC très fort. C'est-à-dire qu'il existe des plans d'eau n'ayant pas une grande superficie pour pouvoir accepter de nombreux individus, néanmoins ils sont très connectés au réseau écologique.

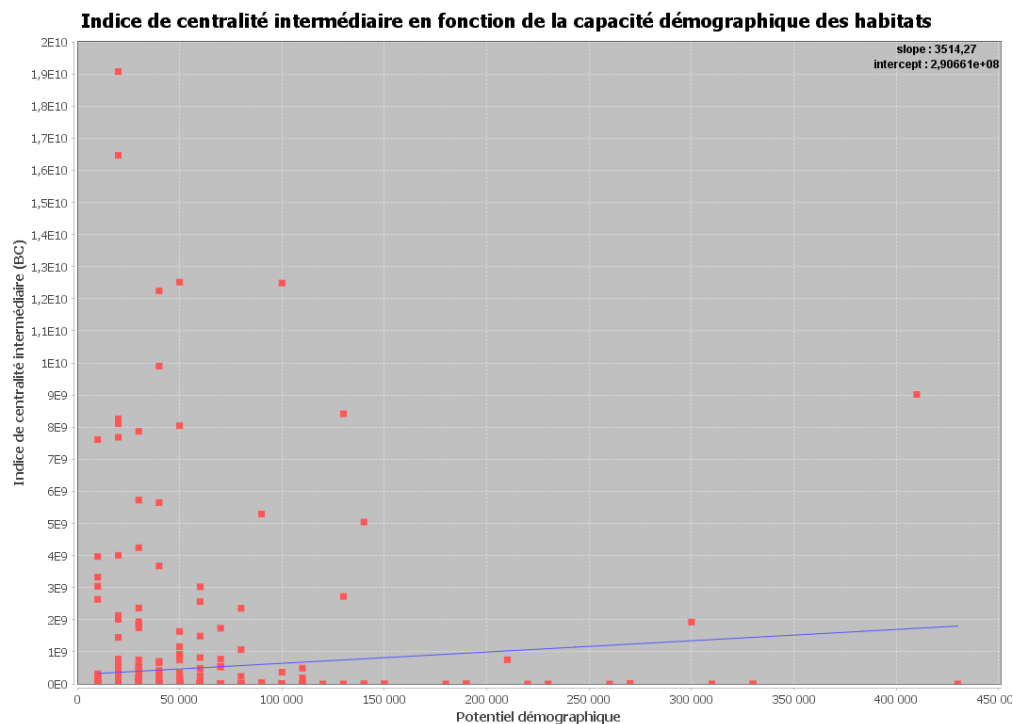


Figure 11: Nuage de points de l'indice de centralité intermédiaire en fonction de la capacité des habitats

- **Flux d'interaction (IF)** : cette mesure indique les interactions potentielles entre un habitat et tous les autres habitats du réseau, **c'est la capacité d'un habitat à échanger avec l'ensemble du réseau**. Il tient compte de la distance entre un nœud et tous les autres, et du potentiel démographique d'un habitat et des autres. La valeur d'IF pour un nœud est forte si :
 - Il a une forte capacité (=un fort potentiel démographique)
 - Il a beaucoup d'habitats proches
 - Les habitats proches ont eux-mêmes une forte capacité.
- Distance en coût =269 (=3km) $p=0.05$

Cette métrique fait ressortir le « cœur du réseau », c'est-à-dire les plans d'eau importants et bien connectés.

