

Le Triton crêté en basse vallée du Rhône

Recherche de populations, méthodes de suivi et caractérisation
des habitats



© Julien Renet

Eliot UGNON-COUSSIOZ

Célia Grillas | Julien Renet

Emilien Luquet

Master 2 BEEB - Printemps 2017



Remerciements

A mes encadrants de stage, Célia Grillas, Chargée de mission Natura 2000 au Parc Naturel Régional de Camargue, et Julien Renet, Chargé de mission Herpétologie au Conservatoire d'Espaces Naturels de la région PACA, pour m'avoir permis de réaliser le stage que je désirais le plus décrocher, pour leur gentillesse et pour tout ce que j'ai appris grâce à eux pendant ce stage.

A la Compagnie Nationale du Rhône sans qui cette étude n'aurait pas pu voir le jour.

A mon responsable de formation, Sylvain Dolédec du LEHNA, pour tout ce que j'ai pu apprendre durant ses cours depuis ma licence, pour son écoute et ses conseils avisés.

A mon tuteur pédagogique, Emilien Luquet du LEHNA, pour ses réponses à mes questions et son soutien tout au long de ce stage.

A toute l'équipe du Parc Naturel Régional de Camargue, et tout particulièrement aux colocataires du bureau Natura 2000, Stephan Arnassant, David Lazin et Katia Lombardini, pour leur accueil, leur générosité et leur bonne humeur.

A tous les stagiaires du Parc Régional de Camargue pour tous les moments de convivialité et d'amitié passés ensemble.

A Pauline Priol, consultante scientifique en dynamique des populations, pour m'avoir accordé de son temps pour me permettre de découvrir les sites de La Capelle et d'y récupérer des données, pour sa gentillesse et son énergie.

A Jean-Paul Lena, du LEHNA, pour son œil avisé sur la planification expérimentale de cette étude.

A Anthony Olivier, de la Tour du Valat, pour son expertise sur les sites de Tourtoulou.

A tous ceux qui ont participé aux réunions préliminaires à l'étude, de près ou de loin, pour leurs propositions, pour leurs expertises et leur soutien envers ce projet. A Vincent Marty de l'AFB pour le prêt gracieux de matériel de terrain et à Olivier Scher pour ses propositions de sites à prospecter.

A ma famille et mes amis, loin des yeux mais près du cœur.

A Louise, que j'aime plus que tout.

Table des matières

1.	Introduction.....	1
2.	Matériel et méthodes.....	6
2.1.	Présentation de la zone d'étude : la basse vallée du Rhône.....	6
2.2.	Méthodes de détection du Triton crêté.....	7
2.2.1.	La capture au troubleau.....	7
2.2.2.	Les pièges Ortmann.....	7
2.2.3.	Les nasses à poissons.....	8
2.2.4.	L'ADN environnemental (ADNe).....	9
2.3.	Plan expérimental.....	9
2.3.1.	Zones rhodaniennes : « Beaucaire Sud & Ouest », « Camargue » et « Pujaut ».....	9
2.3.2.	Zone « La Capelle ».....	10
2.3.3.	Précautions sanitaires.....	10
2.4.	Données collectées et analyses.....	10
2.4.1.	Le HSI : L'Indice de Pertinence des Habitats du Triton crêté.....	11
2.4.2.	Autres variables relevées.....	11
2.4.3.	Analyse des caractéristiques d'habitats.....	11
2.4.4.	Analyse de l'évolution de l'occupation des sols entre 1990 et 2012.....	12
2.5.	Une approche expérimentale complémentaire : comparaison de l'efficacité des nasses à poissons.....	12
3.	Résultats.....	13
3.1.	Zones rhodaniennes : « Camargue », « Beaucaire Sud & Ouest » et « Pujaut ».....	13
3.1.1.	Résultats des prospections et de l'ADNe.....	13
3.1.2.	Résultats de l'Indice de Pertinence des Habitats du Triton crêté (HSI).....	13
3.1.3.	Résultats de l'Analyse Factorielle de Données Mixtes (AFDM).....	14
3.1.4.	Classification des sites en fonction de leurs caractéristiques.....	16
3.1.5.	Résultats de l'analyse de l'évolution de l'occupation des sols.....	18
3.2.	Zone « La Capelle ».....	19
3.2.1.	Résultats des prospections au troubleau.....	19
3.2.2.	Résultats de l'Indice de Pertinence des Habitats du Triton crêté (HSI).....	19
3.2.3.	Résultats de l'Analyse Factorielle de Données Mixtes (AFDM).....	20
3.2.4.	Classification des sites en fonction de leurs caractéristiques.....	21
3.3.	Comparaison des Indices de Pertinence des Habitats du Triton Crêté (HSI) entre les sites rhodaniens et « La Capelle ».....	23
3.4.	Résultats de la comparaison d'efficacité des nasses à poissons.....	24
4.	Discussion.....	24

4.1. Résultats des prospections, caractérisation et structuration des milieux étudiés	24
4.2. L'Indice de Pertinence des Habitats du Triton crêté (HSI) en limite sud d'aire de répartition : quels constats ?	26
4.3. Biais méthodologiques, difficultés et singularités du contexte méditerranéen	28
4.4. Actions à mener : quel avenir pour le Triton crêté dans la basse vallée du Rhône ?	29
5. Conclusion.....	30

1. Introduction

La biodiversité terrestre est d'une richesse telle qu'il serait facile de la penser inépuisable. Dans les faits, l'activité humaine est la cause principale du déclin généralisé de biodiversité constaté aujourd'hui, et pourrait être responsable de la disparition de la moitié des espèces animales et végétales d'ici à la fin du XXI^{ème} siècle (Wilson 2003; Butchart *et al.* 2010).

D'après l'Indice Planète Vivante établi par le WWF, l'effectif mondial des populations de vertébrés a chuté en moyenne de 58 % entre 1970 et 2012. Cette valeur pourrait atteindre les 67 % d'ici à 2020. Par ailleurs, les populations de vertébrés résidant en système d'eau douce semblent particulièrement impactées puisque 81 % d'entre elles se sont effondrées contre respectivement 38 % et 36% des populations des systèmes terrestres et marins (WWF 2016). De tous les vertébrés tétrapodes, la classe des amphibiens est la plus concernée par cette extinction de masse. En effet, leurs cycles de vie mêlant phases terrestres et aquatiques démultiplient les risques liés à la destruction et la fragmentation de leurs habitats. De plus, la grande perméabilité de leurs peaux les rend particulièrement vulnérables à la pollution chimique des milieux aquatiques et à la propagation des maladies (Bishop *et al.* 2012). Au total, un tiers des espèces d'amphibiens seraient menacées de disparition à l'échelle de la planète (Stuart 2004). Selon certaines estimations, le rythme actuel des processus d'extinction des amphibiens serait même 25000 à 45000 fois supérieur au taux d'extinction attendu dans un contexte normal (McCallum 2007). La situation est tout aussi préoccupante en France que dans le reste du monde. En effet, la tendance d'évolution des populations d'amphibiens est à la baisse pour 60% des espèces sur le territoire (UICN France, MNHN & SFH 2015).

Afin d'appréhender les processus de disparition des amphibiens à travers le monde, une approche multifactorielle prenant en compte les interactions entre facteurs de déclin doit être adoptée (Collins & Storfer 2003; Storfer 2003). Ces facteurs sont de natures diverses (destruction et fragmentation des milieux naturels, pollutions chimiques, introduction d'agents pathogène et d'espèces allochtones, radiation UV-B, changement climatique, ...). Leurs associations et interactions sont susceptibles d'affecter le développement, la survie, et la reproduction des amphibiens (Alford & Richards 1999; Pounds 2001; Beebe & Griffiths 2005). A titre d'illustration, la chytridiomycose causée par le champignon *Batrachochytrium dendrobatidis* menace une majeure partie des espèces d'amphibiens dans le monde (Rödder *et*

al. 2009) et semble voir sa propagation accélérée par le changement climatique et l'activité humaine (Weldon *et al.* 2004 ; Pounds *et al.* 2006). De la même façon, la mise en culture de sols à proximité d'habitats d'amphibiens est susceptible d'entraîner le ruissellement de pesticides, herbicides et engrais. Leur synergie démultiplie alors les effets délétères sur la santé des populations d'amphibiens (Egea-Serrano *et al.* 2012).

Dans ce contexte de déclin généralisé, les populations situées en limite d'aire de répartition sont des réservoirs de diversité génétique cruciaux pour la préservation des espèces (Peterman *et al.* 2013). Toutefois, ces dernières sont susceptibles d'être plus sévèrement impactées que celles moins excentrées. En effet, de nombreuses études suggèrent que les fitness et abondances des populations les plus périphériques, fragmentées et d'étendue restreintes sont plus faibles que celles des autres, induisant une plus grande sensibilité à la stochasticité environnementale (perte d'habitat) et démographique (Sexton *et al.* 2009 ; Slatyer, Hirst & Sexton 2013). A ce jour, les mécanismes sous-jacents à ces dynamiques restent encore mal connus.

Cette vulnérabilité des populations excentrées pourrait concerner le Triton crêté, *Triturus cristatus* (Laurenti 1768) (Figure 1). Cet amphibien urodèle appartient à la famille des Salamandridae. Les adultes mesurent de 13 à 17 cm ce qui fait de cette espèce de triton l'une des plus grandes d'Europe (Francillon-Vieillot, Arntzen & Geraudie 1990; Bensettiti & Gaudillat 2002). Facilement identifiable à sa face ventrale jaune-orangée constellée de nombreuses tâches noires, le Triton crêté est doté d'une peau de coloration gris foncé tirant sur le noir sur les flancs et le dos. Son régime alimentaire est carnivore et essentiellement composé d'invertébrés aquatiques.

La période de reproduction se déroule au printemps et a lieu exclusivement en phase aquatique. A cette époque de l'année, le Triton crêté passe ses journées caché au fond de l'eau mais adopte la nuit un comportement de prospection vers les berges, à la recherche de nourriture et de partenaires sexuels (Dutton 2009). Il existe un fort dimorphisme sexuel à cette période : les mâles se parent d'une crête dorsale dentelée dans le but de séduire les femelles. La ponte a lieu dans la végétation aquatique afin de la protéger des prédateurs. Les larves se développent dans l'eau, puis se métamorphosent environ 3 mois après. Elles quittent le milieu aquatique au début de l'été comme les individus adultes. Les adultes et les juvéniles passent ensuite le reste de l'année en phase terrestre. L'hivernage se déroule à proximité du site de reproduction dans des trous à l'abri du gel, sous des souches d'arbres morts, dans les creux entre des rochers.



Figure 1 : Photographies de Triton crêté à différents stades : mâle adulte vue ventrale (a) femelle adulte vue dorsale (b) et stade larvaire (c).

Durant cette période, le Triton crêté adopte un mode de vie ralenti et cesse de se nourrir et de se déplacer (Geniez & Cheylan 2012). Les juvéniles de Triton crêtés atteignent la maturité sexuelle à l'âge de deux ans, tandis que l'espérance de vie moyenne de l'animal serait aux alentours de dix ans en plaine (Bensettiti & Gaudillat 2002). De par la nature de son cycle de vie, le succès reproducteur du Triton crêté requiert la présence d'eau sur une période pouvant s'étaler de mars à juillet. Ce dernier est donc étroitement lié à la quantité de précipitations tombées en hiver et au printemps, et les années sèches sont souvent synonymes de succès reproducteur mitigé. Dans le cadre d'une population isolée, la conséquence principale est une baisse des effectifs pouvant compromettre la pérennité de la population (Geniez & Cheylan 2012). La présence de poissons carnassiers dans les milieux aquatiques est également un facteur limitant du renouvellement des populations car les larves de Triton crêté évoluent en eau libre, ce qui les rend particulièrement vulnérables à la prédation (Dutton 2009).

Les Tritons crêtés forment généralement des métapopulations au sein de réseaux de zones humides interconnectées. Bien que les individus soient assez fidèles à leurs sites de reproduction, des échanges peuvent intervenir entre les différents points d'eau. Ces déplacements se déroulent principalement pendant les périodes pré-nuptiales ou post-nuptiales (Dutton 2009). Les distances parcourues varient grandement selon la qualité et la disponibilité de l'habitat mais sont généralement de l'ordre de plusieurs centaines de mètres (Bensettiti & Gaudillat 2002). Les populations de Triton crêté du Sud de la France étant fortement isolées et déconnectées, ce fonctionnement en métapopulation ne s'applique pas. La seule exception connue à ce jour est celle du réseau de zones humides de La Capelle-Masmolène (Gard) qui accueille plusieurs noyaux de populations de Triton crêté (Gendre & Rufroy 2005).

Les sites de reproduction du Triton crêté sont variés et comprennent les étangs, les mares, les prairies inondables, les rives de lacs, les fossés, les bras morts et les queues de lînes (Mermod *et al.* 2010). En basse vallée du Rhône, les sites pouvant potentiellement accueillir du Triton crêté sont peu nombreux. Il s'agit principalement de lînes du Rhône, de fossés, de roselières et de quelques mares et étangs artificiels.

En régression dans le sud de l'Europe (Gasc 2004; Edgar & Bird 2006; Denoël 2012), cette espèce présente également sur le territoire français un statut de conservation défavorable (« Quasi-Menacée », NT)(UICN France, MNHN & SFH 2015). L'extrémité sud de son aire de répartition française et mondiale se situe en basse vallée du Rhône (Figure 2). Bien que n'ayant fait l'objet d'aucune étude chorologique standardisée, les populations les plus méridionales

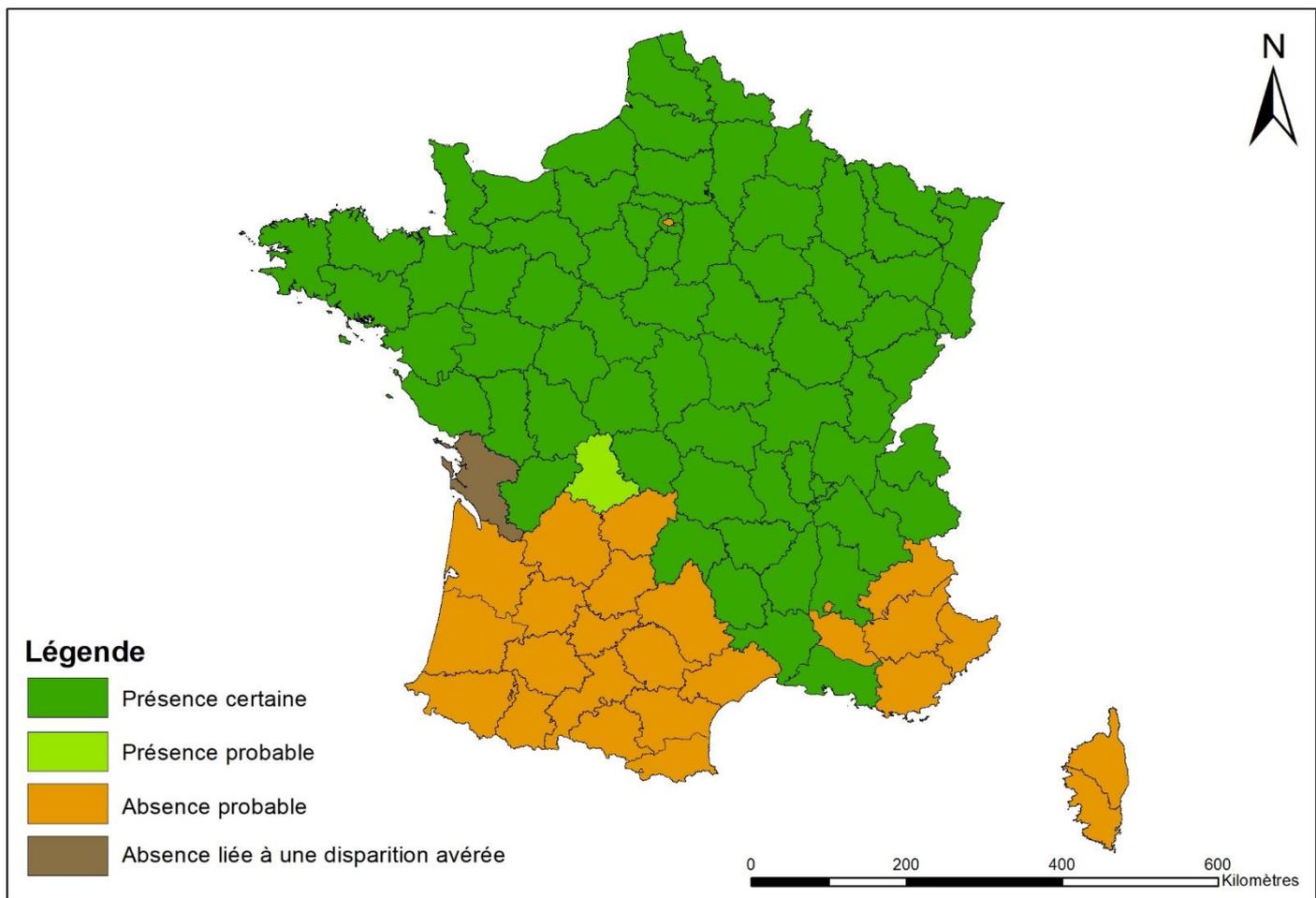


Figure 2 : Carte de répartition du Triton crêté en France (Inventaires MNHN 2003-2015).

(localisées dans les régions Rhône-Alpes, Occitanie et PACA) sont quant à elles considérées, « à dire d'experts », comme dans un état de conservation critique (Geniez & Cheylan 2012; LPO Rhône-Alpes 2015; Marchand *et al.* 2017).

Les premières observations de Triton crêté dans la basse vallée du Rhône ont eu lieu dans une friche industrielle de la commune d'Arles, dans le quartier de Trinquetaille. Ces observations remontent à la fin des années 60 et la présence d'une population isolée dans la mare de Trinquetaille a depuis été confirmée dans les années 90 (Brogard, Cheylan & Geniez 1996). Cette population est la plus méridionale connue à ce jour. Elle est aujourd'hui menacée de destruction par des projets d'aménagement urbain.

D'autres populations de Triton crêté ont également été découvertes dans le Gard (Gendre & Rufroy 2005; Gendre *et al.* 2006), dans la Drôme (Parrain 2010; Grossi & Fonters 2015) et en Ardèche (Parrain 2005) (**Figure 3**). De même, quelques individus à priori isolés ont été observés à l'ouest et au sud de Beaucaire et le long du Petit Rhône entre 1994 et 2006 par plusieurs naturalistes (Bennaïm T., Callegari G., Gendre T., Sabran, C.), sans qu'aucune population supplémentaire n'ait cependant pu être mise à jour. Ces données révèlent que la distribution des populations connues de Triton crêté est étroitement liée à la présence du Rhône. Ces populations pourraient en fait être les reliquats isolés d'une distribution s'étant étendue plus largement le long de la basse vallée du Rhône. A ce jour, les possibilités de flux de gènes et d'individus entre populations ont été fortement réduites par l'endiguement du fleuve, l'intensification de l'agriculture et le comblement des zones humides. L'avenir du Triton crêté dans la vallée est donc incertain et dépend fortement du maintien des habitats aquatiques et terrestres nécessaires à la survie de l'espèce (Geniez & Cheylan 2012).

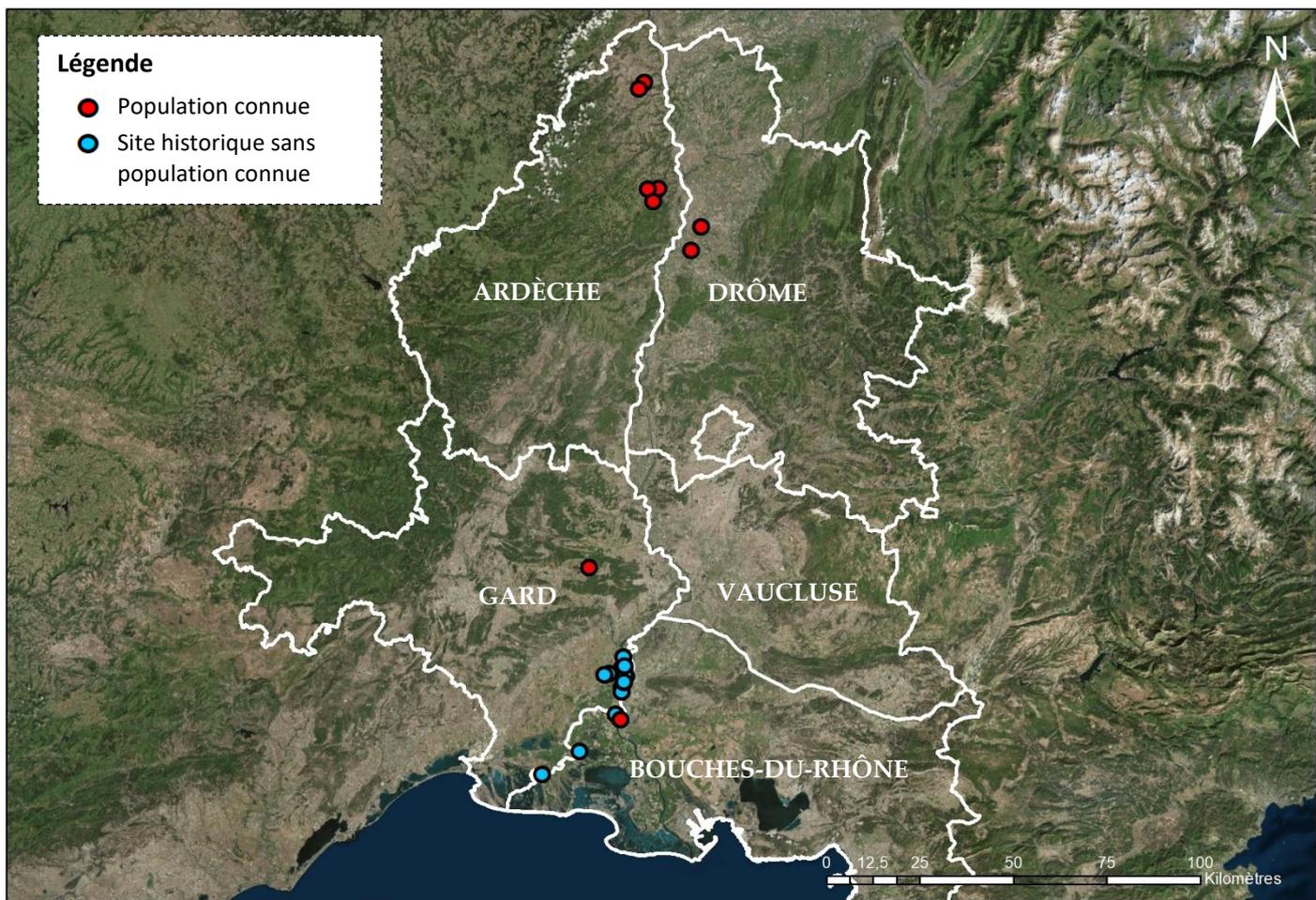


Figure 3 : Carte de localisation des populations connues et des sites historiques de la vallée du Rhône.

Au regard des connaissances actuelles et des enjeux portant sur la protection du Triton crêté et de ses habitats, la problématique suivante se pose :

Quel est l'état de conservation des populations de Triton crêté de la basse vallée du Rhône et quels sont les facteurs écologiques et anthropiques susceptibles de l'expliquer ?

Dans le but de répondre à cette problématique, quatre étapes majeures ont été identifiées :

- Prospector les sites historiques de présence de l'espèce ainsi que d'autres sites potentiellement favorables en s'appuyant sur plusieurs méthodes de détection
- Caractériser les habitats des sites prospectés en relevant toutes caractéristiques présentant un intérêt potentiel dans la compréhension de la distribution du Triton crêté dans la basse vallée du Rhône
- Réaliser une analyse croisée entre l'évolution de la distribution de l'espèce le long de la basse vallée du Rhône et les caractéristiques des habitats
- Mettre en lumière les difficultés propres à la recherche et la détection du Triton crêté dans le biome méditerranéen et en limite d'aire de répartition de l'espèce

A terme, la finalité de l'étude est d'aboutir à la proposition de mesures de gestion qui auront pour but d'améliorer l'état de conservation de l'espèce en basse vallée du Rhône.

Tableau 1 : Liste des sites prospectés dans les 4 zones rhodaniennes et déroulement des sessions.

Nom des sites	Zone d'étude	Prospection Session 1	Prospection Session 2	Prospection Session 3
BOS	Beaucaire Ouest	Oui	Non	Oui
SAB1	Beaucaire Ouest	Oui	Non	Oui
SAB2	Beaucaire Ouest	Oui	Non	Non
ACA	Beaucaire Ouest	Oui	Non	Non
PIS	Beaucaire Ouest	Oui	Oui	Oui
BCR3	Beaucaire Sud	Oui	Oui	Oui
FAB	Beaucaire Sud	Oui	Oui	Oui
BCR1	Beaucaire Sud	Oui	Oui	Oui
VEO2	Beaucaire Sud	Oui	Oui	Non
LPI1	Beaucaire Sud	Oui	Oui	Oui
BCR2	Beaucaire Sud	Oui	Oui	Non
RLH	Beaucaire Sud	Oui	Non	Non
LPI2	Beaucaire Sud	Oui	Oui	Oui
CAP	Beaucaire Sud	Oui	Oui	Oui
VEO1	Beaucaire Sud	Oui	Oui	Oui
SAX	Beaucaire Sud	Non	Non	Non
RNT	Beaucaire Sud	Oui	Oui	Non
IPI	Beaucaire Sud	Oui	Non	Non
TRL1	Camargue	Oui	Non	Non
PAT	Camargue	Oui	Oui	Oui
FOS3	Camargue	Oui	Oui	Oui
PTN	Camargue	Non	Non	Non
TRL3	Camargue	Oui	Non	Non
LAU	Camargue	Oui	Oui	Oui
SYL3	Camargue	Non	Non	Non
TRL2	Camargue	Non	Non	Non
FOS2	Camargue	Oui	Oui	Oui
SYL2	Camargue	Oui	Oui	Non
SYL1	Camargue	Oui	Oui	Non
PUJ2	Pujaut	Oui	Oui	Non
PUJ1	Pujaut	Oui	Oui	Non
PUJ3	Pujaut	Oui	Oui	Oui

2. Matériel et méthodes

2.1. Présentation de la zone d'étude : la basse vallée du Rhône

La basse vallée du Rhône s'étend de la confluence de l'Ardèche et du Rhône jusqu'au delta de la Camargue. Elle est située sur les départements de la Drôme, l'Ardèche, le Vaucluse, le Gard et les Bouches-du-Rhône, et constitue l'extrémité de l'aire de répartition du Triton crêté. Sur la moitié sud de la basse vallée du Rhône, les sites historiques de présence de l'espèce y ont été peu ou pas prospectés depuis dix ans. Une actualisation des données est donc par conséquent nécessaire. En plus des sites historiques, d'autres zones humides potentiellement favorables ont été identifiées via photos aériennes ou par des repérages préliminaires sur le terrain puis prospectées.

Dans le cadre de cette étude, 32 sites répartis en 4 zones principales ont été échantillonnés (Figure 4, Tableau 1).

La « Camargue » est située entre les deux bras du Rhône, à l'aval d'Arles. Elle inclut les sites localisés à proximité du Petit et du Grand Rhône. La mare de Trinquetaille, abritant la seule population connue de la région PACA (Brogard *et al.* 1996), se situe au nord de cette zone. Le site historique de Sylvérial, donnée de présence historique du Triton crêté la plus méridionale au monde, constitue la limite sud de la zone d'étude. Dans l'ensemble, le niveau d'anthropisation de la zone est élevé avec notamment une très grande proportion de terres dédiées à des pratiques agricoles intensives comme la culture du riz et du blé, ou encore à l'élevage équin et bovin.

« Beaucaire Sud » est située le long du Rhône entre Beaucaire et Arles. Elle regroupe plusieurs sites historiques dans la plaine de Beaucaire, dont la lône du Pilet, ainsi que d'autres sites non historiques. Ici encore, la zone d'étude présente un niveau d'anthropisation élevé, avec une dominance de l'arboriculture et de la viticulture intensives. Par ailleurs, des travaux de renforcement et de rehaussement des digues du fleuve sont en cours dans cette zone.

« Beaucaire Ouest » est située entre Beaucaire et Bellegarde, au nord du canal du Rhône à Sète. Ici encore, plusieurs données historiques laissent à penser que le Triton crêté pourrait encore être présent dans la zone. L'anthropisation est également forte, la culture de la vigne et la production maraîchère occupant ici une grande partie des sols.

« Pujaut » est située au lieu-dit le Planas de la commune de Pujaut, au nord-ouest d'Avignon. Une observation de Triton crêté a possiblement pu avoir lieu à cet endroit en 1956

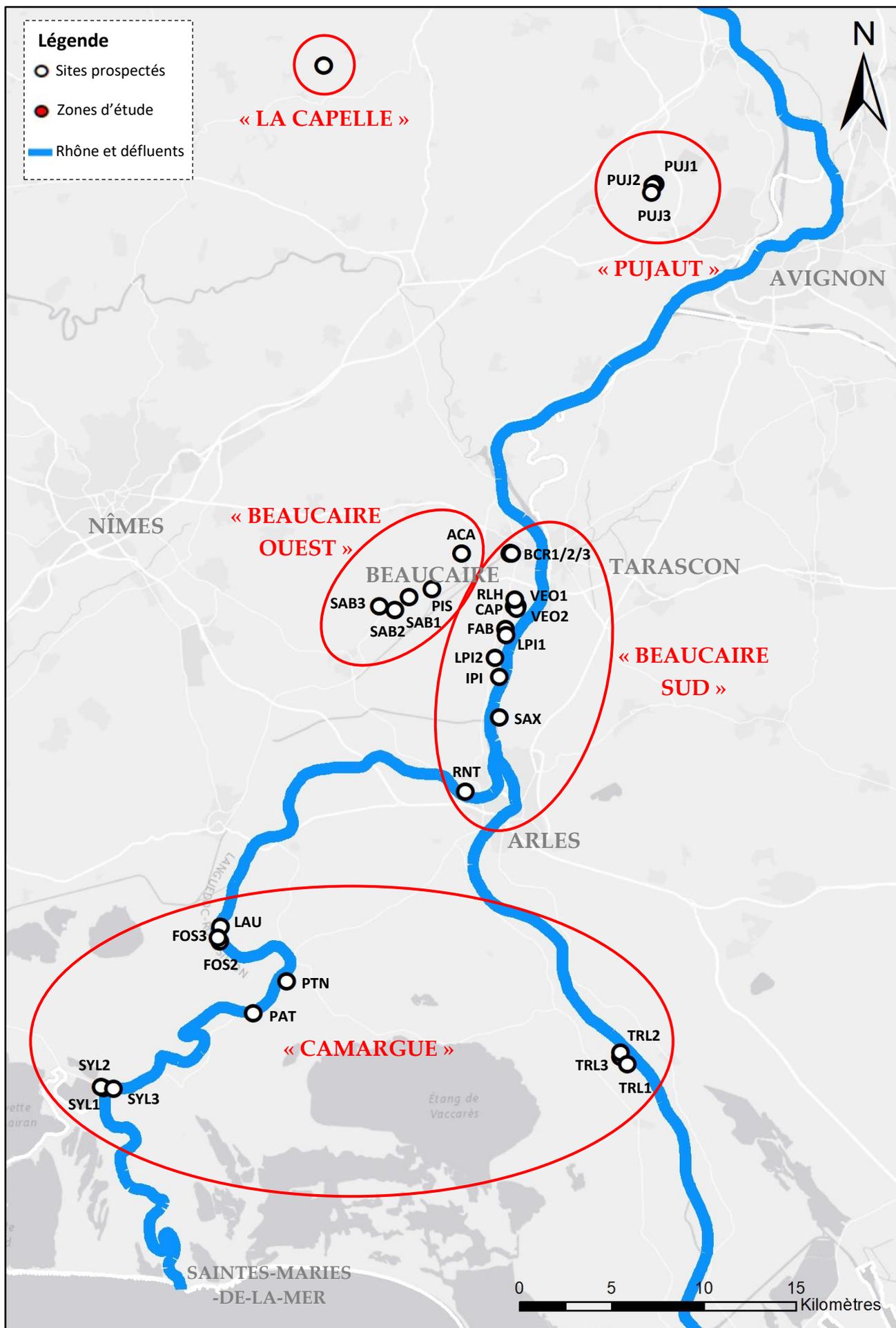


Figure 4 : Carte de localisation des différentes zones d'étude et différents sites prospectés.

ou 1957 par Ledoux J.C. mais ce témoignage reste fragile car très ancien et jamais reconfirmé malgré les prospections menées par la suite (Geniez & Cheylan 2012). La zone présente quelques points d'eau potentiellement favorables pour la reproduction de l'espèce, ainsi qu'une surface très importante d'habitats terrestres non anthropisés.

En cas d'absence de résultats positifs sur les quatre précédentes zones, une cinquième zone, « La Capelle », est incluse à l'étude afin de compléter l'analyse avec des sites historiques anciens et connus. Celle-ci est située au cœur du département du Gard, à l'ouest du territoire de la commune de La-Capelle-et-Masmolène. Bien que présentant un profil différent (garrigue) du contexte rhodanien des autres zones de prospection, les données collectées à cet endroit présentent un intérêt dans l'analyse des habitats du Triton crêté. En effet, la zone est constituée d'un réseau de nombreuses mares de petites tailles, présentant des caractéristiques variées (ensoleillement, substrat, turbidité, ...) et la reproduction du Triton crêté est connue à cet endroit. Celle-ci est par ailleurs suivie annuellement par le Conservatoire d'Espaces Naturels Languedoc-Roussillon (CEN LR). Les données utilisées (36 mares) proviennent de la campagne de suivis réalisée au printemps 2017 (Priol P.).

2.2. Méthodes de détection du Triton crêté

Le Triton crêté étant une espèce particulièrement discrète, il est nécessaire d'utiliser plusieurs méthodes de prospection afin d'augmenter les probabilités de détection pour chaque site visité.

2.2.1. La capture au troubleau

Un troubleau est une époussette à l'armature renforcée spécialement dédiée à la capture des amphibiens et de leurs larves (Figure 5) Il s'agit d'une méthode de détection largement utilisée et simple à mettre en œuvre. En effet, la manœuvre consiste à immerger entièrement le troubleau à l'endroit désiré dans un mouvement vers l'avant ou rotatif, puis de le remonter à la surface. Le contenu du filet est alors vérifié afin d'identifier les éléments capturés.

L'effort d'échantillonnage doit être standardisé afin de rester constant tout au long des différentes séances de capture et sur les différents sites visités. Un troubleau disposant d'un cadre de 40 cm x 40 cm équipé d'un filet composé de mailles de 0.4 cm de diamètre a été utilisé dans le cadre de cette étude.

2.2.2. Les pièges Ortmann

Les pièges Ortmann (Drechsler *et al.* 2010) sont une variante des pièges bouteilles (Griffiths 1985 ; Richter 1995) utilisés pour la capture et le suivi de populations de tritons



Figure 5 : Photographie du troubleau employé.



Figure 7 : Photographie des pièges Ortmann (a) vue extérieure (b) vue intérieure.

(Figure 6). Ce dispositif est désormais largement utilisé dans le cadre d'études sur les populations d'urodèles et donne d'excellents résultats (Ortmann *et al.* 2006 ; Madden & Jehle 2013).

La fabrication de ces pièges est bon marché et facile à mettre en œuvre. Pour cette étude, ils ont été conçus à partir de seaux alimentaires auxquels ont été attachés des flotteurs. Quatre goulots de bouteilles sont insérés dans le seau de manière à permettre l'entrée des tritons dans le piège sans qu'ils ne puissent en ressortir. Les tritons étant plus actifs la nuit (Dutton 2009), les pièges sont mis à l'eau en fin de journée et attachés à la berge à l'aide d'une cordelette en nylon, puis relevés le lendemain. Les individus capturés sont relâchés immédiatement.

Dans le cadre de cette étude, trente-trois pièges Ortmann d'un volume de 15 Litres chacun ont été confectionnés. Comme pour la capture au troubleau, l'effort d'échantillonnage doit rester constant entre chaque site suivi et chaque session.

2.2.3. Les nasses à poissons

A la manière des pièges Ortmann, la méthode des nasses à poissons (Madden & Jehle 2013) est une méthode de détection passive et faiblement invasive. Cette approche donne de bons résultats et présente également l'avantage de faciliter la logistique en amont du piégeage : les nasses sont pliables, facilement transportables et trouvables à un prix abordable dans le commerce. Une cordelette en nylon permet là-aussi d'attacher la nasse à la berge.

Le même protocole d'échantillonnage est utilisé que pour les pièges Ortmann. Les nasses sont mises à l'eau en fin de journée et leur contenu est inventorié après une nuit entière de piégeage. Les individus capturés sont immédiatement relâchés dans le milieu. Les nasses ne doivent pas être immergées entièrement afin de permettre aux amphibiens capturés de respirer. A cette fin, une bouteille en plastique vide placée à l'intérieur de chacune des nasses assure leur maintien partiel à la surface.

Dans le cadre de cette étude, deux modèles de nasses de conceptions très proches ont été utilisées (Figure 7) : le modèle 1 qui possède deux ouvertures de 5.5 cm de diamètre et deux entonnoirs profonds de 11 cm, et le modèle 2 dont les ouvertures font 6,5 cm de diamètre et les entonnoirs 6 cm de profondeur. Les volumes de chaque modèle de nasse sont à peu près équivalents aux alentours de 27 litres.

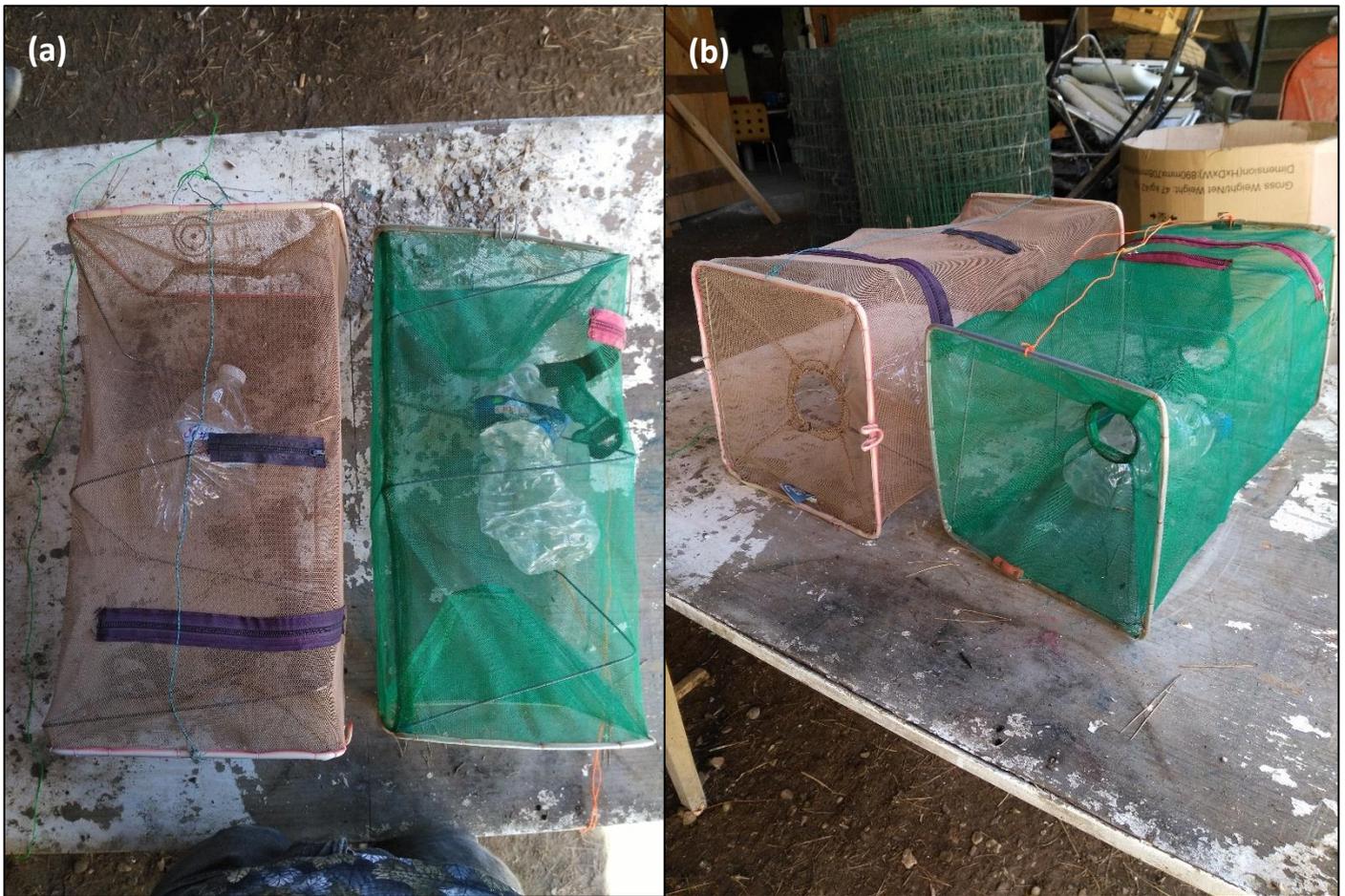


Figure 7 : Photographie des deux modèles de nasses employés. La nasse verte est de modèle 1 tandis que la nasse marron est de modèle 2. (a) vue de dessus (b) vue de trois-quarts.

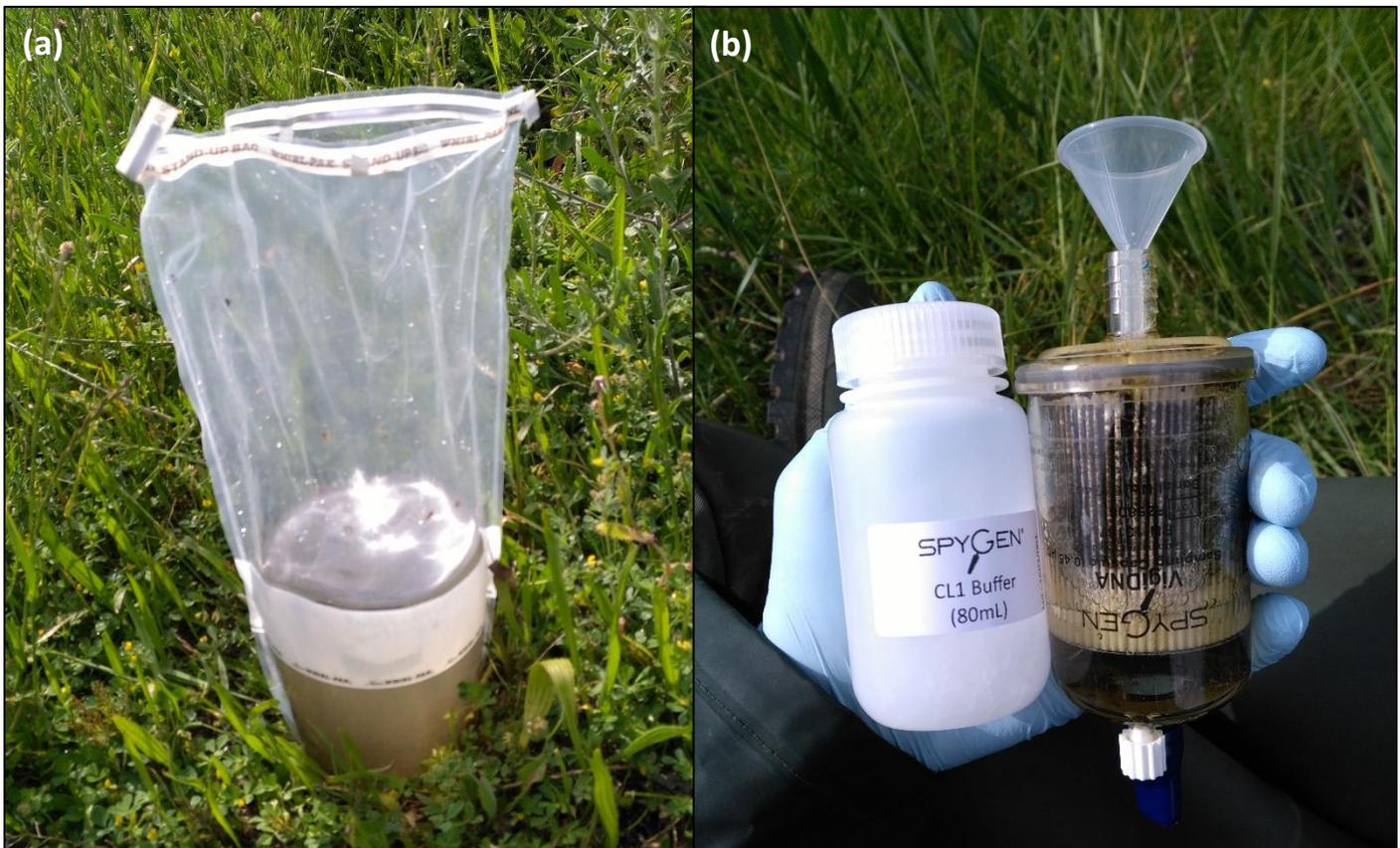


Figure 8 : Photographie d'un kit VigiDNA S de SpyGen® (a) sac stérile de collecte des échantillons (b) capsule de filtration et tampon de conservation.

2.2.4. L'ADN environnemental (ADNe)

L'ADN environnemental est une technique de détection récente basée sur la détection des traces d'ADN laissées par les organismes dans l'environnement (fèces, gamètes, urines, mucus, salive, cellules de peau, ...). Celle-ci permet de détecter des espèces discrètes et rares pendant une durée inférieure à un mois après leur passage dans le milieu (Dejean *et al.* 2011). Cette méthode semble donc être adaptée au suivi du Triton crêté, et permet par ailleurs une détection non invasive car celle-ci ne nécessite pas de capture physique des individus (Taberlet *et al.* 2012).

Pour les amphibiens, les analyses sont réalisées à partir d'échantillons d'eau. Les prélèvements effectués lors de l'étude sont réalisés à l'aide de kits VigiDNA S (Figure 8) fournis par le prestataire externe SpyGen®, puis envoyés à ce dernier pour analyse. 20 prélèvements de 100 mL sont réalisés de manière homogène sur chacun des 32 sites selon le protocole établi par le laboratoire SpyGen® (Annexe 1). Certains sites très proches sont échantillonnés à l'aide d'un même kit, tandis que certains autres de grande taille le sont avec deux kits par site. Les échantillons d'eau sont ensuite analysés en laboratoire.

L'ADNe est extrait à l'aide d'un dispositif de fixation. Un couple d'amorces spécifiques à l'espèce recherchée est ensuite utilisé pour amplifier les échantillons d'ADN par PCR quantitative. Les résultats obtenus permettent de trancher sur la présence ou l'absence de l'ADN de l'espèce dans l'échantillon, et par extension sur le site de prélèvement. Bien que récente, cette méthode de détection a déjà été employée avec succès sur le Triton crêté lors de plusieurs études (Rees *et al.* 2014; Biggs *et al.* 2015; Rees *et al.* 2017).

2.3. Plan expérimental

2.3.1. Zones rhodaniennes : « Beaucaire Sud & Ouest », « Camargue » et « Pujaut »

En combinant ces quatre méthodes de détection au sein d'un plan expérimental standardisé, il est possible de maximiser les chances de détecter du Triton crêté sur les sites prospectés. En effet, tandis que pièges Ortmann et nasses à poissons ciblent les individus adultes, la prospection au troubleau se concentre sur la capture des larves. De surcroît, la méthode de l'ADNe permet de détecter la présence de Triton crêté sur des sites à faibles abondances.

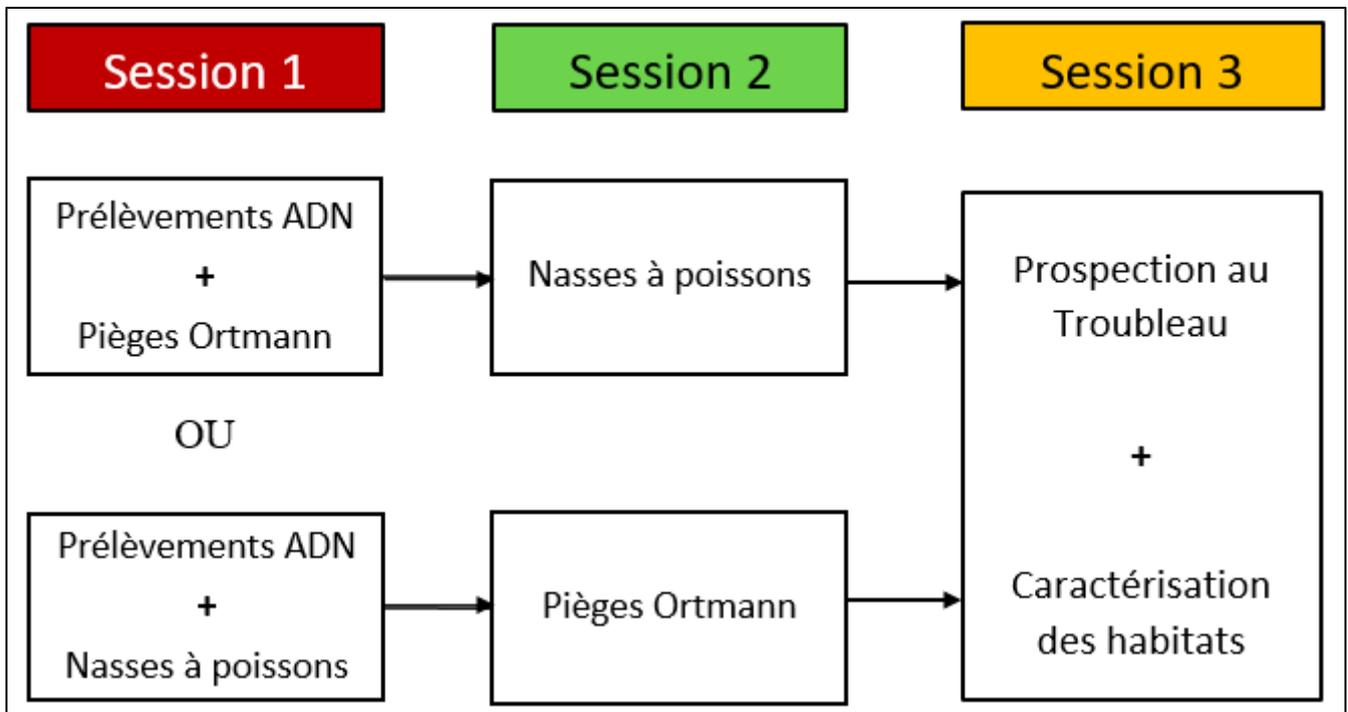


Figure 9 : Plan expérimental et organisation générale des prospections sur les 4 zones rhodaniennes.