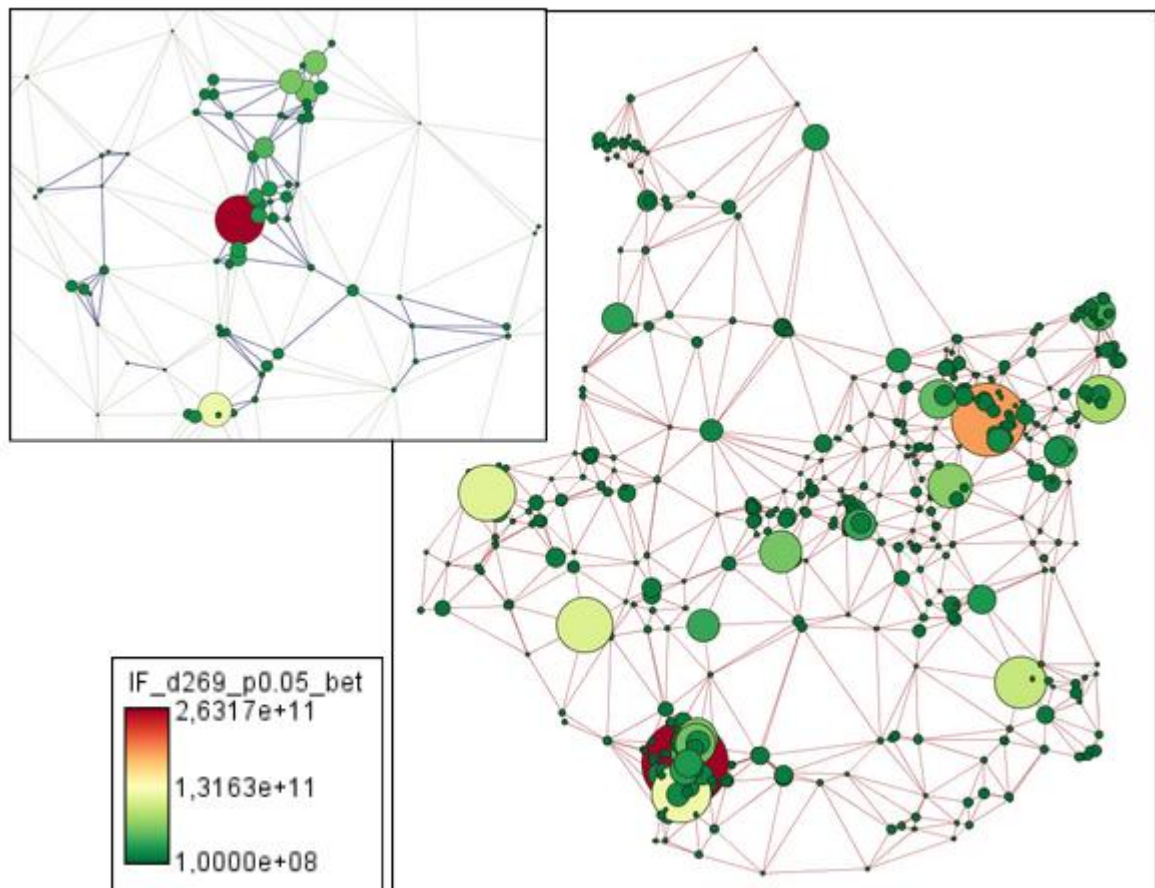


Figure 12: Résultat de la métrique flux d'interactions (IF) dans la région Centre-Val-de-Loire

Ce graphe permet de montrer les habitats les plus connectés et ayant une forte capacité. Cette fois-ci le résultat est un peu différent de la métrique BC, on peut y voir davantage de nœuds importants et des couleurs plus hétérogènes.

La métrique d'**Interaction Flux (IF)** met en évidence les habitats jouant un rôle majeur dans les échanges fonctionnels au sein du réseau de plans d'eau favorables à la Cistude d'Europe. Les valeurs élevées d'IF correspondent principalement à des ensembles de plans d'eau spatialement proches, formant des noyaux fortement connectés. Ces habitats combinent une position favorable dans le réseau et une forte probabilité d'interaction avec les autres nœuds, compte tenu du coût de déplacement retenu (269) et de la probabilité de dispersion ($p = 0,05$). Ils constituent ainsi des espaces clés pour le **maintien des échanges réguliers** entre les individus, notamment pour les déplacements quotidiens, la reproduction et la dispersion à courte distance. Contrairement aux habitats identifiés par la métrique de centralité d'intermédiarité, les nœuds à fort IF ne jouent pas nécessairement un rôle de relais entre sous-réseaux, mais **assurent avant tout la stabilité démographique locale**. Leur conservation est donc essentielle pour garantir la viabilité à long terme des populations et le fonctionnement écologique du réseau.

Enfin, à travers la figure 13, il est visible que plus la taille de l'habitat augmente plus son flux d'interaction croit. Ce constat est logique puisque l'IF est calculé notamment en fonction de la capacité des tâches. En le comparant avec la métrique BC, on observe une nette différence dans la pente et dans la dispersion des points. Ici, la pente est plus importante et les points se répartissent bien le long de droite montrant que celle-ci image correctement le comportement des habitats.