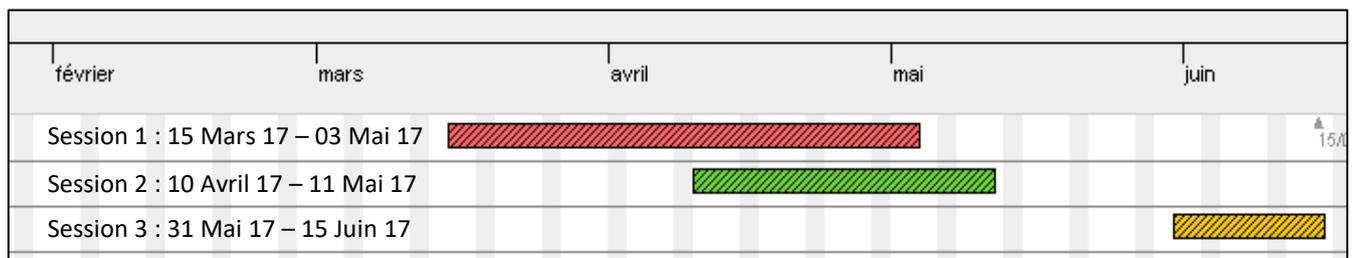


Figure 10 : Déroulement temporel des 3 sessions d'échantillonnage et de caractérisation.

Les zones « Beaucaire Ouest », « Beaucaire Sud », « Camargue » et « Pujaut » ont été échantillonnées selon les modalités présentées **Figures 9 et 10**. Afin de conserver un effort d'échantillonnage constant entre sites, les pièges ou les nasses sont disposés tous les trois mètres de berge au sein des zones les plus favorables des sites visités (végétation aquatique, ensoleillement, ...). Les sites prospectés par la méthode des pièges Ortmann en première session sont échantillonnés avec le même nombre de nasses lors de la seconde, et vice-versa. Lors de la troisième session, deux coups de troubleau sont donnés à l'emplacement des pièges au cours des sessions précédentes.

L'ensemble des 32 sites a été échantillonné par la méthode de l'ADNe. Pour cause de niveaux d'eau trop bas, quatre sites n'ont pas pu être piégés ni prospectés au troubleau. Huit n'ont pu l'être qu'en première session pour des raisons similaires ou car introduits plus tardivement dans le protocole. Enfin, sept sites n'ont pas pu être prospectés au troubleau en troisième session pour les mêmes raisons (**Tableau 1**).

2.3.2. Zone « La Capelle »

Les mares de la zone « La Capelle » ont été échantillonnées par le CEN LR en une session unique au troubleau afin de déterminer lesquelles contiennent des larves. Dans le but de standardiser la procédure, le nombre de coups de troubleau à mettre est déterminé de la manière suivante pour les trente-six sites prospectés :

$$N \text{ coups de troubleau} = \frac{\text{Surface (m}^2\text{)}}{10} + 5$$

Chaque coup est donné à minimum deux mètres des autres à l'aide d'un troubleau de 30 cm de diamètre équipé d'un filet structuré par des mailles de largeur 0.4 cm. La technique de l'ADNe n'a pas été employée dans cette zone.

2.3.3. Précautions sanitaires

Afin d'éviter la propagation des maladies et des Espèces Exotiques Envahissantes (EEE) présentes dans la basse vallée du Rhône telles la Jussie *Ludwigia grandifolia* (Michx., Greuter & Burdet 1987) ou l'Ecrevisse de Louisiane *Procambarus clarkii* (Girard 1852), le matériel de capture a été systématiquement rincé entre chaque site prospecté et laissé sécher en plein soleil.

2.4. Données collectées et analyses

La caractérisation des habitats a eu pendant la session 3 (**Figure 10**).

2.4.1. Le HSI : L'Indice de Pertinence des Habitats du Triton crêté

Dans le but d'étudier le lien entre présence de Triton crêté et caractéristiques des milieux, l'Indice de Pertinence des Habitats du Triton crêté (« HSI : Habitat Suitability Index ») (Oldham *et al.* 2000) a été calculé sur l'ensemble des sites visités dans les cinq zones. Les dix caractéristiques inhérentes à l'indice ont été relevées au cours de la troisième session de capture (**Tableau 2(a)**). Pour chaque site, un score SI a été attribué à chaque variable suivant les modalités d'application de l'indice (Amphibian & Reptile Groups of UK 2010), avant d'appliquer la formule suivante :

$$HSI = \sqrt[10]{SI_1 \times SI_2 \times SI_3 \times SI_4 \times SI_5 \times SI_6 \times SI_7 \times SI_8 \times SI_9 \times SI_{10}}$$

Un HSI compris entre 0 et 1 est obtenu et permet d'évaluer la qualité du milieu par rapport aux exigences écologiques du Triton crêté.

2.4.2. Autres variables relevées

Le HSI ayant été originellement conçu pour des populations de Triton crêté en Grande Bretagne, des variables additionnelles spécifiques au contexte rhodanien ont été relevées lors de la troisième session de prospection dans le but de préciser la caractérisation des habitats des sites étudiés. Il s'agit de la présence ou l'absence du Triton palmé *Lissotriton helveticus* (Razoumovsky 1789), de l'Ecrevisse de Louisiane et de la Jussie et du type de substrat en fond de mare.

2.4.3. Analyse des caractéristiques d'habitats

L'Analyse Factorielle de Données Mixtes (AFDM) a été utilisée sur les variables d'habitats afin de déterminer lesquelles d'entre elles sont les plus structurantes des milieux prospectés. Cette méthode d'analyse multivariée, proche de l'Analyse en Composantes Principales (ACP), permet de traiter simultanément des variables quantitatives et qualitatives. Celle-ci repose sur la définition d'axes principaux (dimensions) à partir de combinaisons linéaires des variables initialement présentes dans le jeu de données.

Pour déterminer le nombre d'axes à garder lors de l'interprétation, le critère de Karlis-Saporta-Spinakis (Karlis, Saporta & Spinakis 2003) a été utilisé. Il stipule que pour qu'un axe soit conservé, sa valeur propre λ doit être telle que :

$$\lambda > 1 + 2 \sqrt{\frac{p-1}{n-1}} \quad \text{Avec } p = \text{nombre de variables et } n = \text{nombre d'observations}$$

Tableau 2 : Liste des variables étudiées avec l'Indice de Pertinence des Habitats du Triton crêté (HSI) (a) et l'Analyse Factorielle sur Données Mixtes (AFDM) sur les sites rhodaniens (b) et la zone « La Capelle » (c).

(a)	Variables du HSI	Autres variables relevées
	Surface en eau	Présence de Triton crêté
	% de surface en ombre	Présence de Triton palmé
	% de surface recouverte en macrophytes	Présence d'Ecrevisse
	Nombre de mares dans un rayon d'1 km	Présence de Jussie
	Localisation par rapport à l'aire de répartition	Type de substrat en fond de mare
	Fréquence d'assèchement	Site de présence historique de Triton crêté
	Diversité de la communauté d'invertébrés	Turbidité de l'eau
	Présence de Poisson	
	Présence d'Oiseaux d'eau	
	Qualité des habitats terrestres	

AFDM Sites Rhodaniens	Variables explicatives	Variables supplémentaires
(b) Variables qualitatives	Présence de Triton palmé	Présence de Triton crêté
	Présence d'Ecrevisse	Présence de Jussie
	Type de substrat en fond de mare	Site de présence historique de Triton crêté
	Fréquence d'assèchement	
	Diversité de la communauté d'invertébrés	
	Présence de Poisson	
	Présence d'Oiseaux d'eau	
	Qualité des habitats terrestres	
Variables qualitatives	Turbidité de l'eau	
	Surface en eau	Score HSI
	% de surface en ombre	
	% de surface recouverte en macrophytes	
Nombre de mares dans un rayon d'1 km		
AFDM La Capelle	Variables explicatives	Variables supplémentaires
(c) Variables qualitatives	Présence de Triton crêté	
	Présence d'Ecrevisse	
	Type de substrat en fond de mare	
	Fréquence d'assèchement	
	Diversité de la communauté d'invertébrés	
	Turbidité de l'eau	
Variables qualitatives	Surface en eau	Score HSI
	% de surface en ombre	
	% de surface recouverte en macrophytes	
	Nombre de mares dans un rayon d'1 km	

Tableau 3 : Probabilités de présence du Triton crêté dans les milieux en fonction du score HSI.

Score	Probabilité de présence
<0.5	Très mauvaise (0.03)
0.5-0.59	Mauvaise (0.2)
0.6-0.69	Moyenne (0.55)
0.7-0.79	Bonne (0.79)
>0.8	Très bonne (0.93)

A partir de ces variables et de ces axes, la Classification Hiérarchique sur Composantes Principales (HCPC) classe en différents groupes (« clusters ») les entités caractérisées par les variables. Cette méthode se base sur les ressemblances et divergences entre entités par rapport aux axes. Dans le cadre de cette étude, cette méthode est employée afin de déterminer si de grands ensembles de sites présentant des caractéristiques d'habitat particulières se dégagent du reste des données collectées, puis une consolidation des classes par la méthode des « k-means » est ensuite automatiquement réalisée.

Ces deux méthodes ont été mises en œuvre sur le logiciel R 3.4.0. à l'aide des packages *Rcmdr* et *FactoMineR* (Lê *et al.* 2008).

2.4.4. Analyse de l'évolution de l'occupation des sols entre 1990 et 2012

A partir de la base de données Corine Land Cover, une analyse de l'évolution de l'occupation des sols dans un rayon de 1 km autour des 12 sites historiques prospectés dans les zones « Camargue », « Beaucaire Ouest » et « Beaucaire Sud » a été réalisée. Cette analyse donne le pourcentage d'évolution de chaque type d'habitat entre 1990 et 2012 autour des sites historiques de ces zones. Le rayon a été déterminé en se basant sur les recommandations d'application du HSI, qui requiert la connaissance du nombre de mares présentes jusqu'à 1 km autour du site caractérisé (Amphibian & Reptile Groups of UK 2010). Un test de Wilcoxon apparié a ensuite été réalisé sur les surfaces obtenues dans le but de déterminer s'il y'a eu une évolution significative de l'occupation des sols autour de ces sites.

2.5. Une approche expérimentale complémentaire : comparaison de l'efficacité des nasses à poissons

Les nasses à poisson sont un outil communément employé par les naturalistes pour capturer le Triton crêté (Madden & Jehle 2013). Cependant, après quelques tests préliminaires sur la mare de Trinquetaille, il semble y avoir une différence d'efficacité entre les deux modèles de nasses utilisés dans l'étude. Afin de vérifier cette hypothèse, une comparaison de l'efficacité des nasses en fonction du modèle a été pendant une semaine dsur la mare de Trinquetaille selon les modalités suivantes :

- Les nasses sont placées le soir et le nombre d'individus capturés est relevé le matin.
- Pas plus de 10 nasses à la fois dans la mare.et pas plus de 5 nasses de chaque modèle à la fois dans la mare.
- Le nombre de nasses de chaque sorte doit être équilibré à une nasse près.

Un test de Wilcoxon non-apparié a ensuite été réalisé sur les résultats afin de comparer si le nombre de Tritons crêtés capturés est significativement différent suivant le modèle de nasse.

3. Résultats

3.1. Zones rhodaniennes : « Camargue », « Beaucaire Sud & Ouest » et « Pujaut »

3.1.1. Résultats des prospections et de l'ADNe

Sur les 32 sites prospectés dans ces zones, aucun Triton crêté n'a été détecté. En effet, aucun adulte n'a été piégé (piège Ortmann ou nasse à poisson), ni aucune larve capturée au troubleau. De plus, aucune trace d'ADNe n'a pu être amplifiée en laboratoire, témoignant de l'absence de fragments d'ADN de Triton crêté dans les milieux échantillonnés.

En revanche, des Tritons palmés adultes ont été piégés sur les sites PAT, VEO2, et ACA, tandis que des larves ont été capturées sur les sites PUJ1 et PUJ2. (Annexe 2).

3.1.2. Résultats de l'Indice de Pertinence des Habitats du Triton crêté (HSI)

L'indice HSI (Amphibian & Reptile Groups of UK 2010) de chacun des 32 sites caractérisés a été déterminé à partir des variables relevées sur le terrain. Le HSI de la mare de Trinquetaille, seul site de présence actuellement avérée de Triton crêté dans ces quatre zones, a également été calculé. Le HSI maximal relevé est celui du site Mas du Bos (0.774), tandis que le minimal est celui du site Etang piscicole (0.227). La mare de Trinquetaille présente quant à elle un score de 0.371, ce qui la classe dans la catégorie de probabilité « Très mauvaise ». La moyenne des HSI sur les quatre zones est de 0.5028, tandis que l'écart-type entre scores est de 0.1307. Les résultats par site sont donnés ci-contre (Figure 11) tandis que le tableau suivant (Tableau 4) récapitule les résultats par zones d'étude :

Tableau 4 : Répartition des classes d'Indices de pertinence des habitats du Triton crêté (HSI) par zones d'étude.

	Très mauvaise (0.03)	Mauvaise (0.2)	Moyenne (0.5)	Bonne (0.79)
Beaucaire Ouest	3 sites (20 %)	0 site (0 %)	2 sites (33 %)	1 site (50 %)
Beaucaire Sud	3 sites (20 %)	7 sites (70 %)	1 site (17 %)	0 site (0 %)
Camargue	8 sites (53 %)	2 sites (20 %)	3 sites (50 %)	0 site (0 %)
Pujaut	1 site (7 %)	1 site (10 %)	0 site (0 %)	1 site (50 %)
Total	15 sites (100 %)	10 sites (100 %)	6 sites (100 %)	2 sites (100 %)

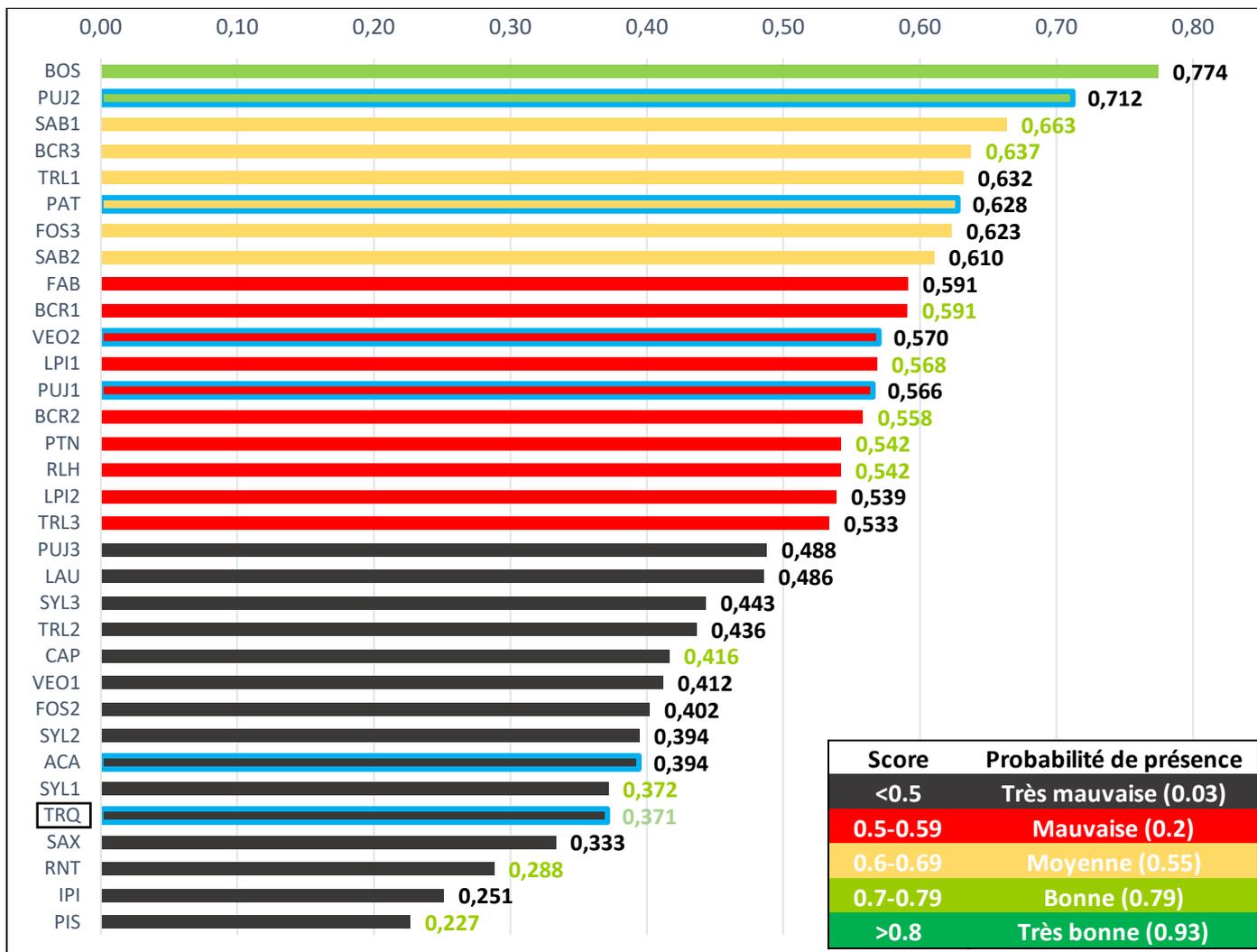


Figure 11 : Indices de pertinence des habitats du Triton crêté (HSI) pour chaque site prospecté. Les scores en vert sont ceux des sites historiques, les barres cerclées de bleu indiquent la présence de Triton palmé. Le Triton crêté n'est présent que sur la mare de Trinquetaille (TRQ) à l'heure actuelle.

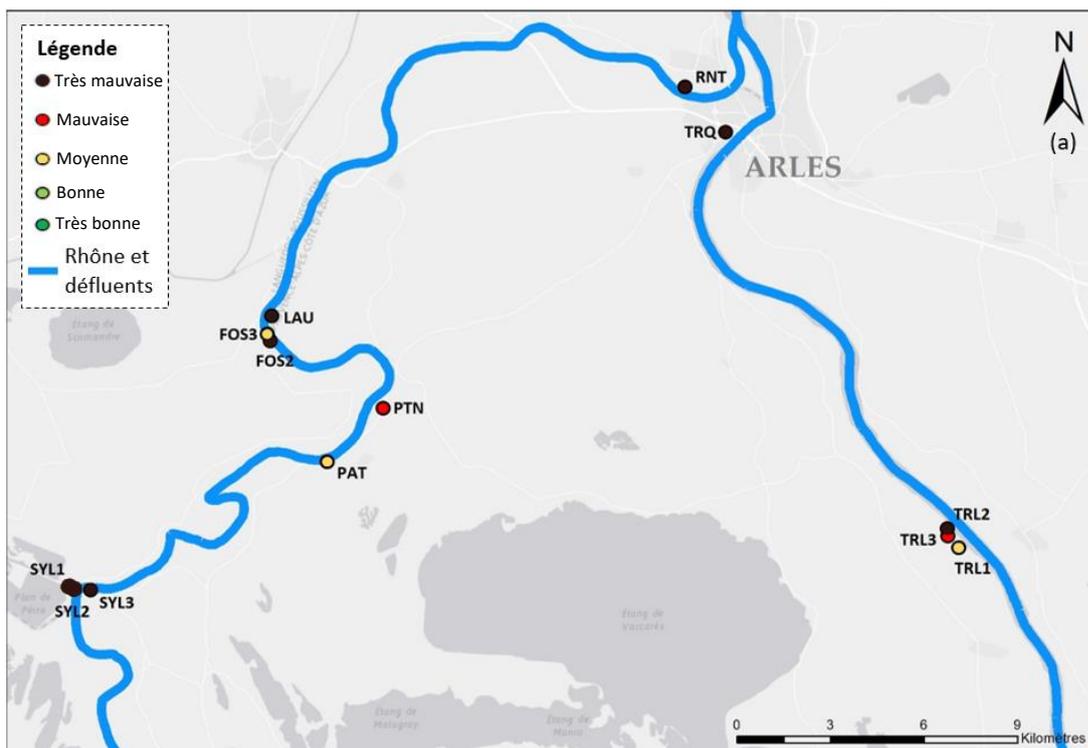


Figure 12 : Cartes de localisation des différents sites en fonction de leur Indice de pertinence des habitats du Triton crêté (HSI) (a) Camargue (b) Beaucaire (c) Pujaut.

Un test exact de Fisher est réalisé sur la table de contingence des effectifs (**Tableau 4**) et donne une p-value de 0.03699. Ainsi, la distribution des probabilités de présence entre les différentes zones prospectées ne semble pas être liée uniquement au hasard (**Figure 12**).

On constate également (**Figure 11**) que la présence de Triton palmé est retrouvée aussi bien dans la classe « Bonne probabilité » que dans les trois autres, tandis que les sites historiques se distribuent seulement entre sites de probabilités « Très mauvaise », « Mauvaise » et « Moyenne ».

3.1.3. Résultats de l'Analyse Factorielle de Données Mixtes (AFDM)

L'AFDM a été réalisée sur 33 sites : les sites prospectés lors des sessions de capture et la mare de Trinquetaille. Le nombre de variables explicatives utilisé est de 13 contre 4 variables supplémentaires (**Tableau 2(b)**). En se basant sur le critère de Karlis-Saporta-Spinakis (Karlis *et al.* 2003), un seuil minimal de valeurs propres de 2.225 est obtenu : seuls les 3 premiers axes sont conservés puisque leurs valeurs propres sont les seules supérieures à ce seuil. Pour rappel, plus des sites sont proches dans le plan factoriel et plus ceux-ci possèdent des caractéristiques proches.

Afin de déterminer quelles sont les variables les plus importantes dans la construction des axes, chaque catégorie de variable qualitative est soumise à un test de Student ($\alpha = 0.05$). Ceci a pour but de déterminer si les coordonnées des sites inclus dans la catégorie de variable testée sont significativement différentes de celles des autres sites dans cette dimension. De même, un coefficient de corrélation a été calculé entre les variables quantitatives et les coordonnées des sites dans chaque dimension. Plus la p-value est faible et plus la significativité est forte. Dans les deux cas, chaque variable est d'abord testée en tant que variable active, puis en tant que variable supplémentaire : les variables les plus impliquées dans la construction des axes seront significatives dans les deux cas (**Tableau 2**). Les résultats de chaque test sont à retrouver en détail dans le **Tableau 5** et les variables les plus significatives pour chaque dimension sont détaillées ci-dessous.