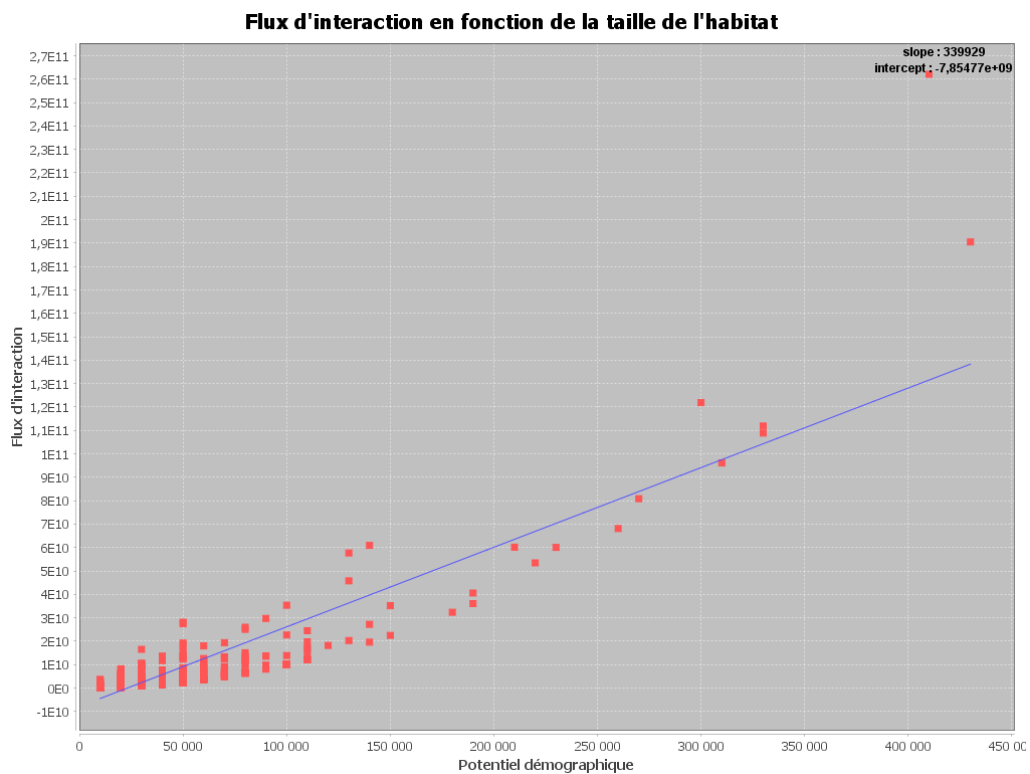


Figure 13: Nuage de points du flux d'interaction en fonction de la capacité des habitats

Pour terminer, le tableau récapitulatif ci-après permet de synthétiser les résultats obtenus pour les deux métriques locales.

Indice de centralité intermédiaire (BC)	Flux d'interaction (IF)
Rôle de pont, de déplacement	Rôle de noyau fonctionnel
Peu de nœuds très connectés	Plusieurs nœuds importants
Sensible à la fragmentation	Sensible à la qualité + proximité des habitats
Priorité pour corridors	Priorité pour maintien des populations
Intéressant dans le cadre d'une étude de migration à échelle moyenne à large	Intéressant pour une étude à échelle locale

Tableau 3: Récapitulatif des utilités des métriques BC et IF

La comparaison des métriques de centralité d'intermédiarité (BC) et de Flux d'Interaction (IF) met en évidence des rôles fonctionnels complémentaires au sein du réseau de plans d'eau favorables à la Cistude d'Europe. La **BC identifie un nombre restreint d'habitats** jouant un rôle de relais indispensable à la connectivité globale, en assurant la liaison entre différents sous-réseaux. À l'inverse, la **métrique IF** souligne l'importance des ensembles d'habitats fortement connectés localement, contribuant principalement à maintenir des **échanges fréquents** et ainsi, à une stabilité démographique des populations. Certains plans d'eau présentent des valeurs élevées pour l'une des deux métriques seulement, traduisant une dissociation entre rôle de passage et importance fonctionnelle locale.

Cette analyse souligne l'intérêt de mobiliser ces indicateurs pour des travaux ayant des objectifs différents. Il semble que l'utilisation de l'indice de centralité intermédiaire serait intéressante dans le cadre d'une étude de migration afin de mettre en lumière les corridors de moindre coût et les habitats relais permettant à l'espèce de s'y installer temporairement. Cet indice identifie les habitats structurants pour la connectivité paysagère. En parallèle, l'utilisation du flux intermédiaire est intéressante pour une analyse plus locale et ayant des coûts de déplacement relativement faible, comme ici. Les habitats identifiés par cette métrique sont ceux essentiels au fonctionnement écologique et à la viabilité à long terme du réseau.

2.3. Proposition de gestion

Rappel de l'objectif 3: le dernier objectif est de proposer des mesures de gestion permettant une meilleure connectivité entre les habitats. Nous pouvons supposer qu'en créant des espaces favorables à l'espèce et en ouvrant des corridors écologiques, la connectivité de son territoire devrait s'améliorer.

Dans le but de parfaire l'analyse concernant la connectivité du réseau écologique de la Cistude d'Europe dans la région Centre-Val-de-Loire, il est intéressant d'aborder la thématique de la gestion du territoire. Il peut être supposé que l'ajout d'habitat pour la cistude permettrait d'augmenter la connectivité de son espace vital. Une deuxième supposition serait de proposer des passages privilégiés entre les espaces fragmentés.

2.3.1. Ajout d'habitats favorables à la Cistude d'Europe

Le logiciel Graphab permet d'ajouter des tâches au graphe dans le but d'en augmenter sa connectivité, que ce soit à l'échelle d'une composante ou à l'échelle globale.

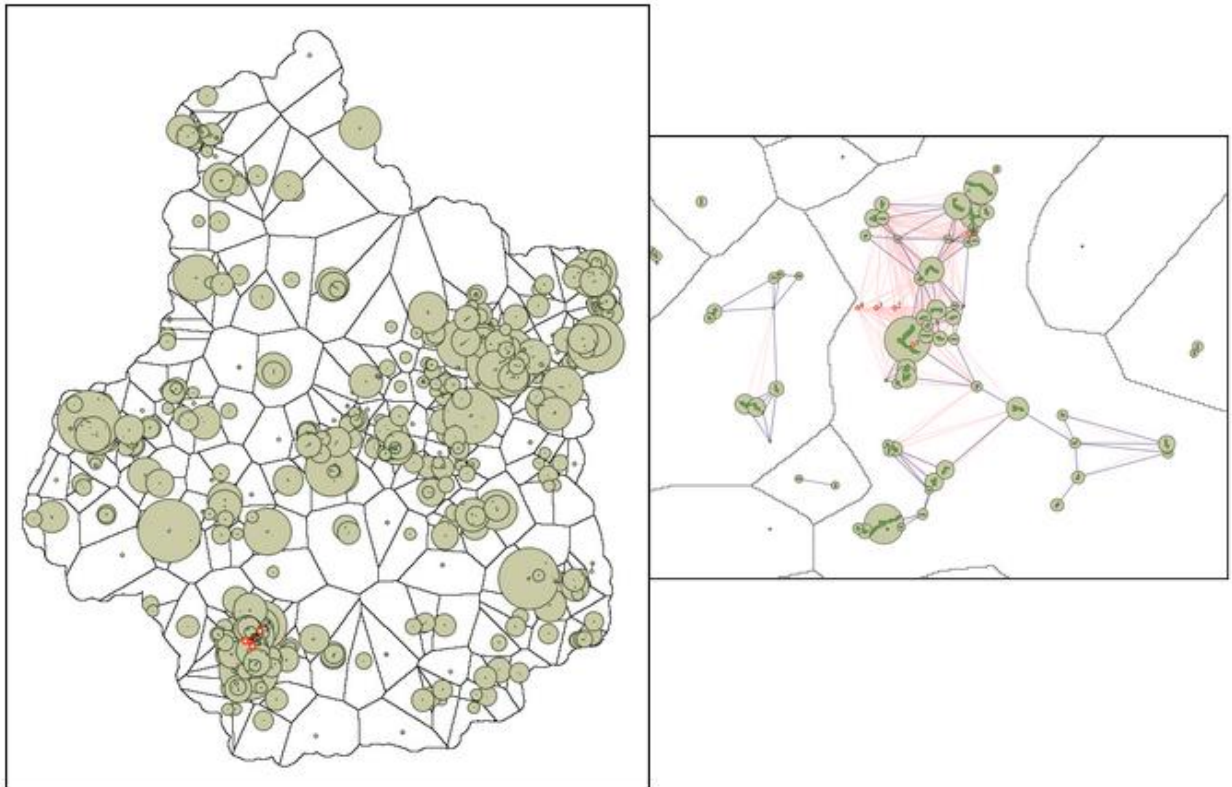


Figure 14: Graphe paysager avec ajout de cinq taches visant l'amélioration de la connectivité de la région Centre-Val-de-Loire pour la Cistude d'Europe

L'ajout des cinq tâches se situe majoritairement dans un secteur stratégique, correspondant au PNR de la Brenne, identifié précédemment comme un espace clé pour la continuité écologique de *Emys orbicularis*. Le graphe de droite offre un zoom sur cette zone d'intervention et met en évidence l'effet local de ces nouvelles tâches. Une augmentation du nombre de liens entre les nœuds existants est observée, traduisant une amélioration de la connectivité fonctionnelle du sous réseau.