Le côté positif du premier axe (horizontal) (**Figure 13(a)** et **Tableau 5**) est principalement caractérisé par la présence d'Ecrevisse de Louisiane (« Ecr.Présence » : est. = 1.44, p-value = 2.57×10^{-6}). On observe donc un gradient de présence de l'Ecrevisse croissant de gauche à droite. Un gradient similaire est observable pour les poissons : absence à gauche (« Poi.Absence » : est. = -1.23, p-value = 9.94×10^{-4}), présence mineure à droite (« Poi.Présence mineure » : est. = 1.45, p-value = 5.63×10^{-4}). Avec toutefois un gradient moins prononcé, on

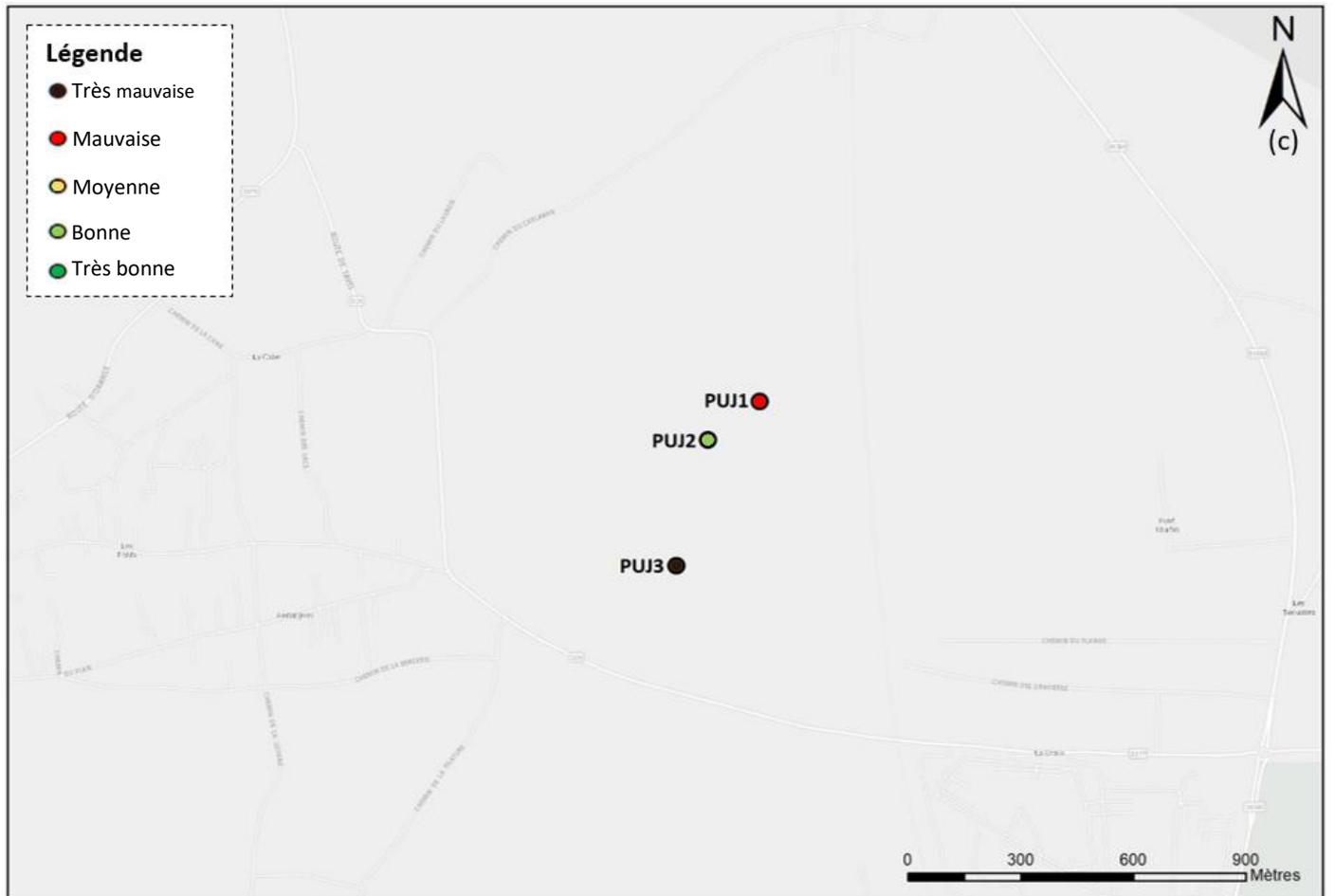
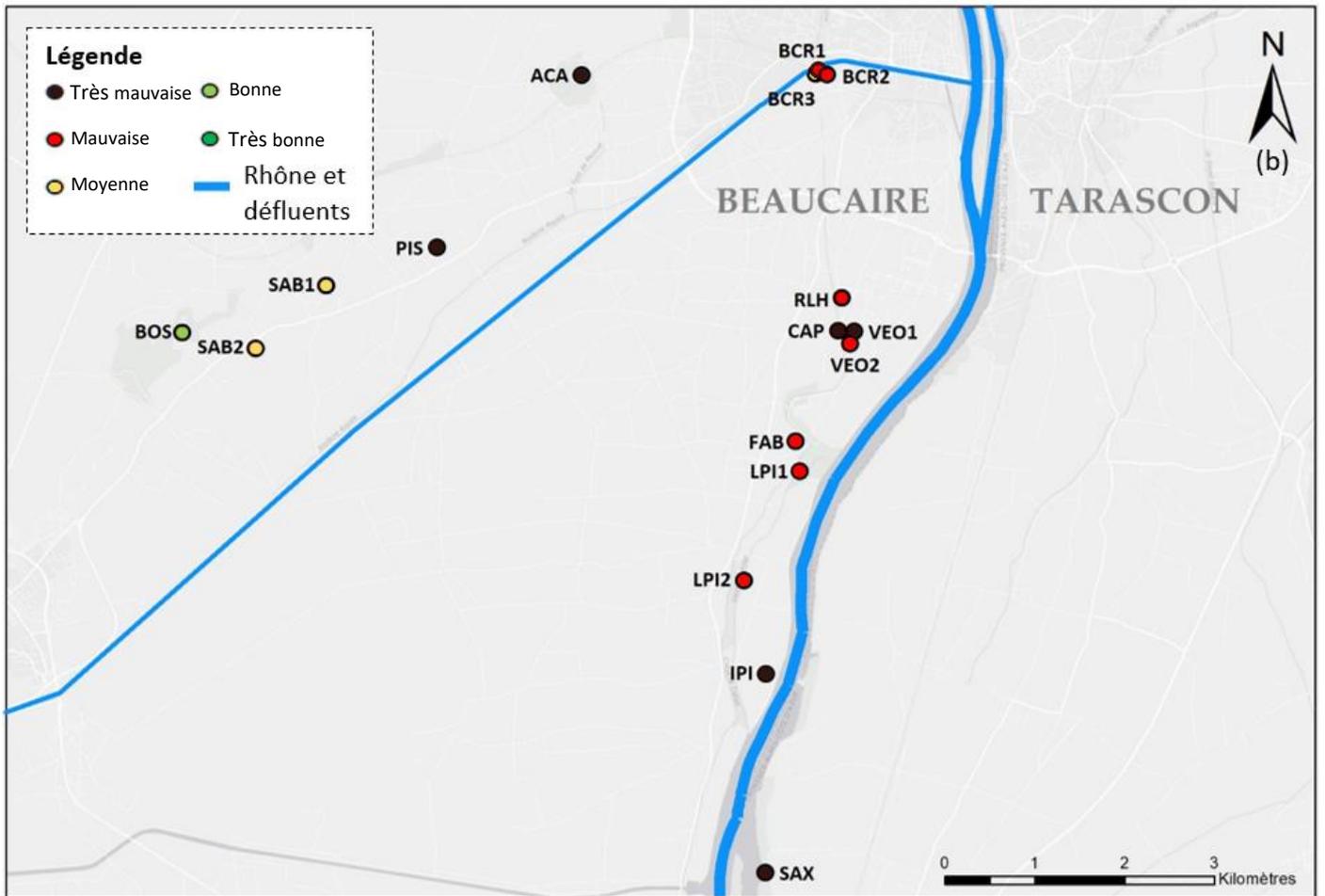


Figure 12 : Cartes de localisation des différents sites en fonction de leur Indice de pertinence des habitats du Triton crêté (HSI) (a) Camargue (b) Beaucaire (c) Pujaut (suite).

constate que l'absence d'oiseaux est également marquée du côté gauche du plan factoriel (« Ois.Absence » : est. = -1.80, p-value = 6.16×10^{-5}) et leur présence mineure du côté droit (« Ois.Présence mineure » : est. = 0.73, p-value = 3.22×10^{-3}). A l'inverse, le Triton palmé est plutôt présent sur les sites côté négatif (« Pal.Présent » : est. = -1.46, p-value = 6.47×10^{-4}) et absent sur les sites côté positif (« Pal.Absent » : est. = 1.46, p-value = 6.47×10^{-4}). Toutes ces catégories de variable restent significatives quand elles sont placées en tant que variable supplémentaire. La proportion de surface à l'ombre (non représentée dans le **Tableau 5** car quantitative) est corrélée avec les coordonnées des sites le long du premier axe (cor. = 0.72, p-value = 2.38×10^{-6}). Cependant, cette corrélation s'inverse lorsque la variable est considérée comme supplémentaire à l'analyse (cor. = -0.51, p-value = 2.19×10^{-6}).

Deux gradients principaux sont observés le long du second axe (vertical) (**Figure 13(a) et Tableau 5**) : les invertébrés et la turbidité. Les diversités d'invertébrés sont modérées du côté positif de l'axe (« Inv.Modérée » : est. = 1.95, p-value = 9.75×10^{-6}) et très faibles et faibles du côté négatif (« Inv.Très faible » : est. = -2.02, p-value = 2.07×10^{-2} ; « Inv.Faible » : est. = -0.75, p-value = 2.59×10^{-2}). De façon similaire, la turbidité est plutôt faible (eau claire) du côté positif (« Tur.Claire » : est. = 1.54, p-value = 9.75×10^{-6}) et forte (eau opaque) du côté négatif (« Tur.Opaque » : est. = -0.90, p-value = 1.76×10^{-2}). Dans une moindre mesure, on observe un gradient de présence du Triton palmé, plutôt présent du côté positif (« Pal.Présent » : est. = 0.75, p-value = 4.67×10^{-2}). De même, la présence mineure d'oiseaux semble également influencer la construction du second axe puisque l'on retrouve cette dernière du côté positif de l'axe (« Ois.Présence mineure » : est. = 0.79, p-value = 1.29×10^{-2}) tandis qu'ils sont plutôt absents du côté négatif (« Ois.Absence » : est. = -0.87, p-value = 9.71×10^{-3}). Cette dernière catégorie de variable qualitative est par ailleurs la seule à être significativement caractéristique du second axe lorsqu'elle est considérée comme supplémentaire à l'analyse (est. = -0.85, p-value = 2.14×10^{-2}). Concernant les variables quantitatives, une première corrélation positive est observée entre les coordonnées des sites le long de l'axe et la surface couverte en macrophytes (cor. = 0.60, p-value = 2.46×10^{-4}) et une seconde entre coordonnées et surface à l'ombre (cor. = 0.43, p-value = 1.36×10^{-2}). Ces deux corrélations sont également significatives lorsque les variables sont considérées comme supplémentaires (cor. = 0.36, p-value = 3.98×10^{-2} ; corrélation = 0.36, p-value = 4.18×10^{-2}).

Enfin, le troisième axe (**Tableau 5 seulement**) est caractérisé par un gradient de présence de poissons du négatif vers le positif (« Poi.Absence » : est. = -1.22, p-value = 7.51×10^{-3} ; « Poi.Présence majeure » : est. = 1.88, p-value = 9.41×10^{-4}). De plus, les habitats terrestres de

Tableau 5 : Description des dimensions de l'AFDM par les différentes catégories de variables. Plus le test de Student ($\alpha = 0.05$) est significatif et plus les sites portant la catégorie de variable se différencient positivement (estimate positif) ou négativement (estimate négatif) le long de l'axe. La significativité du test augmente selon un gradient de couleur allant du rouge au vert.

Dimension 1	Active		Supplémentaire	
Variables qualitatives	Estimate	p-value	Estimate	p-value
Ecr.Présence	1,4380	2,5686E-06	1,0773	5,5859E-04
Poi.Présence mineure	1,4472	5,6313E-04	1,0459	1,4320E-02
Pal.Absent	1,4561	6,4687E-04	1,0241	1,8368E-02
Inv.Faible	1,4778	1,8528E-03	∅	∅
Hab.Modérée	1,4199	2,0053E-03	1,0714	1,9994E-02
Ois.Présence mineure	0,7334	3,2169E-03	0,4507	4,7988E-02
Sub.Matière organique fine	2,3486	3,6164E-03	1,7531	2,4995E-02
Asc.Jamais	1,1847	3,1681E-02	∅	∅
Tur.Opaque	0,9327	4,8248E-02	∅	∅
Inv.Modérée	-0,9929	1,3825E-02	∅	∅
Tur.Claire	-1,2581	8,1971E-03	∅	∅
Sub.Rocheux	-1,7097	7,2446E-03	-1,2208	4,9458E-02
Hab.Bonne	-1,2609	4,8119E-03	-0,9367	3,5275E-02
Asc.Toujours	-0,9605	3,2143E-03	-0,6667	3,6618E-02
Poi.Absence	-1,2291	9,9431E-04	-0,8632	2,0370E-02
Pal.Présent	-1,4561	6,4687E-04	-1,0241	1,8368E-02
Ois.Absence	-1,8004	6,1648E-05	-1,2681	7,1172E-03
Ecr.Non détectée	-1,4380	2,5686E-06	-1,0773	5,5859E-04

Dimension 2	Active		Supplémentaire	
Variables qualitatives	Estimate	p-value	Estimate	p-value
Inv.Modérée	1,9487	9,7469E-06	∅	∅
Tur.Claire	1,5389	2,6023E-05	∅	∅
Sub.Herbe	3,2273	4,4994E-04	2,0534	1,9897E-02
Ois.Présence mineure	0,7903	1,2900E-02	∅	∅
Asc.Jamais	0,9736	4,4892E-02	∅	∅
Pal.Présent	0,7457	4,6719E-02	∅	∅
Pal.Absent	-0,7457	4,6719E-02	∅	∅
Sub.Boue	-1,3541	2,7047E-02	∅	∅
Inv.Faible	-0,7530	2,5936E-02	∅	∅
Inv.Très Faible	-2,0194	2,0699E-02	∅	∅
Tur.Opaque	-0,9045	1,7582E-02	∅	∅
Ois.Absence	-0,8711	9,7107E-03	-0,8512	2,1437E-02

Dimension 3	Active		Supplémentaire	
Variables qualitatives	Estimate	p-value	Estimate	p-value
Hab.Mauvaise	1,2666	7,6130E-04	∅	∅
Poi.Présence majeure	1,8822	9,4142E-04	∅	∅
Asc.Jamais	0,3479	5,6489E-03	∅	∅
Sub.Rocheux	1,6918	6,4559E-03	∅	∅
Hab.Bonne	-0,8166	3,0220E-02	∅	∅
Tur.Opaque	-0,8207	2,8440E-02	∅	∅
Asc.Toujours	-1,3441	1,9084E-02	∅	∅
Poi.Absence	-1,2208	7,5124E-03	∅	∅

mauvaise qualité sont retrouvés du côté positif de l'axe (« Hab.Mauvaise » : est. = 1.27, p-value = 7.61×10^{-4}) tandis que ceux de bonne qualité sont plutôt du côté négatif (« Hab.Bonne » : est. = -0.82, p-value = 3.02×10^{-2}). La seule variable quantitative à être corrélée aux coordonnées des sites le long de l'axe est la variable de surface totale (cor. = 0.58, p-value = 4.38×10^{-4}). Cependant, aucune de ces variables qualitatives ou quantitatives ne ressort significativement lorsque considérées comme étant supplémentaires à l'analyse.

Ci-dessous, le **Tableau 6** récapitule pour chaque type de sites les tendances observées **Figure 13(b)(c)(d) et Tableau 5**.

Tableau 6 : Tendances observées sur les sites en fonction des variables « Site historique », « Triton palmé » et « Ecrevisse de Louisiane ».

Sites historiques	Sites de présence de Triton palmé	Sites de présence d'Ecrevisse de Louisiane
<ul style="list-style-type: none"> • Absence de Triton palmé • Absence d'oiseaux • Turbidité forte (opaque) • Diversité d'invertébrés faible ou très faible • Substrat « Boueux » 	<ul style="list-style-type: none"> • Absence d'Ecrevisse de Louisiane • Absence de poissons • Diversité d'invertébrés modérée • Turbidité faible (claire) • Substrat « Rocheux » • Habitats terrestres de bonne qualité • Assec tous les ans 	<ul style="list-style-type: none"> • Absence de Triton palmé • Présence mineure d'oiseaux • Présence mineure de poisson • Diversité d'invertébrés faible • Habitats terrestres de qualité modérée • Turbidité forte (opaque) • Substrat « Matière organique fine » • Jamais d'assec

3.1.4. Classification des sites en fonction de leurs caractéristiques

La Classification Hiérarchique en Composantes Principales (HCPC) est réalisée sur la variabilité contenue dans les trois premières dimensions de l'AFDM. L'ensemble des sites peut être classé en trois groupes (**Figure 14**). Un test de χ^2 est réalisé afin de déterminer quelles variables sont les plus déterminantes dans la mise en place de la classification. Les trois plus significatives sont l'absence/présence d'Ecrevisse de Louisiane (ddl = 2, p-value = 5.00×10^{-5}), la diversité de la communauté d'invertébrés (ddl = 6, p-value = 1.10×10^{-4}) et l'absence/présence de Triton palmé (ddl = 2, 3.79×10^{-4}).

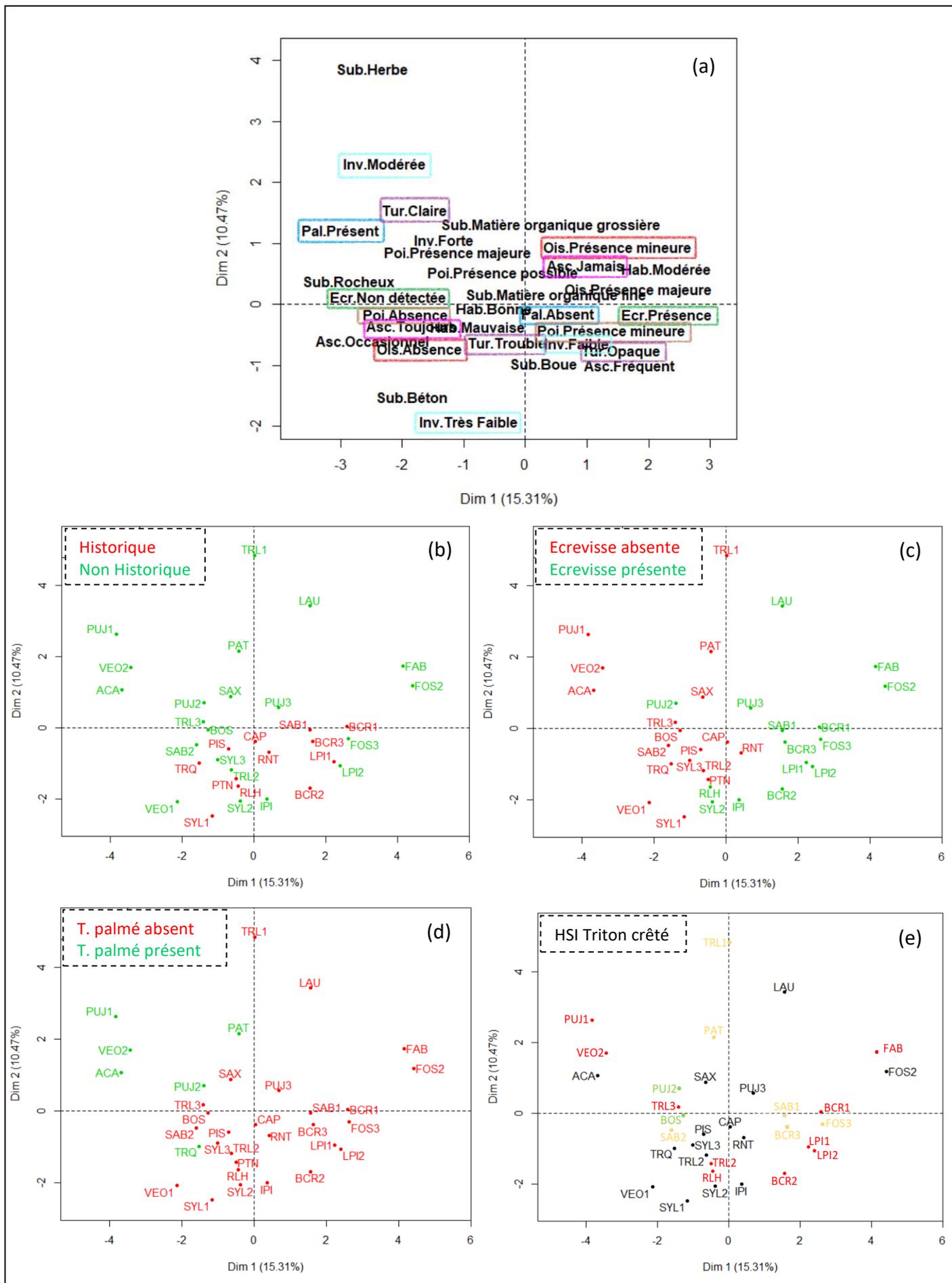


Figure 13 : Représentations dans le plan factoriel (1,2) : (a) des variables qualitatives, (b) des sites historiques, (c) de la présence d'Ecrevisse de Louisiane, (d) de la présence de Triton palmé, (e) des probabilités de présence de Triton crêté selon le HSI.

Le premier groupe (Cluster 1) est composé de 5 sites, tous situés dans la partie supérieure gauche du plan factoriel (1,2). Le site le plus représentatif de ce premier groupe (soit le site le plus proche du barycentre des sites inclus dans le cluster) est le site « VEO2 ». Au sein de ce groupe :

- 80 % des sites incluent du Triton palmé (soit 67 % du total des sites en contenant).
- 100 % des sites possèdent une diversité d'invertébrés modérée (soit 71 % du total des sites en contenant).
- 100 % des sites du premier groupe sont caractérisés par l'absence de poissons et 80 % par une turbidité faible (eau claire).

Le second groupe (Cluster 2) est constitué de 17 sites, pour la plupart (82 %) situés dans la partie inférieure du plan factoriel (1,2). Le site le plus représentatif de ce second groupe est le site « SYL3 ». Au sein de ce groupe :

- 82 % des sites ne contiennent pas d'Ecrevisse de Louisiane (soit 78 % du total des sites n'en contenant pas)
- 47 % des sites présentent des habitats terrestres de mauvaise qualité (soit 88 % du total des sites en présentant)
- 82% des sites ne contiennent pas d'oiseaux (soit 70 % du total des sites n'en contenant pas).

Le troisième groupe (Cluster 3) est constitué de 11 sites, tous situés dans la partie droite du plan factoriel (1,2). Le site le plus typique de ce troisième groupe est le site « BCR1 ». Au sein de ce groupe :

- 100 % des sites contiennent de l'Ecrevisse de Louisiane (soit 73 % du total des sites en contenant).
- 64 % des sites possèdent une présence mineure d'oiseaux (soit 70 % du total des sites en possédant). Les proportions sont identiques pour les sites possédant des habitats terrestres de qualité modérée.
- 73 % des sites possèdent une présence mineure de poissons (soit 62 % du total des sites en possédant).
- 90 % des sites possèdent une faible diversité d'invertébrés.
- 71.43 % du total des sites ayant pour substrat de la matière organique fine sont dans le troisième groupe.

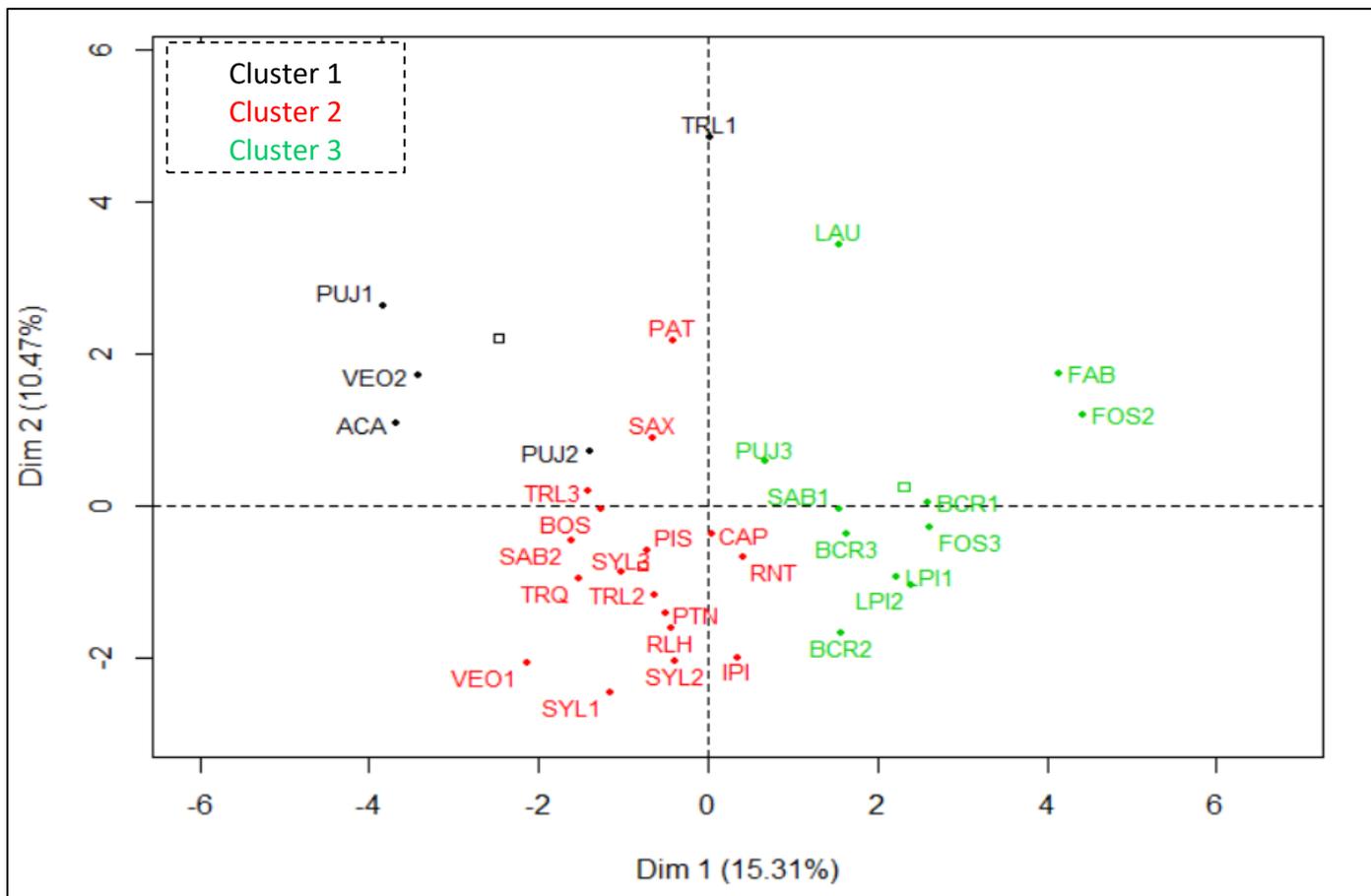


Figure 14 : Représentation dans le plan factoriel (1,2) des trois groupes de sites après classification par HCPC.