D'après la configuration du réseau, leur ajout semble cohérent en raison de la quantité d'habitat présent à cet endroit et de la connectivité déjà bien présente, mais leur effet reste majoritairement **local plutôt que régional**. Les nouvelles tâches se situent dans une zone déjà relativement riche en habitats, mais où certaines tâches étaient faiblement connectées ou jouaient un rôle secondaire. En ce sens, elles agissent comme des **taches relais**, en densifiant le réseau et en multipliant les chemins possibles entre habitats proches (cf. Partie 2.b. Indice de centralité intermédiaire). Par ailleurs, en reliant ce résultat à la carte d'occurrence de la Cistude d'Europe, il est visible que l'enjeu de conservation est important dans cette zone qui accueille la majeure partie des individus.

À l'échelle locale (PNR de la Brenne), l'effet est indéniable : il est visible une **augmentation du nombre de liens**, une **réduction des distances fonctionnelles** et une **meilleure intégration des taches** auparavant périphériques. Pour une espèce comme la Cistude d'Europe, dont les déplacements restent limités et dépendants de la continuité des zones humides, cette amélioration locale peut avoir un **impact écologique réel**, notamment pour la dispersion lors des périodes d'assec, les échanges génétiques et la résilience des populations.

En revanche, à l'échelle du territoire régional, l'effet sur la connectivité globale semble plus **discret**. Les cinq nouveaux habitats ne créent pas de nouveaux grands axes de connexion entre des ensembles jusque-là isolés, ni de ponts entre composantes distinctes du graphe. **Ils renforcent surtout une zone déjà fonctionnelle, sans résoudre les discontinuités plus larges liées à la fragmentation du paysage ailleurs dans la région.**

Le graphe ci-après illustre ce propos ; l'ajout de tâche augmente progressivement la connectivité des habitats (Figure 15).

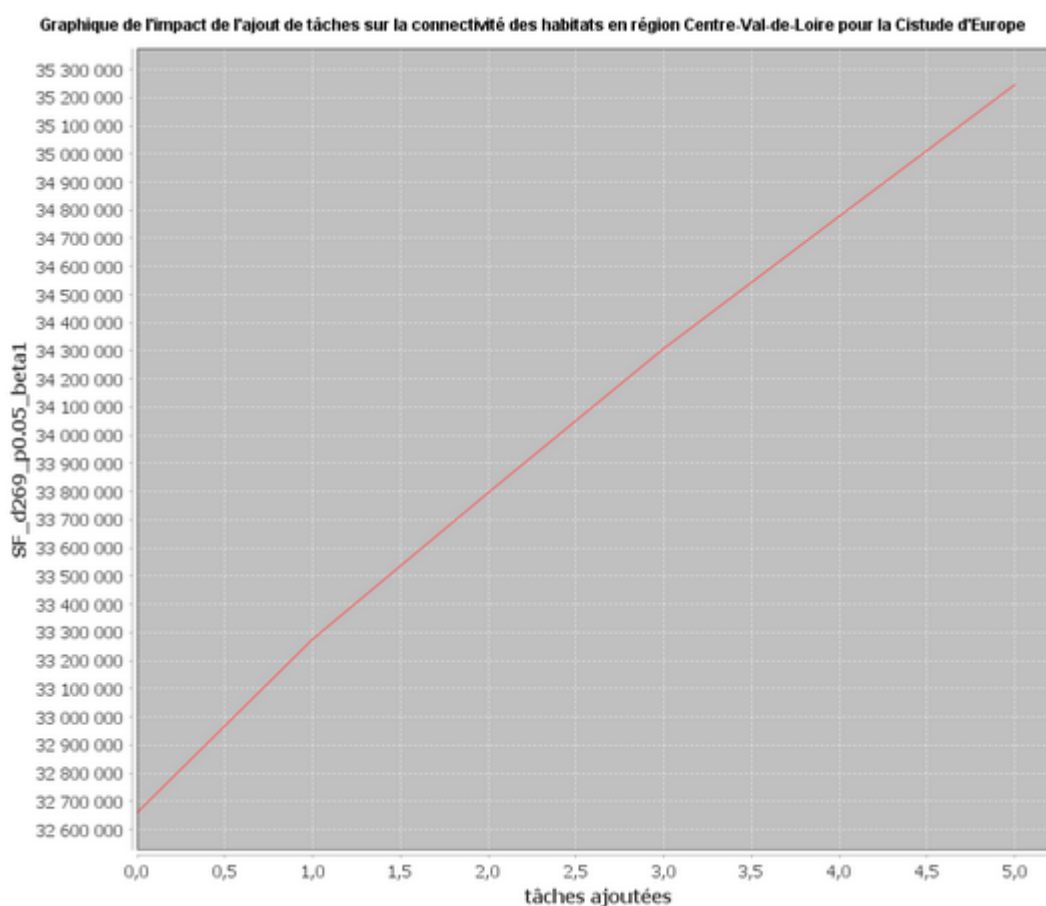


Figure 15: Traduction sous forme de nuage de points de l'ajout de tâche face à la connectivité du graphe

La progression est linéaire mais pas exponentielle, c'est-à-dire que l'ajout de tâches améliore graduellement la connectivité du site d'étude.

Par conséquent, il peut être déduit de cette analyse que des actions ciblées localement peuvent être efficaces. Néanmoins, il est nécessaire de combiner ceci à d'autres stratégies de conservation et préservation de l'espèce et de son habitat pour agir à plus grande échelle.

2.3.2. Mise en place de passage à faune

Une deuxième proposition de gestion serait de mettre en place des passages à faune au niveau des infrastructures rompant la continuité de l'habitat de la cistude.

Ces infrastructures nécessitent de connaître les déplacements précis de l'espèce, les éléments fragmentant son territoire et les ouvrages utilisables adaptés. L'objectif pourrait être de permettre à la cistude de rejoindre les habitats présents au Nord de la région Centre-Val-de-Loire, bien que très peu d'observation y aient été constatées, mais aussi d'assurer la sécurité des déplacements au sein d'une petite zone du territoire.

Dans les zones foyers de la cistude (PNR de la Brenne notamment), les risques associés aux déplacements existent et augmentent lors des périodes d'assecs des étangs. Rappelons que le parc accueille une forte activité de pisciculture induisant une certaine gestion des plans d'eau. Par conséquent, lorsque ces espaces sont vidés, ou du moins en partie, les cistudes migrent vers un autre étang ; c'est à ce moment-là que le risque d'écrasement par un véhicule ou un humain est le plus présent. Il est même évoqué une "chute du taux de survie en Brenne" lors des transitions d'un étang à un autre (Beau, 2019). Par conséquent, des mesures de gestion du paysage sont nécessaires à travers la mise en place de passage à faune ou de barrières sur les axes routiers trop important pour être franchissables de manière sécurisée.

La mise en place de passage à faune demande deux éléments : l'ouvrage permettant le passage et des barrières guidant les individus à se rendre vers celui-ci. Diverses études sont menées à ce sujet afin de déterminer quels ouvrages sont les plus adaptés à une espèce et quelles barrières sont infranchissables. Un document du Cerema [2], référence et synthétise ces informations là ; pour l'herpétofaune et notamment pour les tortues, une barrière en plastique, lisse serait infranchissable (figure 16) et permettrait de guider l'individu vers le passage à faune (tunnel ou pont).



Figure 16: Bordure incurvée en plastique recyclé (Cerema 2021, d'après Groupe ACO)

Une étude approfondie sur les déplacements des cistudes dans la région permettrait de déterminer les lieux à enjeux forts pour assurer la sécurité des individus. Cela nécessiterait de connaître parfaitement les lieux de passage des tortues d'un bassin à un autre, voire à travers la région. Toutefois, un suivi exhaustif des déplacements supposerait l'équipement de chaque individu en balises GPS, une méthode qui reste difficilement envisageable d'un point de vue technique, financier et éthique. Il est néanmoins essentiel de déterminer si les déplacements de l'espèce s'effectuent principalement par voie terrestre, aquatique ou selon une combinaison des deux, afin d'adapter le type de passages à faune mis en place (ouvrages terrestres, aquatiques ou mixtes).