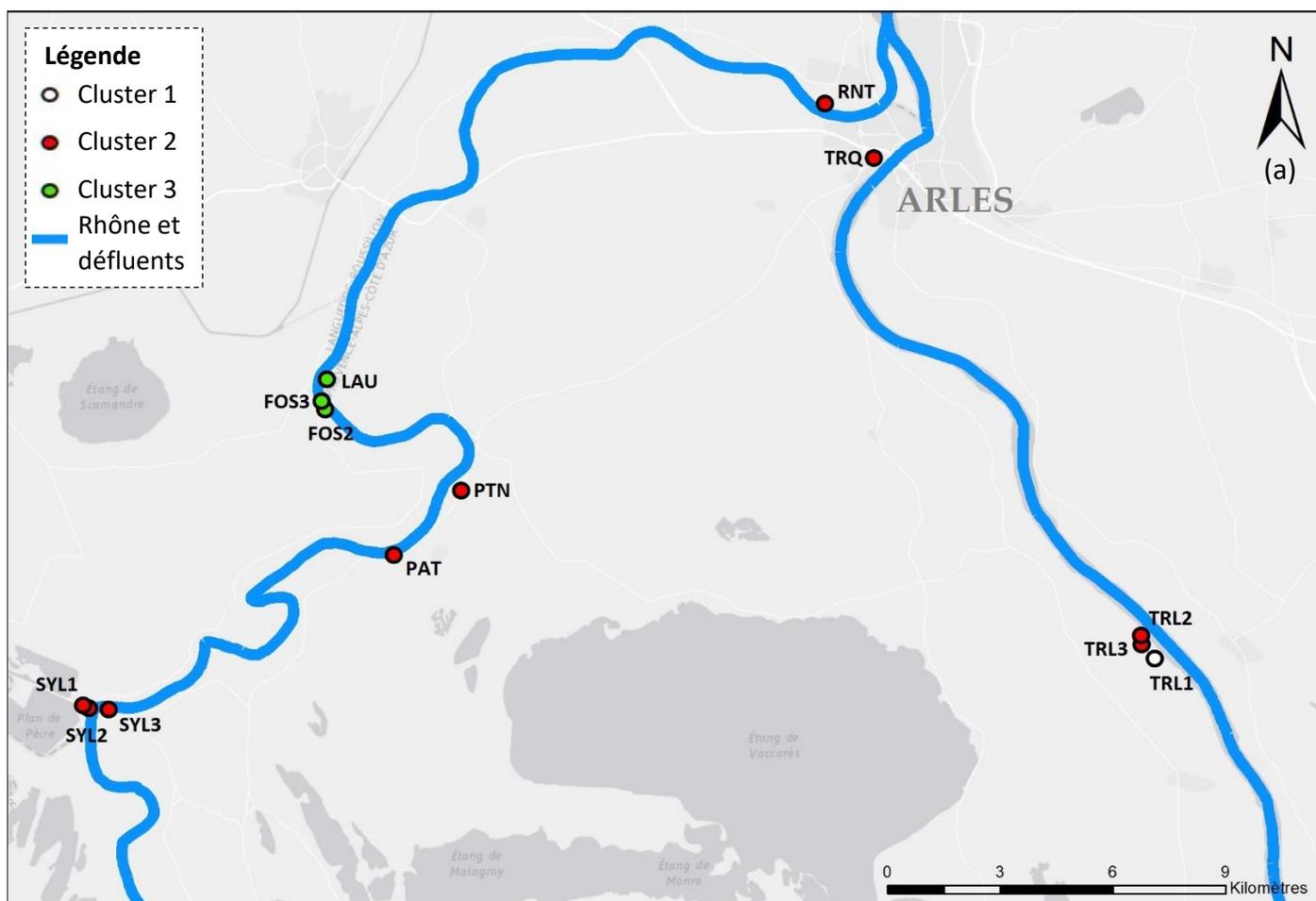


Figure 15 : Cartes de localisation des différents sites en fonction de leur appartenance à un cluster donné (a) Camargue, (b) Beaucaire, (c) Pujaut.

Après réalisation d'un test exact de Fisher, il n'est pas possible d'affirmer que l'appartenance à un cluster donné soit lié à la localisation géographique (p-value = 0.1397, [Figure 15](#), [Annexe 2](#)).

Les grandes tendances de chaque groupe sont résumées dans le [Tableau 7](#), ci-dessous :

Tableau 7 : Tendances observées sur les sites en fonction de leur cluster d'appartenance.

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
<ul style="list-style-type: none"> • Présence de Triton palmé • Diversité d'invertébrés modérée • Absence de poissons • Turbidité faible (claire) 	<ul style="list-style-type: none"> • Absence d'Ecrevisse de Louisiane • Habitats terrestres de mauvaise qualité • Absence d'oiseaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Présence d'Ecrevisse de Louisiane • Présence mineure d'oiseaux et de poissons • Habitats terrestres de qualité modérée • Faible diversité d'invertébrés • Substrat « Matière organique fine »

3.1.5. Résultats de l'analyse de l'évolution de l'occupation des sols

Une comparaison des surfaces occupées par chaque catégorie d'habitats de la classification Corine Land Cover (nomenclature détaillée en [Annexe 3](#)) est réalisée pour l'ensemble des sites historiques. Les surfaces étudiées sont toutes comprises dans un rayon de 1 km autour de ces sites. Bien que les différences constatées sur l'ensemble des zones étudiées ne puissent pas être considérées comme significatives (test de Wilcoxon apparié : $V = 49$, p-value = 0.85), des tendances semblent tout de même se dessiner ([Figure 16 \(a\)](#)).

Pour l'ensemble des sites historiques, on constate en moyenne une augmentation des surfaces des zones urbaines, telles que par exemple le tissu urbain discontinu (+ 18.09 %) et les zones industrielles et commerciales (+20.70 %). Les surfaces de terres dédiées à l'agriculture intensive semblent progresser également, comme les terres arables hors périmètre d'irrigation (+249.96 %) et les rizières (+4.56 %). A l'inverse, les surfaces dédiées à une agriculture moins intensive telle que les systèmes culturaux parcellaires complexes semblent diminuer (-20.60 %). Les milieux ouverts, comme les pelouses et pâturages naturels, semblent également

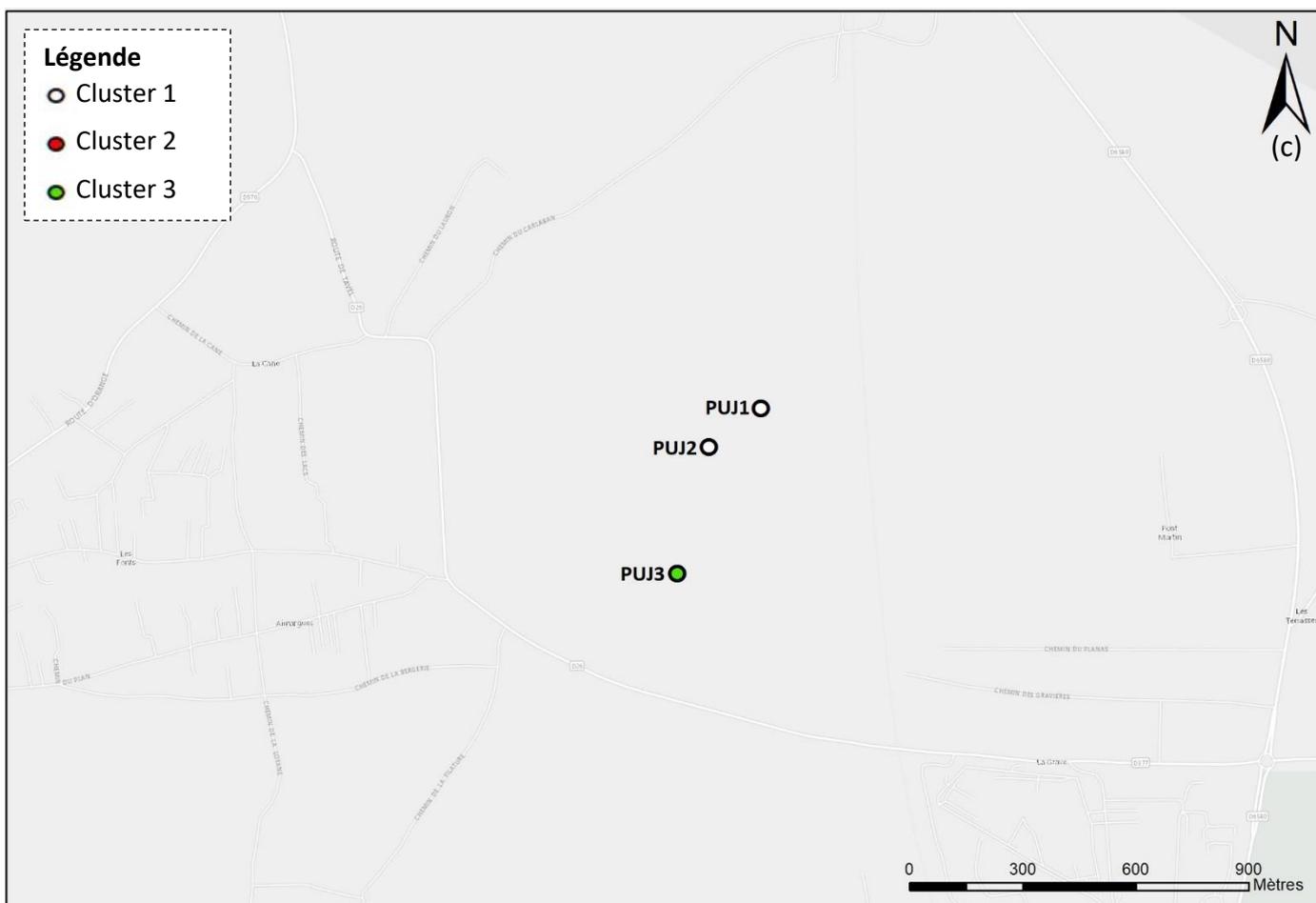
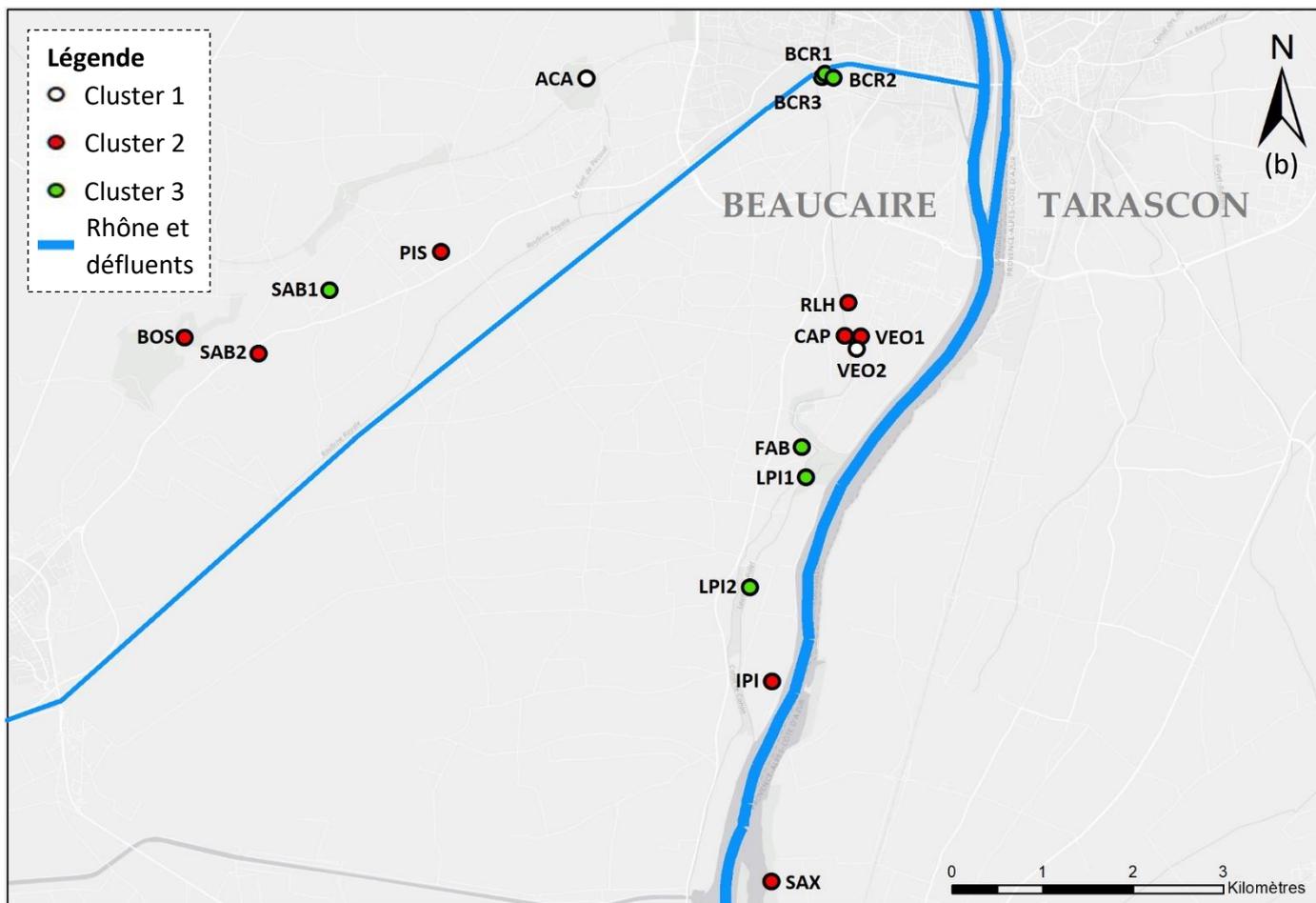


Figure 15 : Cartes de localisation des différents sites en fonction de leur appartenance à un cluster donné (a) Camargue, (b) Beaucaire, (c) Pujaut (suite).

diminuer (-32,61 %), tandis que les forêts et végétations arbustives en mutation semblent à l'inverse être en progression (+67.33 %).

L'évolution de l'occupation des sols aux alentours de deux sites historiques a été étudiée dans le détail : le site Beaucaire 3 (site historique sans présence actuelle de Triton crêté) et la mare de Trinquetaille (site historique avec présence actuelle de Triton crêté) (Figures 16 (b) et 16 (c)). Dans les deux cas, les surfaces occupées par du tissu urbain discontinu progressent (respectivement +18.78 % et +24.72 %) au détriment de milieux moins anthropisés. Par exemple, la surface dédiée aux oliveraies disparaît complètement des abords de Beaucaire 3, tandis que les systèmes culturaux et parcellaires complexes régressent (-41.69 %) aux alentours de la mare de Trinquetaille.

3.2. Zone « La Capelle »

3.2.1. Résultats des prospections au troubleau

D'après les données récoltées par le CEN LR, des larves de Triton crêté ont été détectées au troubleau sur 9 des 36 sites. La présence d'Ecrevisse de Louisiane est quant à elle confirmée sur 4 des 36 sites (Annexe 2(b)). L'ensemble des sites est également marqué par une absence totale de poissons ou d'oiseaux d'eau, mais également par une bonne qualité des habitats terrestres alentours. De plus, la Jussie est totalement absente des milieux prospectés.

3.2.2. Résultats de l'Indice de Pertinence des Habitats du Triton crêté (HSI)

De la même manière que lors des prospections réalisées dans les 4 autres zones d'étude, l'indice HSI (Amphibian & Reptile Groups of UK 2010) de chacun des 36 sites caractérisés a été déterminé à partir des variables relevées sur le terrain. Le HSI maximal relevé est celui du site C28 (0.769) tandis que le plus faible est celui du site C22 (0.236). La moyenne des scores sur l'ensemble des sites est de 0.515 tandis que l'écart-type moyen entre sites est de 0.135 (Figure 17) Le tableau suivant (Tableau 8) récapitule les résultats en fonction de la présence ou l'absence de larves de Triton crêté :

Tableau 8 : Répartition des classes d'Indice de Pertinence des habitats du Triton crêté (HSI) en fonction de la présence de larves de Triton crêté.

Triton crêté	Très mauvaise (0.03)	Mauvaise (0.2)	Moyenne (0.55)	Bonne (0.79)
Absent	13 sites (87 %)	5 sites (63 %)	8 sites (80 %)	1 site (33 %)
Présent	2 sites (13 %)	3 sites (37 %)	2 sites (20 %)	2 sites (67 %)
Total	15 sites (100 %)	8 sites (100 %)	10 sites (100 %)	3 sites (100 %)

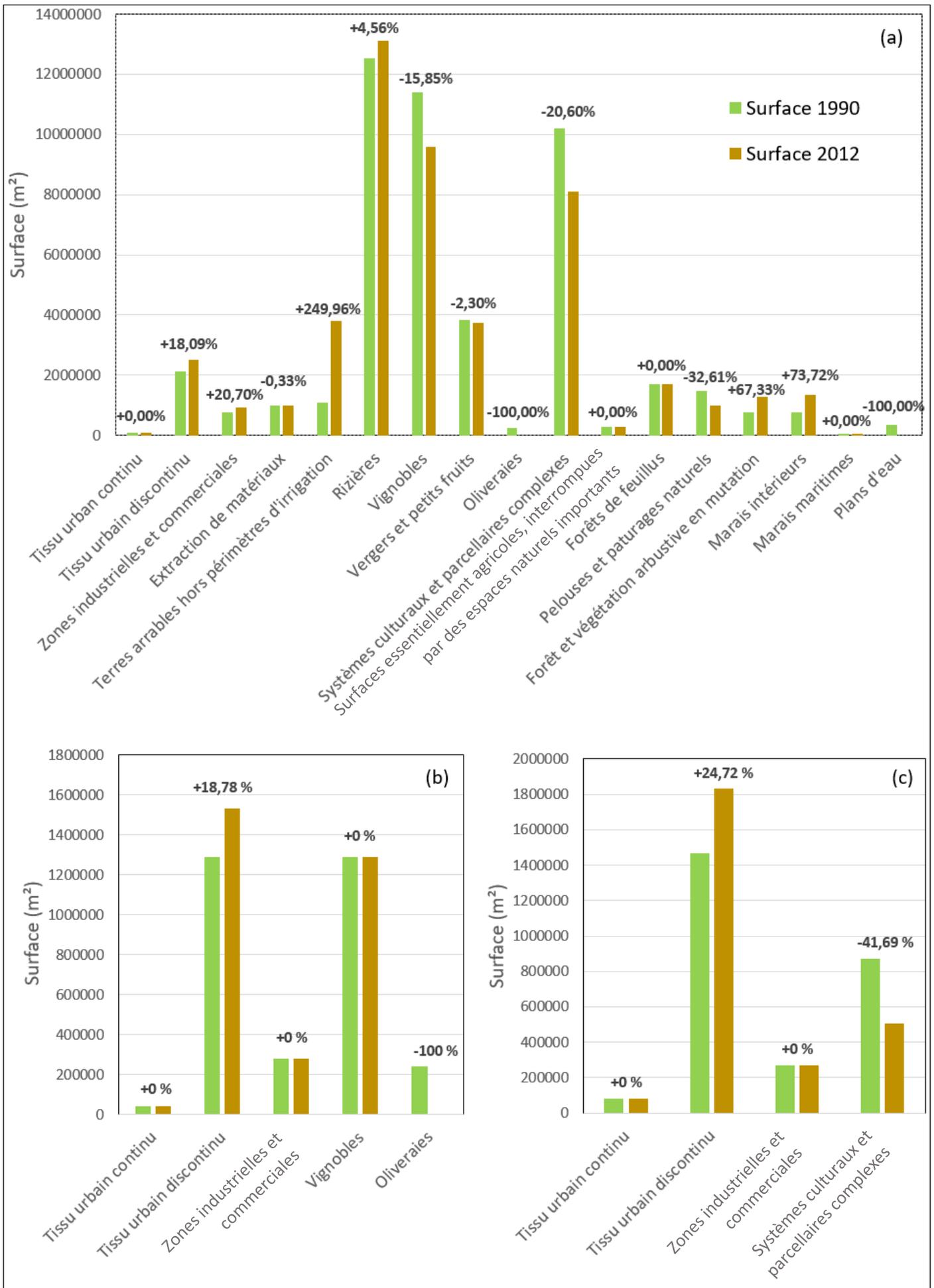


Figure 16 : Evolution de l'utilisation des sols (%) entre 1990 et 2012 dans un rayon d'1 Km autour de (a) l'ensemble des sites historiques, (b) Beaucaire 3, (c) la mare de Trinquetteille.

Un test exact de Fisher est réalisé sur la table des effectifs en fonction de la présence de larves de Triton crêté (**Tableau 8**). D'après les résultats du test, il n'est pas possible d'affirmer que la distribution des sites contenant des larves de Triton crêté entre les différentes classes de probabilité est le fait d'autre chose que du simple hasard ($p\text{-value} = 0.1899$).

3.2.3. Résultats de l'Analyse Factorielle de Données Mixtes (AFDM)

L'AFDM a été réalisée sur les 36 sites prospectés et caractérisés par le CEN LR. Le nombre de variables explicatives est de 10 contre 1 seule variable supplémentaire (**Tableau 2(c)**). D'après le critère de sélection de Karlis-Saporta-Spinalis (Karlis *et al.* 2003), seuls les 2 premiers axes sont conservés dans l'analyse puisque seules leurs valeurs propres (dans l'ordre décroissant 3.797 et 2.350) sont supérieures au seuil calculé (2.014).

Comme pour l'AFDM réalisée sur les autres zones d'étude, chaque catégorie de variables qualitative est soumise à un test de Student ($\alpha = 0.05$) tandis qu'un coefficient de corrélation est calculé entre variables quantitatives et coordonnées des sites le long de chaque axe. Encore une fois, chaque variable est testée en tant que variable active puis en tant que supplémentaire. Le plan factoriel (1,2) est représenté en **Figure 18**. Les résultats des tests sont détaillés dans le **Tableau 9**.

Le premier axe (horizontal) (**Figure 18(a)** et **Tableau 9**) est principalement caractérisé par un gradient de présence de l'Ecrevisse de Louisiane, présente du côté positif (« Ecr.Présence » : est. = 2.25, $p\text{-value} = 5.47 \times 10^{-7}$). Les variables de turbidité de l'eau et de type de substrat suivent le même schéma. En effet, les sites situés du côté négatif de l'axe sont caractérisés par une eau claire et un substrat de composé de matière organique grossière (« Tur.Claire » : est. = -1.42, $p\text{-value} = 1.65 \times 10^{-2}$; « Sub.Matière organique grossière » : est. = -1.82, $p\text{-value} = 3.70 \times 10^{-2}$), tandis que les sites situés du côté positif contiennent plutôt une eau opaque et un substrat composé de matière organique fine (« Tur.Opaque » : est. = 2.14, $p\text{-value} = 6.08 \times 10^{-5}$; « Sub.Matière organique fine » : est. = 2.60, $p\text{-value} = 3.91 \times 10^{-7}$). Parmi les variables quantitatives, la surface totale et la surface à l'ombre semblent fortement corrélées à ce premier axe, en tant que variables actives (cor. = 0.86, $p\text{-value} = 3.19 \times 10^{-11}$; cor. = 0.83, $p\text{-value} = 4.72 \times 10^{-10}$) et en tant que variables supplémentaires (cor. = 0.71, $p\text{-value} = 1.57 \times 10^{-6}$; cor. = 0.72, $p\text{-value} = 7.83 \times 10^{-7}$). Le nombre de mares à 1 Km est quant à lui inversement corrélé à ce premier axe (active : cor. = -0.66, $p\text{-value} = 1.01 \times 10^{-2}$; supplémentaire : cor. = -0.52, $p\text{-value} = 1.12 \times 10^{-3}$). Le score HSI (variable supplémentaire) est également corrélé à ce premier axe (cor. = 0.59, $p\text{-value} = 1.36 \times 10^{-4}$).