Par ailleurs, un suivi régulier des passages à faune apparaît indispensable. Celui-ci permettrait de:

- Évaluer leur utilisation: est ce qu'ils sont beaucoup utilisés ou non et les améliorer en conséquence,
- Vérifier leur état: il arrive que sous l'effet du développement de la végétation, du passage d'autres animaux ou des conditions météorologiques, certains ouvrages ou barrières se détériorent (Cerema, 2021).

La conception et la gestion de ces passages à faune doivent impérativement prendre en compte les autres espèces présentes sur le site. Les ouvrages ne doivent pas constituer un obstacle ou un risque pour la faune locale, ce qui nécessite une connaissance préalable des espèces concernées et de leurs modalités de déplacement, dans une logique de gestion intégrée des continuités écologiques.

CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif de modéliser la distribution de la Cistude d'Europe (*Emys orbicularis*) et d'analyser la connectivité de ses habitats favorables dans la région Centre-Val-de-Loire. À travers une analyse combinant données d'occurrence, occupation du sol et outils de modélisation spatiale, cette étude a permis de mieux comprendre les relations entre structure paysagère, répartition des habitats et capacités de déplacement de l'espèce.

Les résultats mettent en évidence une **distribution très contrastée** de la Cistude d'Europe à l'échelle régionale, avec un foyer majeur localisé dans le Parc Naturel Régional de la Brenne, en cohérence avec la forte densité de plans d'eau et de zones humides favorables. À l'inverse, bien que des habitats potentiels soient présents dans d'autres secteurs de la région, notamment au nord, la fragmentation du paysage limite fortement leur accessibilité et explique probablement l'absence ou la rareté d'observations dans ces zones. L'analyse par graphes écologiques a confirmé cette fragmentation, révélant un réseau constitué de **nombreuses composantes peu connectées entre elles**. Par conséquent, dans un monde en évolution et notamment face au changement climatique et à ses conséquences sur les milieux naturels, la structure du paysage ne permet pas une migration sécurisée de la Cistude d'Europe. L'analyse par l'indice de centralité intermédiaire prouve que si les individus sont amenés à se déplacer au-delà de leur foyer, ils se heurteront à des éléments infranchissables (routes par exemple).

Des mesures de gestion sont donc proposées, comme l'**ajout d'habitats favorables** afin d'améliorer la connectivité du territoire, en particulier à l'échelle locale, comme dans le PNR de la Brenne. Toutefois, cette action doit être complétée par des mesures structurelles, notamment la **sécurisation des déplacements** via des passages à faune adaptés et une meilleure prise en compte de l'espèce dans l'aménagement des infrastructures et la gestion des paysages agricoles et piscicoles. De plus, une protection législative des habitats de la Cistude d'Europe permettrait d'éviter leur destruction et bénéficierait à d'autres espèces, bien que le PNA agisse en ce sens.

Certaines **limites méthodologiques** doivent être soulignées. Les coefficients de friction des éléments structurants le paysage ont été attribués de manière arbitraire et pourraient être affinés par des données issues du suivi de terrain. De même, le choix d'une résolution spatiale de 100 mètres et d'une distance de dispersion moyenne de 3 km influence les résultats et mériterait d'être testé dans des scénarios alternatifs. Enfin, l'intégration de données comportementales plus fines sur les déplacements terrestres et aquatiques de la Cistude d'Europe renforcerait la robustesse des modèles.