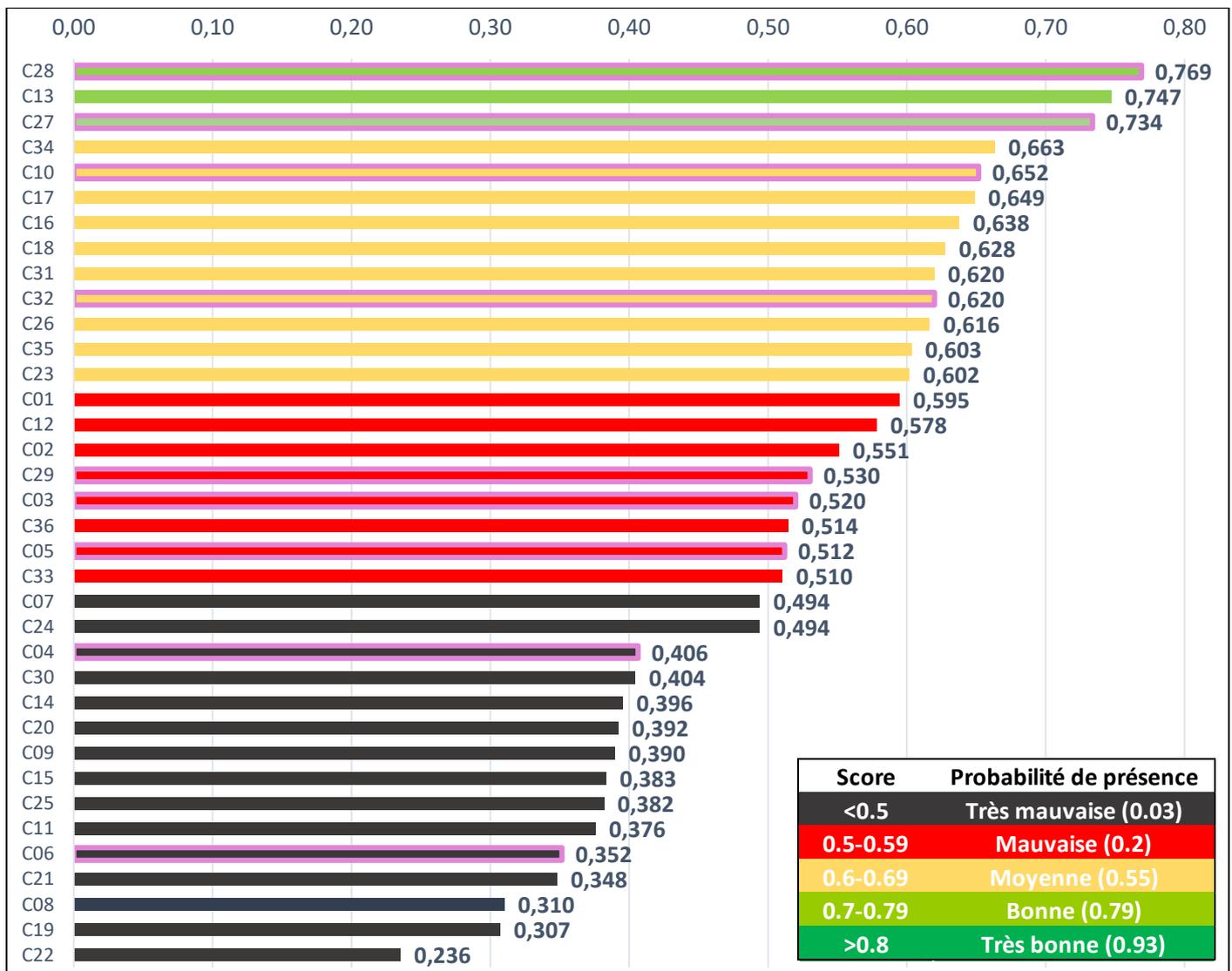


Figure 17 : Indices de pertinence des habitats du Triton crêté (HSI) pour chaque site prospecté à La Capelle. Les barres cerclées de rose indiquent la présence de larves de Triton crêté.

Tableau 9 : Description des dimensions de l'AFDM par les différentes catégories de variables. Plus le test de Student ($\alpha = 0.05$) est significatif et plus les sites portant la catégorie de variable se différencient positivement (estimate positif) ou négativement (estimate négatif) le long de l'axe. La significativité du test augmente selon un gradient de couleur allant du rouge au vert.

Dimension 1	Active		Supplémentaire	
	Estimate	p-value	Estimate	p-value
Sub.Matière organique fine	2.6046	3,9115E-07	1,9902	1,4676E-04
Ecr.Présence	2.2502	5,4672E-07	1,6549	3,1898E-04
Tur.Opaque	2.1359	6,0819E-05	1,5003	5,4314E-03
Inv.Faible	1.0169	1,9049E-02	∅	∅
Asc.Jamais	1.6360	4,4735E-02	∅	∅
Sub.Boue	-0.7858	4,7579E-02	∅	∅
Asc.Toujours	-1.6410	4,3238E-02	∅	∅
Sub.Matière organique grossière	-1.8188	3,7037E-02	∅	∅
Tur.Claire	-1.4184	1,6510E-02	∅	∅
Ecr.Non détectée	-2.2502	5,4672E-07	-1,6549	3,1898E-04

Dimension 1	Active		Supplémentaire	
	Correlation	p-value	Correlation	p-value
Surface totale	0,8550	3,1852E-11	0,7052	1,5654E-06
Surface ombre	0,8278	4,7238E-10	0,7190	7,8324E-07
Score HSI	Non testé		0,5934	1,3648E-04
Mares 1 Km	-0,6641	1,0060E-02	-0,5210	1,1235E-03

Le second axe (vertical) (Figure 18(a) et Tableau 9) est caractérisé par un gradient de présence du Triton crêté : celui-ci est plutôt présent du côté positif de l'axe (« Cre.Présent » : est. = 1.04, p-value = 1.62×10^{-4}), plutôt absent du côté négatif (« Cre.Absent » : est. = -1.04, p-value = 1.62×10^{-4}). La diversité des communautés d'invertébrés semble suivre le même schéma puisque celle-ci est modérée du côté positif (« Inv.Modérée » : est. = 1.57, p-value = 4.32×10^{-5}) et faible du côté négatif (« Inv.Faible » : est. = -0.68, p-value = 4.99×10^{-2}). De plus, les sites situés du côté positif du second axe semblent plus à même de ne jamais être à sec (« Asc.Jamais » : est. = 1.79, p-value = 6.40×10^{-4}) et de contenir un substrat de type boue (« Sub.Boue » : est. = 1.24, p-value = 1.99×10^{-4}). Ceux situés du côté négatif sont turbides (« Tur.Opaque » : est. = -1.26, p-value = 4.38×10^{-3}). Bien que la variable quantitative de surface en macrophytes soit corrélée positivement à ce second axe (cor. = 0.61, p-value = 7.28×10^{-5}), cette corrélation s'inverse lorsque la variable est considérée supplémentaire (cor. = -0.61, p-value = 1.95×10^{-2}). La variable supplémentaire de score HSI est quant à elle encore une fois corrélée à l'axe (cor. = 0.63, p-value = 3.73×10^{-5}).

Le Tableau 10 récapitule les tendances pour chaque type de site (Figure 18 (b)(c) et Tableau 9) :

Tableau 10 : Tendances observées sur les sites de La Capelle en fonction des variables « Triton crêté » et « Ecrevisse de Louisiane ».

Sites de présence de Triton crêté	Sites de présence d'Ecrevisse de Louisiane
<ul style="list-style-type: none"> • Diversité d'invertébrés modérée • Jamais à sec • Substrat boueux • Absence de l'Ecrevisse de Louisiane • Turbidité plutôt faible (eau claire) 	<ul style="list-style-type: none"> • Diversité d'invertébrés faible • Jamais à sec • Substrat composé de matière organique fine • Turbidité forte (eau opaque)

3.2.4. Classification des sites en fonction de leurs caractéristiques

La Classification Hiérarchique en Composantes Principales (HCPC) est réalisée sur la variabilité contenue dans les deux premières dimensions de l'AFDM. Comme lors de l'analyse des résultats des autres zones d'étude, l'ensemble des sites de La Capelle peut être classé en trois groupes (Figures 19 et 20). Un test de χ^2 est réalisé afin d'établir quelles sont les variables les plus déterminantes dans la mise en place de la classification. Les trois plus significatives sont le type de substrat (ddl = 4, p-value = 1.44×10^{-5}), l'absence/présence d'Ecrevisse de

Tableau 9 : Description des dimensions de l'AFDM par les différentes catégories de variables (suite).

Dimension 2	Active		Supplémentaire	
Variables qualitatives	Estimate	p-value	Estimate	p-value
Inv.Modérée	1.5768	4,3205E-05	0,9334	2,0322E-06
Cre.Présent	1.0410	1,6205E-04	0,6193	2,7302E-02
Sub.Boue	1.2417	1,9896E-04	0,8033	1,4034E-02
Asc.Jamais	1.7931	6,4003E-04	1,2304	1,9799E-02
Ecr.Non détectée	0.8463	3,8142E-02	0,8897	2,3954E-02
Inv.Faible	-0.6773	4,9858E-02	∅	∅
Ecr.Présence	-0.8463	3,8142E-02	-0,8897	2,3954E-02
Sub.Matière organique fine	-0.5385	3,3242E-02	-0,6821	3,4755E-02
Sub.Matière organique grossière	-0.7032	2,5541E-02	∅	∅
Tur.Opaque	-1.2613	4,3814E-03	-1,1473	6,6022E-03
Cre.Absent	-1.0410	1,6205E-04	-0,6193	2,7302E-02

Dimension 2	Active		Supplémentaire	
Variables quantitatives	Correlation	p-value	Correlation	p-value
Score HSI	Non testé		0,6307	3,7327E-05
Surface macrophytes	0,6121	7,2839E-05	-0,6055	1,9484E-02

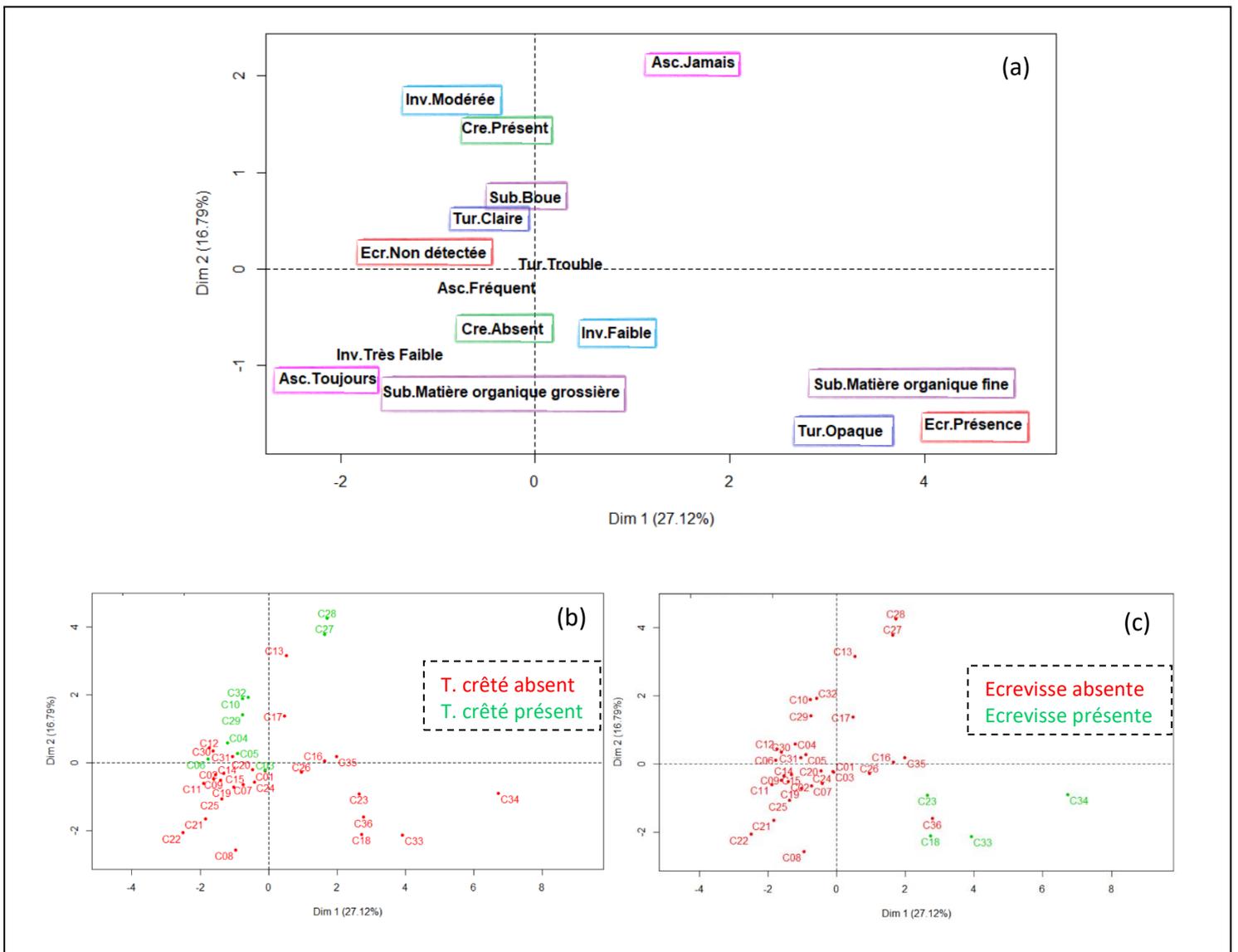


Figure 18 : Représentations dans le plan factoriel (1,2) : (a) des variables qualitatives, (b) de la présence de larves de Triton crêté, (c) de la présence d'Ecrevisse de Louisiane (La Capelle).

Louisiane (ddl = 2, p-value = 8.95×10^{-5}), et la diversité des communautés d'invertébrés (ddl = 4, p-value = 7.59×10^{-4}).

Le premier groupe (Cluster 1) est composé de 22 sites, situés au centre et dans la partie inférieure gauche du plan factoriel (1,2). Le site le plus représentatif du Cluster 1 est le site « C19 ». Au sein de ce groupe :

- Aucun site ne contient d'Ecrevisse de Louisiane (soit 69 % du total des sites sans Ecrevisses de Louisiane).
- L'ensemble des sites passe par des périodes d'assec régulières (fréquent ou toujours).
- La proportion de sites possédant de la matière organique fine comme substrat représente seulement 14 % du total, tandis que l'ensemble des sites à substrat de type matière organique grossière sont dans ce groupe.
- Les variables de surface (macrophytes, ombre, totale) et de score HSI des sites du cluster 1 sont significativement inférieures aux moyennes générales à tous les sites (v-tests = -2.52, -3.55, -3.89, -4.14 ; p-value = 1.17×10^{-2} , 3.91×10^{-4} , 9.99×10^{-5} , 3.45×10^{-5}).

Le second groupe (Cluster 2) est composé de 7 sites, tous situés dans la partie supérieure du plan factoriel (1,2). Le site « C13 » est le plus typique de ce cluster. Au sein de ce groupe :

- 71 % des sites contiennent du Triton crêté et 86 % une diversité d'invertébrés modérée.
- Tous les sites possèdent un substrat composé de boue. Les surfaces couvertes en macrophytes et le score HSI des sites sont significativement plus grands que la surface et le score HSI moyens de l'ensemble des sites prospectés (v-test = 3.86, 3.38 ; p-value = 1.11×10^{-4} , 7.13×10^{-4}).

Le troisième groupe (Cluster 3) est également composé de 7 sites, situés dans et en bordure de la partie inférieure droite du plan factoriel (1,2). Le site le plus proche du barycentre de ce cluster est le site « C23 ». Au sein de ce groupe :

- Tous les sites contenant des Ecrevisses de Louisiane sont inclus dans le cluster 3 (soit 57 % des sites du cluster)
- 86 % des sites possèdent un substrat de type matière organique fin. La part de sites contenant une faible diversité d'invertébrés est la même.
- 67 % du total des sites possédant une turbidité forte (eau opaque) sont dans le cluster 3.

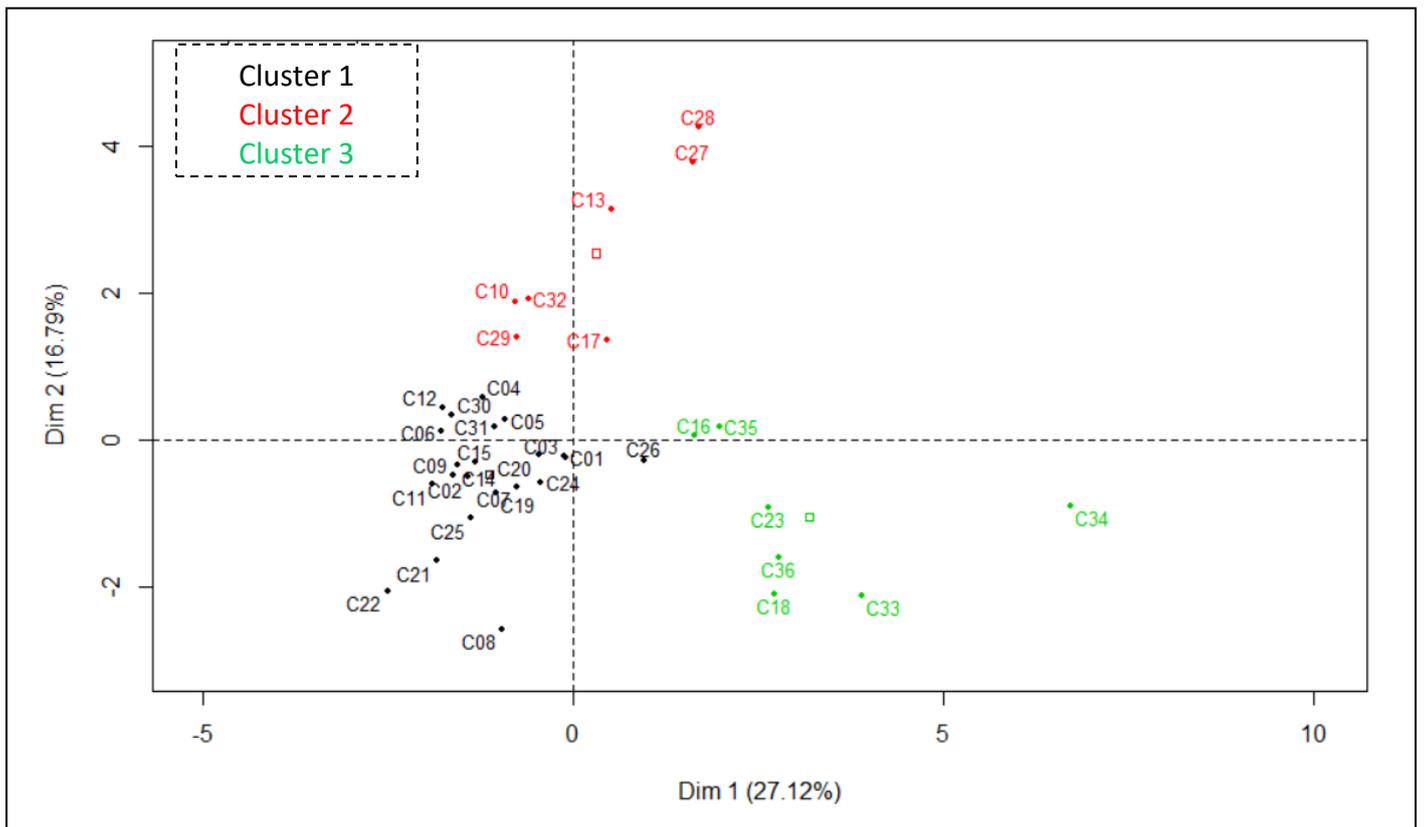


Figure 19 : Représentation dans le plan factoriel (1,2) des trois groupes de sites après classification par HCPC (La Capelle).

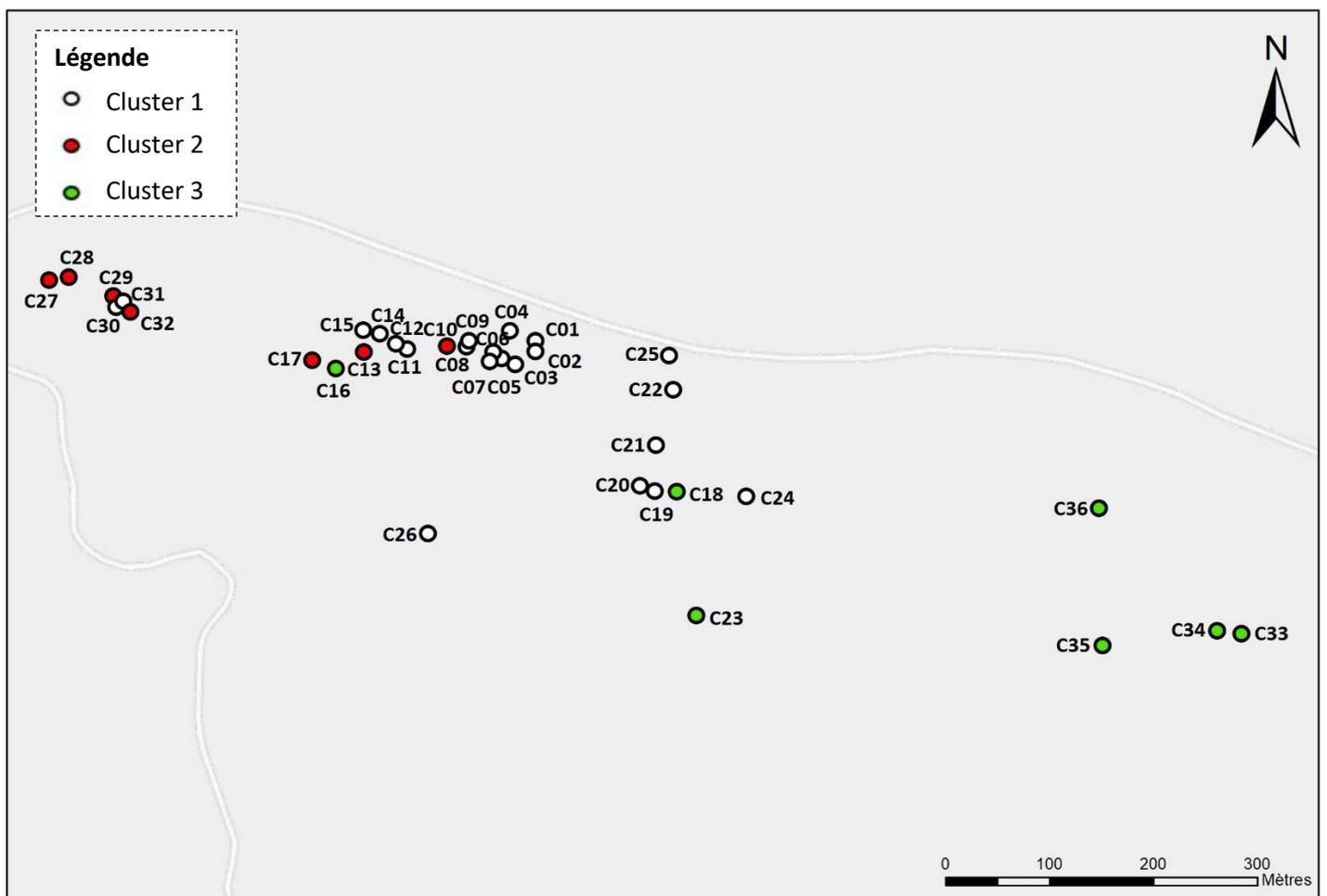


Figure 20 : Carte de localisation des différents sites en fonction de leur appartenance à un cluster donné (La Capelle).

- Les variables de surfaces à l'ombre et totale sont significativement supérieures à leurs moyennes sur l'ensemble des sites prospectés (v-tests = 3.93, 3.25 ; p-value = 8.34×10^{-5} , 1.14×10^{-3}).

Les grandes tendances de chaque groupe sont résumées dans le **Tableau 10**, ci-dessous :

Tableau 10 : Tendances observées sur les sites en fonction de leur cluster d'appartenance.

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
<ul style="list-style-type: none"> • Absence d'Ecrevisse de Louisiane • Assec régulier • Substrat de type matière organique grossière • Scores HSI inférieurs à la moyenne • Surfaces toutes inférieures à la moyenne 	<ul style="list-style-type: none"> • Présence de Triton crêté • Diversité modérée des invertébrés • Substrat de type boue • Scores HSI supérieurs à la moyenne • Surfaces couvertes en macrophytes supérieures à la moyenne 	<ul style="list-style-type: none"> • Présence d'Ecrevisse de Louisiane • Substrat de type matière organique fine • Diversité faible des invertébrés • Turbidité forte • Surfaces totales et à l'ombre supérieures à la moyenne

3.3. Comparaison des Indices de Pertinence des Habitats du Triton Crêté (HSI) entre les sites rhodaniens et « La Capelle »

D'après un test de Wilcoxon non apparié réalisé dans le but de comparer les distributions des scores HSI entre les sites rhodaniens et « La Capelle », il n'est pas possible d'affirmer qu'il existe une différence significative de distribution des HSI entre les deux localités ($W = 573$, p-value = 0.8055).

Tableau 11 : Comparaison des Indices de Pertinence du Triton crêté (HSI) par localités.

Scores HSI	Sites rhodaniens	« La Capelle »
Moyenne des scores	0.503	0.515
Ecart types	0.131	0.135
Triton crêté présent	Mare de Trinquetaille seule	9 sites (larves)
Triton palmé présent	6 sites	Absence de données

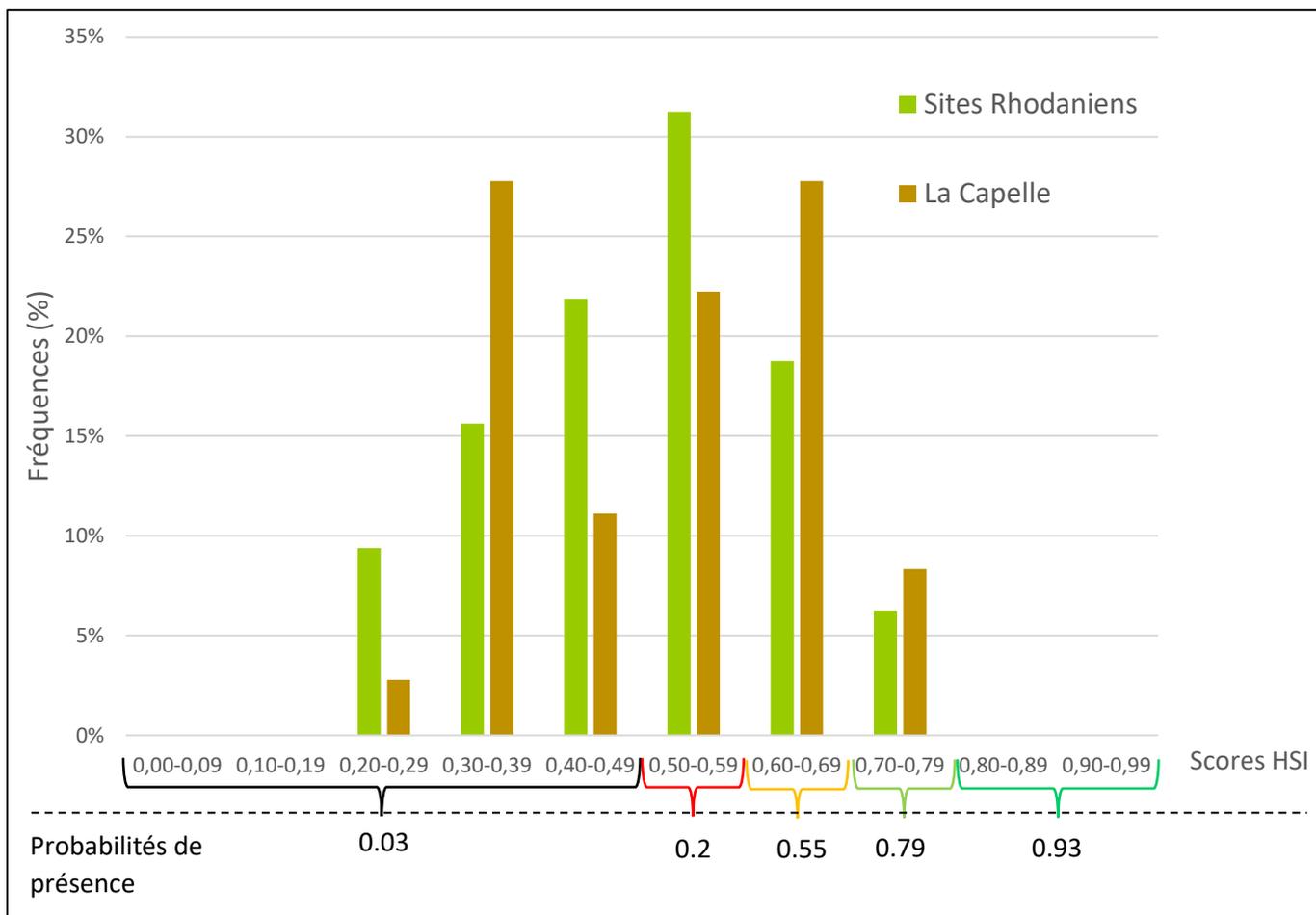


Figure 21 : Comparaison des distributions des scores HSI entre les sites Rhodaniens et « La Capelle ».

3.4. Résultats de la comparaison d'efficacité des nasses à poissons

Bien que les deux distributions se chevauchent (Figure 22), le nombre de Tritons crêtés capturé par les nasses de modèle 2 (entonnoir : 6 cm, diamètre ouvertures : 6.5 cm) est significativement inférieur ($W = 307$, $p\text{-value} = 2.30 \times 10^{-5}$) au nombre de Triton crêtés capturé par les nasses de modèle 1 (entonnoir : 11 cm, diamètre ouvertures : 5.5 cm). Ces dernières sont donc plus efficaces que les nasses de modèle 2.

4. Discussion

4.1. Résultats des prospections, caractérisation et structuration des milieux étudiés

Sur les 32 sites prospectés, aucune larve et aucun adulte de Triton crêté n'ont été capturés. De la même façon, aucun fragment d'ADN de Triton crêté n'a été détecté dans les échantillons amplifiés en laboratoire. Ainsi, aucune des données historiques de présence (autre que la mare de Trinquetaille) n'a pu être confirmée.

Malgré cette absence de résultats positifs, il est intéressant de s'interroger sur la structuration et les caractéristiques écologiques des milieux prospectés. On constate ainsi que deux variables semblent particulièrement opposées l'une à l'autre : la présence de Triton palmé et la présence d'Ecrevisse de Louisiane (Figure 13 (a)(c)(d)). La présence de Triton palmé, qui est une espèce aux exigences écologiques proches de celles du Triton crêté (Geniez & Cheylan 2012), peut être un indicateur de la qualité du milieu par rapport au Triton crêté. A l'inverse, l'Ecrevisse de Louisiane est reconnue pour son action néfaste sur les écosystèmes aquatiques en modifiant les conditions biotiques stationnelles (Gherardi & Acquistapace 2007). En effet, cette Espèce Exotique Envahissante (EEE) très généraliste se nourrit aussi bien de végétaux que d'invertébrés ou de détritus. Cette écologie trophique la rend très compétitive vis-à-vis des espèces partageant les mêmes milieux et impacte négativement les communautés végétales et d'invertébrés aquatiques (Rodríguez-Pérez, Hilaire & Mesléard 2016), mais également les amphibiens. En effet, sa présence affecte la probabilité de reproduction des anoures et des urodèles (Cruz *et al.* 2006a; Cruz, Rebelo & Crespo 2006b; Cruz *et al.* 2008). La diminution de la végétation aquatique qu'elle consomme abondamment et le creusement de terriers en prévision des assecs contribuent à la mise en suspension de particules dans l'eau qui devient turbide (Rodríguez, Bécars & Fernández-Aláez 2003). Des 15 sites abritant de l'Ecrevisse de Louisiane, la cohabitation avec une espèce d'urodèle (Triton palmé) ne se fait que sur un seul d'entre eux (PUJ2), suffisamment complexe et étendu pour permettre le maintien de cette dernière (zones refuges, complexe de mares, ...). L'action délétère des Ecrevisses de Louisiane

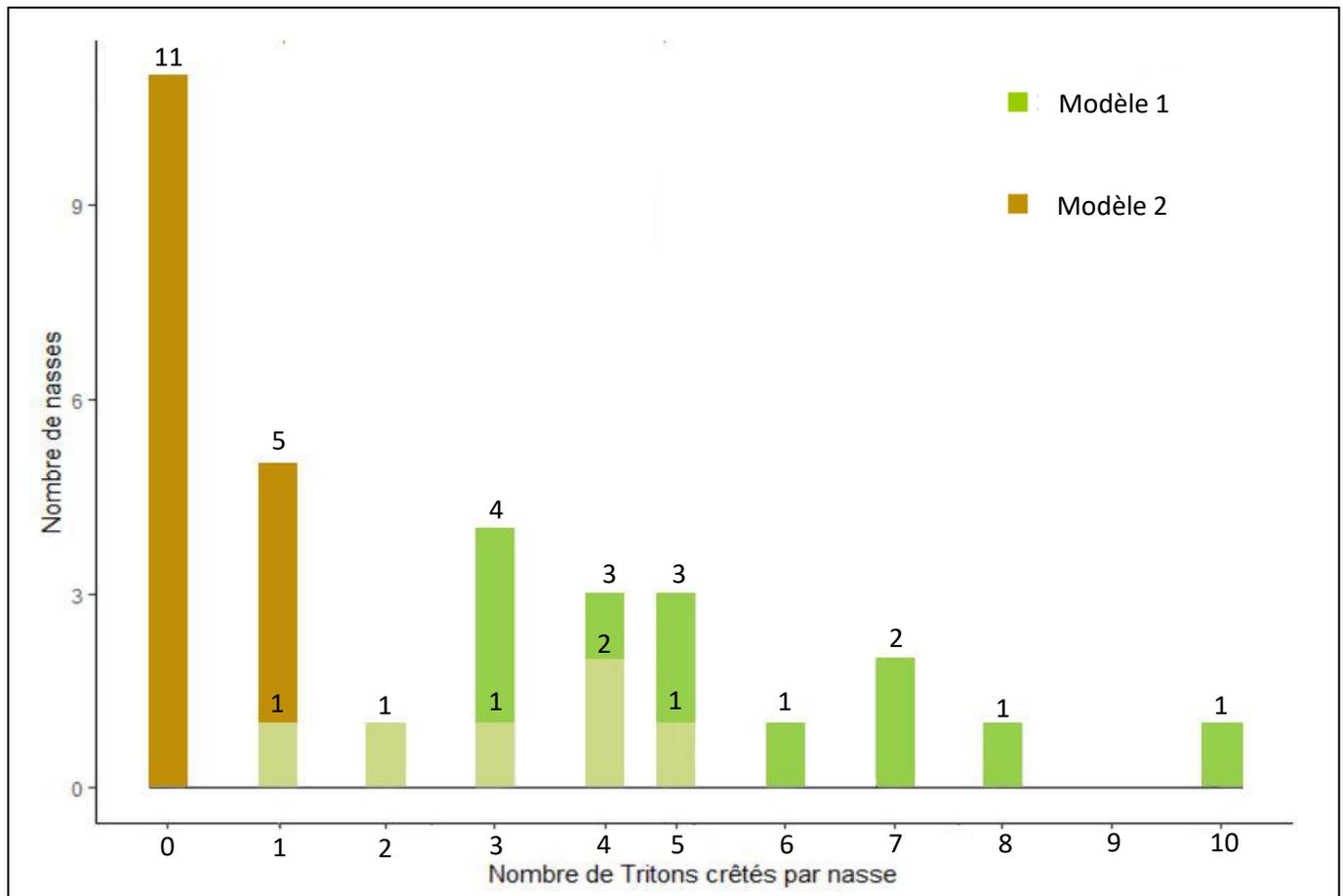


Figure 22 : Nombre de Tritons crêtés capturés à la mare de Trinquetaille par nasse à poisson en fonction du modèle utilisé. La couleur beige représente le chevauchement des histogrammes de chaque modèle de nasse.

n'est sans doute pas étrangère à ce constat. En effet, d'après les résultats de l'analyse multivariée des caractéristiques des milieux (AFDM, [Tableaux 5 et 6](#), [Figure 13](#)) et de la classification hiérarchique (HCPC, [Tableau 7 et Figure 14](#)), les sites à Ecrevisse (qui correspondent globalement au cluster 3 de la classification) présentent une turbidité forte et des communautés d'invertébrés faiblement diversifiées. Il s'agit pour la plupart de sites toujours en eau, ce qui explique aussi la présence de poissons. A l'inverse des sites à Ecrevisse, les sites à Triton palmé (qui correspondent globalement au cluster 1 cette fois-ci) sont plutôt caractérisés par la présence d'une communauté d'invertébrés à la diversité plus importante, une eau plus claire et une absence de poissons qui sont des paramètres préférentiellement sélectionnés par les urodèles. En reprenant les sites un par un, on s'aperçoit que les sites à plus forte potentialité écologique (notamment ceux occupés par le Triton palmé) sont pour la plupart isolés du réseau hydrographique du territoire, plus difficiles d'accès ([Figure 15](#)) ce qui pourrait expliquer qu'ils soient pour le moment exempts d'Ecrevisse de Louisiane.

Cependant, l'action de l'Ecrevisse de Louisiane sur les milieux ne suffit pas à expliquer l'absence de Triton crêté des sites à forte potentialité écologique et caractérisés par la présence du Triton palmé. D'après les [Tableaux 6 et 7](#), la plupart des sites historiques (qui correspondent globalement au cluster 2) possèdent aujourd'hui des caractéristiques peu compatibles avec la présence de Triton crêté : absence quasiment systématique de végétation aquatique, faible (voire très faible) diversité de la communauté d'invertébrés, habitats terrestres de mauvaise qualité. Ainsi, il semblerait que la qualité de ces sites se soit fortement détériorée depuis les dernières observations réalisées il y'a seulement une dizaine d'années. Cependant, l'Ecrevisse de Louisiane n'étant pas présente sur la plupart de ces sites (où en de très faibles densités), d'autres causes de cette dégradation sont à rechercher. En effet, les disparitions d'amphibiens sont souvent le fait de l'action combinée de plusieurs facteurs (Collins & Storfer 2003; Storfer 2003).

La fragmentation et l'anthropisation grandissante des milieux ont probablement leur part de responsabilité dans cette disparition du Triton crêté. L'activité humaine et ses conséquences sur les milieux naturels sont reconnues comme étant très impliquées dans l'accélération du déclin des populations d'amphibiens à travers le monde (McCallum 2007; WWF 2016). Dans la basse vallée du Rhône, une des causes de la destruction des habitats est le comblement des zones humides. En effet, plusieurs sites historiques situés dans la zone « Beaucaire Sud » ont été comblés par des propriétaires terriens (notamment un site à proximité du site RLH) ou dans le cadre de travaux de renforcement des digues autour du Grand Rhône.



Figure 23 : Photographie d'Ecrevisse de Louisiane (*Procambarus clarkii*)

Une autre cause pourrait être le changement de l'utilisation des sols. L'analyse de l'occupation du sol entre 1990 et 2012 (**Figure 16**) révèle une augmentation globale des terres urbanisées ou dédiées à l'agriculture intensive au détriment d'habitats plus favorables aux amphibiens comme les systèmes culturaux et parcellaires complexes. Ces mutations environnementales ont probablement contribué à affecter les stratégies adaptatives (sous l'effet de l'isolement des populations) et les capacités de résilience des populations face à l'émergence d'espèces exogènes. Bien que statistiquement non significatifs à l'échelle globale, ces résultats esquissent des tendances certaines, sachant que dans un contexte de limite méridionale d'aire de répartition, les populations d'amphibiens sont particulièrement sensibles à la perte d'habitats de qualité et à la fragmentation des habitats (Sexton *et al.* 2009; Slatyer *et al.* 2013)..

Enfin, la sécheresse constitue un problème majeur dans la pérennité des populations de Triton crêté. En effet, les assecs printaniers rendent impossible la reproduction de l'espèce ce qui a pour effet de réduire le renouvellement des populations et de causer des déséquilibres de classes d'âge. La présence d'un réseau de mares augmente les chances de pouvoir se reproduire même durant les années les plus sèches, tandis que les populations isolées et cantonnées à un site n'ont aucune autre solution de repli.

4.2. L'Indice de Pertinence des Habitats du Triton crêté (HSI) en limite sud d'aire de répartition : quels constats ?

L'absence de Triton crêté n'a pas permis de contrôler la fiabilité du HSI comme outil prédictif de présence-absence dans le contexte rhodanien. (**Figures 11, 12 et 13(e)**). Un travail sur la qualité des sites a néanmoins pu être effectué. Les zones « Camargue » et « Beaucaire Sud » présentent les plus grandes proportions (significatives) de sites de mauvaises et très mauvaises probabilités de présence du Triton crêté (respectivement 0.03 et 0.2) (**Tableau 4**). Or, seuls deux sites affiliés au cluster 1 (sites à forte potentialité écologique pour le Triton crêté, abritant globalement du Triton palmé) sont présents dans ces zones. L'indication de la qualité des milieux semble donc à première vue plutôt crédible. Ces résultats sont toutefois à nuancer puisque 4 des 6 populations de Triton palmé des sites rhodaniens sont présentes sur des sites aux mauvaises ou très mauvaises probabilités de présence du Triton crêté (**Figure 11**).

Les résultats obtenus sur la zone « La Capelle » par le CEN LR semblent aller dans ce sens. En effet, des larves de Triton crêté ont été retrouvés dans 9 sites, dont 5 appartiennent à des mauvaises et très mauvaises probabilités de présence. Sur ces 5 sites, 4 sont inclus dans le cluster 1 de l'HCPC réalisée sur la zone. Or, les scores HSI du cluster 1 sont significativement



Figure 24 : Photographie de Triton palmé mâle adulte (*Lissotriton helveticus*)

inférieurs à la moyenne des HSI de la zone (**Tableau 10**). En se basant uniquement sur l'indice, il est étonnant de constater que des larves de Triton crêté aient été capturées sur ces sites. Par contre, les sites du cluster 2 sont quant à eux significativement caractérisés par la présence de larves de Triton crêté et par des scores HSI supérieurs à la moyenne. Ces sites présentent également des communautés d'invertébrés plus diversifiées que ceux des autres clusters et des surfaces couvertes en macrophytes supérieures à la moyenne, ce qui témoigne de leur qualité supérieure pour le Triton crêté. Ainsi, ces indices ayant été développés pour des populations de Tritons crêtés du Royaume-Uni (O'Brien *et al.* 2015), les scores HSI de la basse vallée du Rhône doivent être interprétés avec prudence et plus comme des indicateurs globaux de qualité des habitats que comme des prédictors de présence. L'analyse des données de « La Capelle » permet également de consolider les liens entre la présence d'Ecrevisse de Louisiane et des caractéristiques du milieu comme la turbidité de l'eau ou encore la diminution des communautés d'invertébrés et de macrophytes (**Tableaux 9 et 10, Figure 13(a)**). Il est en revanche très difficile de trancher sur le cas du poisson puisque les sites de « La Capelle » en sont tous dépourvus et que des poissons carnassiers n'ont pu être détectés que sur très peu de sites rhodaniens.

Pour la zone « La Capelle », plutôt épargnée jusqu'alors par l'anthropisation, deux hypothèses se posent concernant la répartition des larves de Triton crêté : soit le Triton crêté présente une adaptabilité élevée et sélectionne les sites de reproduction de manière aléatoire, soit certains facteurs (présence d'Ecrevisse notamment) sont considérés comme rédhibitoires par le Triton crêté qui se reporte par défaut sur les sites suboptimaux selon le HSI mais qui en sont exempts. Cette seconde hypothèse semble la plus probable puisque aucun Triton crêté n'a été détecté sur les sites du cluster 3 (**Figures 18 (b) et 19**), ce qui aurait indiqué une vraie répartition aléatoire. De plus, la comparaison de la distribution des sites rhodaniens avec celle de « La Capelle » (**Figure 21, Tableau 11**) en fonction de leur score HSI révèle que les sites rhodaniens suivent une distribution normale des scores, contrairement à « La Capelle ». Ainsi, le nombre de sites de qualité moyenne étant restreint, ceci expliquerait la présence de larves de Triton crêté dans des sites de mauvaise ou très mauvaise qualité. A la lumière de ces résultats, l'Indice de Pertinence des habitats du Triton Crêté ayant été développé pour des populations de Tritons crêtés du Royaume-Uni, (Oldham *et al.* 2000; Amphibian & Reptile Groups of UK 2010) les scores HSI de la basse vallée du Rhône doivent être interprétés avec la plus grande prudence. Ces derniers ne semblent en effet pas adaptés à la prédiction de la présence de Triton crêté dans la basse vallée du Rhône.



Figure 25 : Session 1 sur la mare du Rouinet (RNT) : capture aux pièges Ortmann.

4.3. Biais méthodologiques, difficultés et singularités du contexte méditerranéen

Dans le contexte méditerranéen, la recherche et le piégeage de Triton crêté sont dépendants du régime des précipitations et de la fluctuation des niveaux d'eau. L'hiver et le printemps 2016-2017 ayant été très secs, les niveaux d'eau des nappes phréatiques sont restés bas dans les zones d'étude. Malgré quelques épisodes de précipitations, plusieurs sites ont été rapidement asséchés par des périodes de mistral dès début Avril puis par la chaleur à partir du mois de Mai (Figure 26). L'absence d'eau est doublement problématique puisque d'une part, celle-ci empêche le Triton crêté de se reproduire menaçant ainsi la pérennité des potentielles populations, et d'autre part, elle rend leur détection impossible dans le cadre de prospections par piégeage, au troubleau, ou par la méthode de l'ADNe (Tableau 1). Avec le réchauffement climatique et ses futures conséquences sur l'augmentation des températures dans la zone méditerranéenne, cette difficulté doit absolument être prise en compte lors de l'élaboration de plans expérimentaux concernant la détection du Triton crêté, en ne réalisant par exemple les suivis qu'après un hiver humide ou encore en prévoyant les sessions de terrain le plus tôt possible durant la période de reproduction du Triton crêté.

La question de l'efficacité des différents modèles de nasses à poisson dans la capture du Triton crêté n'a quant à elle jamais été vraiment soulevée dans la littérature scientifique. Les caractéristiques des deux modèles de nasse employés dans cette étude étant proches, celle-ci a débuté sur le postulat implicite que les deux modèles (Figure 7) étaient de même efficacité. Au cours de tests (hors protocole) sur la mare de Trinquetaille, il a été constaté que les nasses de modèle 2 semblaient moins efficaces que les nasses du modèle 1. Une expérience a été montée (Figure 22) et confirme bien que les nasses de modèle 1 sont significativement plus efficaces que celles de modèle 2. Ceci pourrait s'expliquer par le plus petit diamètre des entonnoirs et par l'angle d'incurvation plus prononcé du modèle 1. La plus grande profondeur de ceux-ci empêcherait donc plus efficacement les Tritons crêtés de s'échapper une fois capturés. A l'avenir, une approche expérimentale plus standardisée permettrait de déterminer quels paramètres de conception influencent le plus la probabilité de capture.

Concernant l'analyse de l'évolution de l'occupation des sols entre 1990 et 2012 (Figure 16), ces résultats indiquent plus des tendances que des résultats certains. Bien que la classification Corine Land Cover dispose de suffisamment de classes d'habitats pour être exhaustive, le niveau de précision des polygones des cartes reste trop peu précis pour en tirer

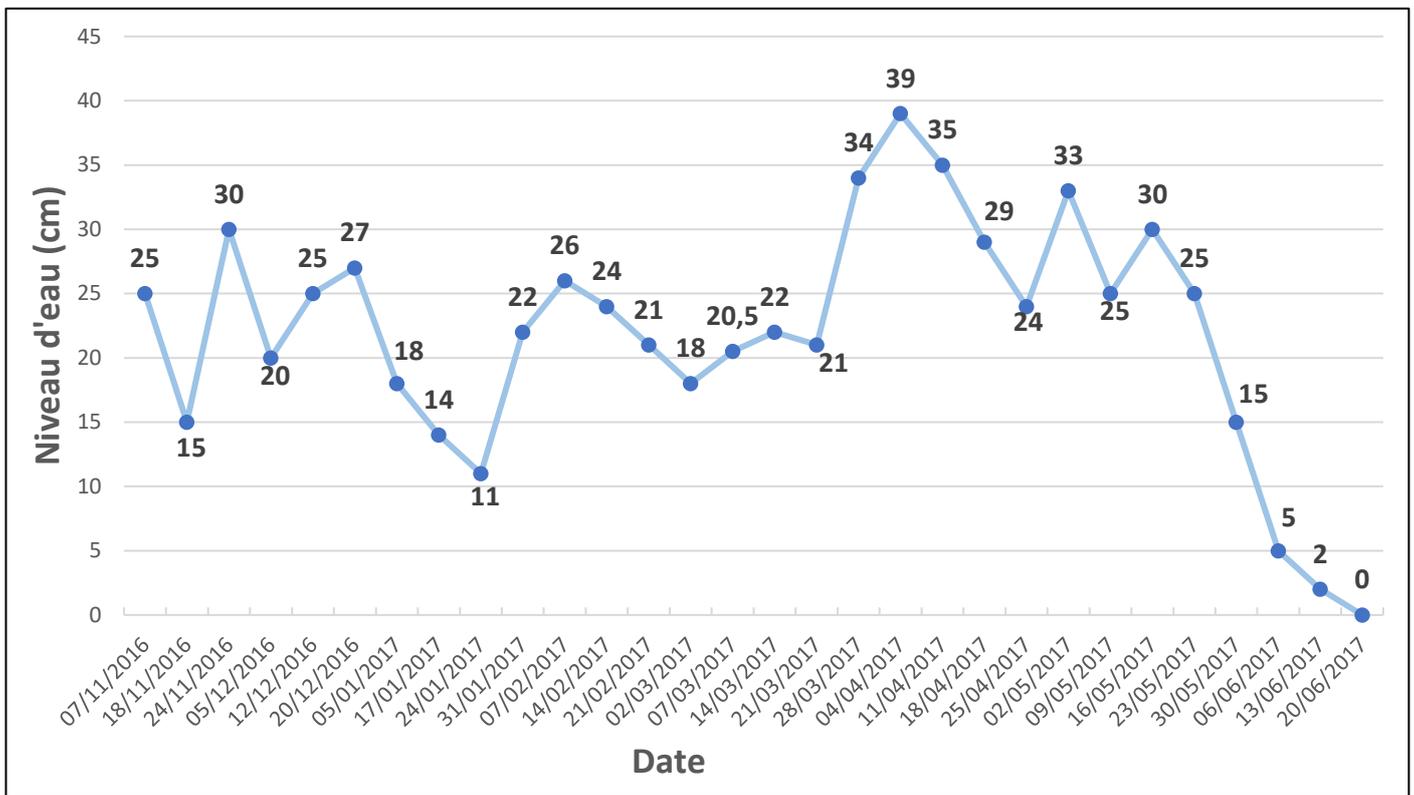


Figure 26 : Variation des niveaux d'eau de la mare de Trinquetteille de l'automne 2016 à son assèchement au début d'été 2017.

une information fiable à 100 %. Si ce constat ne remet pas pour autant en cause les grandes tendances observées, l'utilisation de cartographies d'habitats plus finement détaillées apporterait sans aucun doute un complément d'information précieux aux futures études du même genre.