En définitive, cette étude met en évidence l'intérêt de la Cistude d'Europe comme espèce déterminante pour l'analyse et la gestion des continuités écologiques. En protégeant ses habitats et en améliorant leur connectivité, ce sont l'ensemble des zones humides et des espèces associées qui bénéficient de ces actions.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Beau, F. (2019). Ecologie de la Cistude d'Europe "Emys orbicularis" en Brenne : histoire de vie des nouveau-nés et influence des modes de gestion sur les populations. Sciences agricoles. Université de La Rochelle. Français. ffNNT : 2019LAROS024ff. fftel-02996697
- [2] Cerema. (2021). *Les passages à faune. Préserver et restaurer les continuités écologiques, avec les infrastructures linéaires de transport*. Bron : Cerema, 2021. Collection : références. ISBN : 978-2-37180-525-5 (pdf)
- [3] Clarté P., Pinet F. & D'Amico F. (2020). — *Importance des habitats terrestres dans la dynamique d'occupation d'Emys orbicularis (Linnaeus, 1758) sur le site Natura 2000 « Grande Brenne »*. *Naturae* 2020 (4): 71-84. <https://doi.org/10.5852/naturae2020a4>
- [4] Clauzel, C. et Bonnevalle, C. (2019). « Apports de la modélisation spatiale pour la gestion de la trame verte et bleue ». *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- [5] Clauzel C., Gaber C., Godet C., (2020). *Fiches méthodologiques pour la prise en main de Graphab*. LADYSS-SNPN
- [6] Communauté de commune Vallée de l'Hérault. (2012). *Cahiers d'habitats Natura 2000 – Cistude*. <https://valleeherault.n2000.fr/gorges-de-l-herault/especes>
- [7] *Etude Cistude d'Europe | Réserve de Chérine*. <http://www.reserve-cherine.fr/fr/pages/etude-cistude-d-europe>. Consulté le 06/01/2026.
- [8] Foltête, J.-C., Vuidel, G., Savary, P., Clauzel, C., Sahraoui, Y., Girardet, X., & Bourgeois, M. (2021). Graphab : An application for modeling and managing ecological habitat networks. *Software Impacts*, 8, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2021.100065>
- [9] Liuzzo, M., Spada, A., Facca, C., Borella, S., Malavasi, S. (2024). *Nesting habitat characteristics and predation patterns in the European pond turtle Emys orbicularis (L., 1758): Implications for management and conservation measures*, *Global Ecology and Conservation*, Volume 52, e02975, ISSN 2351-9894, <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e02975>.
- [10] M. Kuhn, I., Quintard, B., Theissinger, K., Georges, J.Y. (2025). *Trophic interactions between the European pond turtle (Emys orbicularis) and invasive non-native species*. *NeoBiota*, Volume 100, Pages 281-303, ISSN 1619-0033. <https://doi.org/10.3897/neobiota.100.147371>.

[11] Maran, J. & Frétey, T. (2023) *Les tortues terrestres et d'eau douce, autochtones et introduites, de France métropolitaine : état des connaissances et clé de détermination illustrée*. *Herp me!*, 5: 1- 172. ISSN 2724-9468. DOI : 10.48716/herpme.5
<https://lashf.org/wp-content/uploads/2023/06/HERP-ME-05-Tortues-de-France-WEB.pdf>

[12] Plan National d'Actions en faveur de la Cistude d'Europe (*Emys orbicularis*) 2020-2029. Société Herpétologique de France. Ministère de la Transition Écologique et Solidaire.
[pna_ii_cistude_2020-2029_v3_02.03.20_.pdf](#)

[13] QGIS.org, 2026. QGIS Geographic Information System. QGIS Association.
<http://www.qgis.org>

Directeur de recherche :

Robin FURET

Fanny CHABBERT

PRI / DAE5

ADAGE

2025-2026

Modélisation de la distribution et de la connectivité des habitats de la Cistude d'Europe (*Emys orbicularis*) en région Centre-Val de Loire

Résumé :

La Cistude d'Europe *Emys orbicularis* est une tortue d'eau douce présente en France et notamment dans la région Centre-Val-de-Loire, où elle est menacée par la destruction de ses habitats, la dégradation des milieux naturels et les pratiques de gestion agrico-piscicoles. L'objectif de l'étude est de modéliser sa distribution et la connectivité de ses habitats dans la région. Des données d'occurrence ont été mobilisées afin de déterminer quels milieux étaient les plus utilisés : les plans d'eau, marais ou prairies non agricoles. Ensuite, à partir de ce constat, les zones favorables à son implantation ont été identifiées afin de pouvoir établir un graphe écologique modélisant la connectivité entre de ces habitats. Il est apparu que la région Centre-Val-de-Loire est très fragmentée pour une telle espèce, ne permettant pas de longs déplacements. Divers plans d'eau sont reliés entre eux mais dans le cas où une migration sur plus de 5 km devrait avoir lieu, l'espèce devrait traverser des zones inappropriées voire dangereuses. Par conséquent, il apparaît qu'avec une augmentation de la surface d'habitat propice à la Cistude d'Europe et la création ou densification de corridors écologiques (passage à faune notamment), la viabilité de la population de la région serait un peu plus sécurisée. Il apparaît cependant qu'une vision globale de l'écosystème doit être adoptée pour gérer durablement les espaces naturels et les individus qui y évoluent.

Mots Clés : Cistude d'Europe - Réseaux écologiques - Connectivité écologique - Théorie des graphes - Potentiel de dispersion - Etude régionale