La méthode de l'ADN environnemental a quant à elle fait ses preuves en termes de détection d'ADN de Triton crêté (Rees *et al.* 2014). Il a notamment été mis en lumière que le risque de faux négatif dans un milieu contenant du Triton crêté (même à très faibles abondances) était très faible (Rees *et al.* 2017). Trois méthodes de capture distinctes à la fiabilité reconnue (Ortmann *et al.* 2006; Madden & Jehle 2013) ont également été employées au cours de cette étude durant la phase maximale d'activité aquatique, la mare de Trinquetaille ayant servi de témoin. Ainsi, même si certains sites n'ont pas pu être échantillonnés par piégeage ou au troubleau (Tableau 1), la validité des résultats obtenus sur ces sites reste entière. De la même façon et sachant ceci, même si l'expérience de comparaison de l'efficacité des nasses à poisson (Figure 22) indique un biais dans la probabilité de capture en fonction du modèle employé, la multiplication des méthodes de détection lors de l'étude permet de penser qu'il est très peu probable que les résultats obtenus soient biaisés.

4.4. Actions à mener : quel avenir pour le Triton crêté dans la basse vallée du Rhône ?

Les résultats de cette étude sont alarmants et témoignent de l'urgence de la situation écologique du Triton crêté dans la basse vallée du Rhône. Dans le but de préserver l'intégrité de cette espèce protégée dans ce contexte, plusieurs actions sont à mener dans un futur proche :

- Restaurer la mare de Trinquetaille, qui est en train de se combler naturellement. Cette dernière population connue de Triton crêté de la région PACA est très probablement la plus méridionale de la planète. Son maintien représente donc un enjeu majeur de préservation de l'espèce.
- Maintenir un suivi à minima du Triton crêté sur les sites historiques dans l'objectif de confirmer la disparition du Triton crêté de ces habitats lors d'une année moins sèche et donc plus favorable à sa détection.
- Rechercher de nouveaux sites potentiellement favorables au maintien du Triton crêté. Il s'agirait d'après les résultats de cette étude, et d'après la littérature scientifique, de s'orienter vers de sites déconnectés des annexes hydrographiques du Rhône, non colonisés par l'Ecrevisse de Louisiane.



Figure 27 : Photographie des tests préliminaires des nasses sur la mare de Trinquetaille.

- Dans le cas où des reliquats de populations de Triton crêté seraient découverts, des travaux d'aménagement ou de création de réseaux de mares pourraient être envisagés dans le but de pérenniser ces populations. Cependant, bien que la translocation de populations d'une mare à une autre ait pu être un succès dans certains cas au Royaume-Uni (Kinne 2004), il s'agit d'opérations risquées dans les contextes aussi évolutifs que celui de la basse vallée du Rhône dans lesquels la pérennité des populations déplacées reste très imprévisible (McNeill 2010).

5. Conclusion

La situation écologique du Triton crêté dans la basse vallée du Rhône est très préoccupante. Aucune des données historiques de présence n'a pu être reconfirmée dans le cadre de cette étude, et les scores de HSI obtenus témoignent globalement du fort niveau de dégradation des milieux aquatiques, même si ceux-ci sont à interpréter avec prudence dans le contexte local. De la même façon, aucun des sites nouvellement prospectés considérés comme potentiellement favorables n'a donné de résultats.

Il est probable que l'effondrement des populations de Triton crêté les plus méridionales soit le résultat, d'une part, de la modification, la destruction et la fragmentation de leurs habitats par les conséquences de l'activité humaine, et d'autre part, par l'introduction de l'Ecrevisse de Louisiane, Espèce Exotique Envahissante connue pour son action délétère sur les milieux. La combinaison de contraintes d'origine anthropique (évolution paysagère) et environnementale (espèces exogènes) est en effet la cause du déclin de nombreuses populations d'amphibiens (Collins & Storfer 2003; Storfer 2003; McCallum 2007).

Le processus de déclin se serait amorcé il y'a plusieurs dizaines d'années mais la disparition des populations, enclenchée rapidement, daterait de la dernière décennie. Il s'agit toutefois de rester prudent face à ces hypothèses car si la confirmation de la présence d'une espèce est sans équivoque, son absence ne peut être déduite qu'à un certain degré de probabilité. Le maintien d'une pression d'échantillonnage à l'avenir sur la basse vallée du Rhône est donc essentiel.

Seule la population isolée de la mare de Trinquetaille parvient à subsister dans son habitat. Toutefois, sa pérennité est actuellement menacée par des projets d'aménagement potentiels, mais également par un processus de comblement naturel qui diminue la fréquence et la période de mise en eau de la mare temporaire, réduisant ainsi les possibilités de reproduction des individus. A l'ère de la COP21 et des accords de Paris sur le réchauffement

climatique, la restauration de la mare de Trinquetaille serait un signal fort s'inscrivant dans une démarche de préservation et de valorisation du patrimoine naturel de la région.

Références bibliographiques

- Alford, R.A. & Richards, S.J. (1999) Global amphibian declines: a problem in applied ecology. *Annual review of Ecology and Systematics*, **30**, 133–165.
- Amphibian & Reptile Groups of UK. (2010) Amphibian and Reptile Groups of the United Kingdom Advice Note 5 : Great crested Newt Habitat Suitability Index.
- Beebee, T.J.C. & Griffiths, R.A. (2005) The amphibian decline crisis: A watershed for conservation biology? *Biological Conservation*, **125**, 271–285.
- Bensettiti, F. & Gaudillat, V. (2002) *Cahiers D'habitats Natura 2000. Connaissance et Gestion Des Habitats et Des Espèces D'intérêt Communautaire. Tome 7. Espèces Animales*. La Documentation française.
- Biggs, J., Ewald, N., Valentini, A., Gaboriaud, C., Dejean, T., Griffiths, R.A., Foster, J., Wilkinson, J.W., Arnell, A., Brotherton, P., Williams, P. & Dunn, F. (2015) Using eDNA to develop a national citizen science-based monitoring programme for the great crested newt (*Triturus cristatus*). *Biological Conservation*, **183**, 19–28.
- Bishop, P.J., Angulo, A., Lewis, J.P., Moore, R.D., Rabb, G.B. & Moreno, J.G. (2012) The Amphibian Extinction Crisis-what will it take to put the action into the Amphibian Conservation Action Plan? *SAPI EN. S. Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society*.
- Brogard, J.C., Cheylan, M. & Geniez, P. (1996) Découverte du triton crêté *Triturus cristatus* (Laurenti, 1768) (Amphibia, Caudata) dans la région méditerranéenne française. *Bulletin de la Société Herpétologique de France*, 9–13.
- Butchart, S.H.M., Walpole, M., Collen, B., van Strien, A., Scharlemann, J.P.W., Almond, R.E.A., Baillie, J.E.M., Bomhard, B., Brown, C., Bruno, J., Carpenter, K.E., Carr, G.M., Chanson, J., Chenery, A.M., Csirke, J., Davidson, N.C., Dentener, F., Foster, M., Galli, A., Galloway, J.N., Genovesi, P., Gregory, R.D., Hockings, M., Kapos, V., Lamarque, J.-F., Leverington, F., Loh, J., McGeoch, M.A., McRae, L., Minasyan, A., Morcillo, M.H., Oldfield, T.E.E., Pauly, D., Quader, S., Revenga, C., Sauer, J.R., Skolnik, B., Spear, D., Stanwell-Smith, D., Stuart, S.N., Symes, A., Tierney, M., Tyrrell, T.D., Vie, J.-C. & Watson, R. (2010) Global Biodiversity: Indicators of Recent Declines. *Science*, **328**, 1164–1168.
- Collins, J.P. & Storer, A. (2003) Global amphibian declines: sorting the hypotheses. *Diversity and distributions*, **9**, 89–98.
- Cruz, M.J., Pascoal, S., Tejedó, M. & Rebelo, R. (2006a) Predation by an Exotic Crayfish, *Procambarus Clarkii*, on Natterjack Toad, *Bufo Calamita*, Embryos: Its Role on the Exclusion of this Amphibian from its Breeding Ponds. *Copeia*, **2006**, 274–280.
- Cruz, M., Rebelo, R. & Crespo, E. (2006b) Effects of an introduced crayfish, *Procambarus clarkii*, on the distribution of south-western Iberian amphibians in their breeding habitats. *Ecography*, **29**, 329–338.
- Cruz, M.J., Segurado, P., Sousa, M. & Rebelo, R. (2008) Collapse of the amphibian community of the Paul do Boquilobo Natural Reserve (central Portugal) after the arrival of the exotic American crayfish *Procambarus clarkii*. *The Herpetological Journal*, **18**, 197–204.

- Dejean, T., Valentini, A., Duparc, A., Pellier-Cuit, S., Pompanon, F., Taberlet, P. & Miaud, C. (2011) Persistence of Environmental DNA in Freshwater Ecosystems (ed JA Gilbert). *PLoS ONE*, **6**, e23398.
- Denoël, M. (2012) Newt decline in Western Europe: highlights from relative distribution changes within guilds. *Biodiversity and Conservation*, **21**, 2887–2898.
- Drechsler, A., Bock, D., Ortmann, D. & Steinfartz, S. (2010) Ortmanns funnel trap—a highly efficient tool for monitoring amphibian species. *Herpetology Notes*, **3**.
- Dutton, D. (2009) Great crested newt : species action plan.
- Edgar, P. & Bird, D.R. (2006) Action plan for the conservation of the crested newt *Triturus cristatus* species complex in Europe. *Strasbourg, France*.
- Egea-Serrano, A., Relyea, R.A., Tejedo, M. & Torralva, M. (2012) Understanding of the impact of chemicals on amphibians: a meta-analytic review: Impact of Pollution on Amphibians. *Ecology and Evolution*, **2**, 1382–1397.
- Francillon-Vieillot, H., Arntzen, J.W. & Geraudie, J. (1990) Age, Growth and Longevity of Sympatric *Triturus cristatus*, *T. marmoratus* and Their Hybrids (Amphibia, Urodela): A Skeletochronological Comparison. *Journal of Herpetology*, **24**, 13.
- Gasc, J.-P. (ed). (2004) *Atlas of amphibians and reptiles in Europe*, 2. Aufl. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris.
- Gendre, T., Cheylan, M., Lombardini, K. & Olivier, A. (2006) Le Triton crêté dans la basse vallée du Rhône (Gard, Vaucluse et Bouches du Rhône). Distribution, problématique de conservation et étude de cas. *CRDP / CORA Isère*, p. Grenoble.
- Gendre, T. & Rufay, X. (2005) *Triturus cristatus* à la Capelle-et-Masmolène (Gard). *Bulletin Meridionalis*, 64–71.
- Geniez, P. & Cheylan, M. (2012) Les amphibiens et les reptiles du Languedoc-Roussillon et régions limitrophes: atlas biogéographique.
- Gherardi, F. & Acquistapace, P. (2007) Invasive crayfish in Europe: the impact of *Procambarus clarkii* on the littoral community of a Mediterranean lake. *Freshwater Biology*, **52**, 1249–1259.
- Griffiths, R.A. (1985) A simple funnel trap for studying newt populations and an evaluation of trap behaviour in smooth and palmate newts, *Triturus vulgaris* and *T. helveticus*. *Herpetological Journal*, **1**, 5–10.
- Grossi, J.-L. & Fonters, R. (2015) *Atlas Des Amphibiens et Reptiles*. LPO Rhône-Alpes.
- Karlis, D., Saporta, G. & Spinakis, A. (2003) A Simple Rule for the Selection of Principal Components. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, **32**, 643–666.
- Kinne, O. (2004) Successful re-introduction of the newts *Triturus cristatus* and *T. vulgaris*. *Endangered species research*, **1**, 25–40.
- Laurenti, J.N. (1768) *Josephi Nicolai Laurenti ... Specimen Medicum : Exhibens Synopsin Reptilium Emendatam Cum Experimentis circa Venena et Antidota Reptilium Austriacorum*. Typ. Joan. Thomae nob. de Trattnern ..., Vienna :
- Lê, S., Josse, J., Husson, F. & others. (2008) FactoMineR: an R package for multivariate analysis. *Journal of statistical software*, **25**, 1–18.
- LPO Rhône-Alpes. (2015) Liste rouge des amphibiens menacés en Rhône-Alpes, Lyon, France.
- Madden, N. & Jehle, R. (2013) Farewell to the bottle trap? An evaluation of aquatic funnel traps for great crested newt surveys (*Triturus cristatus*). *The Herpetological Journal*, **23**, 241–244.

- Marchand, M.A., Roy, C., Renet, J., Delauge, J., Meyer, D. & Hayot, C. (2017) Liste rouge régionale des amphibiens et reptiles de Provence-Alpes-Côte d'Azur.
- McCallum, M.L. (2007) Amphibian decline or extinction? Current declines dwarf background extinction rate. *Journal of Herpetology*, **41**, 483–491.
- McNeill, D.C. (2010) *Translocation of a Population of Great Crested Newts (Triturus Cristatus): A Scottish Case Study*. University of Glasgow.
- Mermod, M., Zumbach, S., Pellet, J. & Schmidt, B. (2010) Notice pratique pour la conservation du triton crêté *Triturus cristatus* & *T. carnifex* et du triton lobé *Lissotriton vulgaris*.
- O'Brien, C.D., Hall, J.E., Orchard, D., Barratt, C.D., Arntzen, J.W. & Jehle, R. (2015) Extending the natural range of a declining species: genetic evidence for native great crested newt (*Triturus cristatus*) populations in the Scottish Highlands. *European Journal of Wildlife Research*, **61**, 27–33.
- Oldham, R.S., Keeble, J., Swan, M.J.S. & Jeffcote, M. (2000) Evaluating the suitability of habitat for the great crested newt (*Triturus cristatus*). *Herpetological Journal*, **10**, 143–155.
- Ortmann, D., Hachtel, M., Sander, U., Schmidt, P., Tarkhishvili, D.N., Weddeling, K. & Böhme, W. (2006) Capture effectiveness of terrestrial drift fences and funnel traps for the Great Crested Newt, *Triturus cristatus*. *Proceedings of the 13th Congress of the Societas Europaea Herpetologica*. pp, p. 105.
- Parrain, N. (2005) Point sur l'état des connaissances du Triton crêté en Drôme Ardèche. *Le Bièvre*, **20**, 3–8p.
- Parrain, N. (2010) *Atlas Préliminaire Des Reptiles et Des Amphibiens de La Drôme*. Société Herpétologique de France / Groupe Herpétologique drômois / LPO Drôme.
- Peterman, W.E., Feist, S.M., Semlitsch, R.D. & Eggert, L.S. (2013) Conservation and management of peripheral populations: Spatial and temporal influences on the genetic structure of wood frog (*Rana sylvatica*) populations. *Biological Conservation*, **158**, 351–358.
- Pounds, J.A. (2001) Climate and amphibian declines. *Nature*, **410**, 639–640.
- Pounds, J., Bustamante, M.R., Coloma, L.A., Consuegra, J.A., Fogden, M.P.L., Foster, P.N., La Marca, E., Masters, K.L., Merino-Viteri, A., Puschendorf, R., Ron, S.R., Sánchez-Azofeifa, G.A., Still, C.J. & Young, B.E. (2006) Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, **439**, 161–167.
- Rees, H.C., Baker, C.A., Gardner, D.S., Maddison, B.C. & Gough, K.C. (2017) The detection of great crested newts year round via environmental DNA analysis. *BMC Research Notes*, **10**.
- Rees, H.C., Bishop, K., Middleditch, D.J., Patmore, J.R.M., Maddison, B.C. & Gough, K.C. (2014) The application of eDNA for monitoring of the Great Crested Newt in the UK. *Ecology and Evolution*, **4**, 4023–4032.
- Richter, K., O. (1995) A simple aquatic funnel trap and its application to wetland amphibian monitoring. *Herpetological Review*, **26**, 90–91.
- Rödger, D., Kielgast, J., Bielby, J., Schmidlein, S., Bosch, J., Garner, T.W.J., Veith, M., Walker, S., Fisher, M.C. & Lötters, S. (2009) Global Amphibian Extinction Risk Assessment for the Panzootic Chytrid Fungus. *Diversity*, **1**, 52–66.
- Rodríguez, C.F., Bécares, E. & Fernández-Aláez, M. (2003) Shift from clear to turbid phase in Lake Chozas (NW Spain) due to the introduction of American red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*). *Hydrobiologia*, **506–509**, 421–426.
- Rodríguez-Pérez, H., Hilaire, S. & Mesléard, F. (2016) Temporary pond ecosystem functioning shifts mediated by the exotic red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*): a mesocosm study. *Hydrobiologia*, **767**, 333–345.

- Sexton, J.P., McIntyre, P.J., Angert, A.L. & Rice, K.J. (2009) Evolution and Ecology of Species Range Limits. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **40**, 415–436.
- Slatyer, R.A., Hirst, M. & Sexton, J.P. (2013) Niche breadth predicts geographical range size: a general ecological pattern (ed D Kleijn). *Ecology Letters*, **16**, 1104–1114.
- Storfer, A. (2003) Amphibian declines: future directions. *Diversity and Distributions*, **9**, 151–163.
- Stuart, S.N. (2004) Status and Trends of Amphibian Declines and Extinctions Worldwide. *Science*, **306**, 1783–1786.
- Taberlet, P., Coissac, E., Hajibabaei, M. & Rieseberg, L.H. (2012) Environmental DNA. *Molecular ecology*, **21**, 1789–1793.
- UICN France, MNHN & SFH. (2015) Liste rouge des espèces menacées en France - Chapitre Reptiles et Amphibiens de France métropolitaine. Paris, France.
- Weldon, C., Du Preez, L.H., Hyatt, A.D., Muller, R. & Speare, R. (2004) Origin of the amphibian chytrid fungus. *Emerging infectious diseases*, **10**, 2100.
- Wilson, E.O. (2003) *The Future of Life*. Vintage Books, New York.
- WWF. (2016) Rapport Planète Vivante.

Annexes :

Annexe 1 : Protocole d'échantillonnage d'ADN environnemental (SpyGen®).

PROTOCOLE DÉTAILLÉ

1. Mettre une paire de gants neuve.
2. Ouvrir le sachet stérile en enlevant la bande plastique supérieure puis en tirant sur les languettes blanches.
3. Effectuer 20 prélèvements d'eau de 100 mL avec la louche stérile autour du site étudié (remplir la louche jusqu'au niveau du portoir) et les verser dans le sachet. *NB : Avant chaque prélèvement, homogénéiser la colonne d'eau en prenant soin de ne pas remettre de matière organique en suspension.*
4. Lorsque les 2 L d'eau ont été prélevés, refermer le sachet puis l'agiter pendant quelques secondes.
5. Mettre une paire de gants neuve.
6. Prendre l'étiquette située dans la boîte et la coller sur la capsule de filtration.
7. Prélever 100 mL d'eau dans le sachet à l'aide de la seringue et les faire passer lentement à travers la capsule de filtration VigiDNA® (en respectant le sens d'écoulement ; flèche « Flow » sur le côté de la capsule). Répéter l'opération jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'eau dans le sachet ou jusqu'au colmatage de la capsule (filtrer au minimum 1 L d'eau). *NB : Avant chaque prélèvement, agiter l'eau contenue dans le sachet à l'aide de la seringue afin d'homogénéiser l'échantillon.*
8. Expulser l'eau restante dans la capsule en utilisant la seringue remplie d'air. Répéter l'opération plusieurs fois si besoin.
9. Fermer le bas de la capsule à l'aide d'un bouchon. Placer l'entonnoir sur le haut de la capsule et verser doucement le tampon de conservation jusqu'à atteindre le haut de la capsule.
10. Fermer le haut de la capsule à l'aide du second bouchon (bien l'insérer pour éviter toute fuite). Retourner le filtre, enlever le bouchon du bas et verser le reste du tampon de conservation à l'aide de l'entonnoir.
11. Refermer le bas de la capsule puis l'agiter vigoureusement pendant environ 1 min. La capsule doit être mise en position horizontale et tournée régulièrement.
12. Renseigner la date de prélèvement et le nom du préleveur sur les deux étiquettes (capsule et boîte) à l'aide d'un marqueur indélébile (non fourni).
13. Ranger la capsule dans sa boîte en respectant le sens « Flow » (flèche vers le bas). Jeter le reste du matériel. *NB : Si le tampon de conservation n'a pas été entièrement utilisé, le renvoyer à SPYGEN.*
14. Stocker la capsule à température ambiante en évitant les fortes variations de température et l'envoyer à SPYGEN dans un délai d'un mois.

Annexe 2(a) : Résultats des prospections, de la caractérisation des habitats et de la classification hiérarchique (HCPC) sur les 32 sites des zones rhodaniennes.

Code	Cluster	ECREVISSE	JUSSIE	SUBSTRAT	TURBIDITE	SURFACE_TOTALE	SURFACE_OMBRE	SURFACE_MACROPHYTES
TRL1	1	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Herbe	Tur.Claire	4000	400	3200
PUJ1	1	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Herbe	Tur.Claire	100	50	20
PUJ2	1	Ecr.Présence	Jus.Absence	Sub.Boue	Tur.Trouble	600	360	480
VEO2	1	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Rocheux	Tur.Claire	28	19,6	0
ACA	1	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Rocheux	Tur.Claire	25	20	15
TRQ	2	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Matière organique fine	Tur.Opaque	12	3,6	3,6
SYL3	2	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Matière organique grossière	Tur.Trouble	100	50	10
PAT	2	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Matière organique grossière	Tur.Claire	360	180	108
TRL3	2	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Rocheux	Tur.Claire	300	90	60
TRL2	2	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Matière organique fine	Tur.Opaque	150	150	0
SYL2	2	Ecr.Présence	Jus.Absence	Sub.Béton	Tur.Trouble	50	15	10
SAX	2	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Boue	Tur.Claire	250	100	0
PTN	2	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Boue	Tur.Opaque	750	225	75
SYL1	2	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Boue	Tur.Opaque	50	5	15
RNT	2	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Boue	Tur.Trouble	1350	270	675
RLH	2	Ecr.Présence	Jus.Absence	Sub.Boue	Tur.Opaque	200	0	160
VEO1	2	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Béton	Tur.Opaque	3400	0	170
CAP	2	Ecr.Non détectée	Jus.Présence mineure	Sub.Boue	Tur.Trouble	2000	200	200
IPI	2	Ecr.Présence	Jus.Absence	Sub.Boue	Tur.Trouble	150	75	0
BOS	2	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Béton	Tur.Claire	380	38	266
SAB2	2	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Rocheux	Tur.Claire	820	0	164
PIS	2	Ecr.Non détectée	Jus.Absence	Sub.Rocheux	Tur.Trouble	16000	0	0
LAU	3	Ecr.Présence	Jus.Présence mineure	Sub.Matière organique grossière	Tur.Claire	2000	400	1000
FOS2	3	Ecr.Présence	Jus.Absence	Sub.Matière organique fine	Tur.Opaque	7000	700	1400
FOS3	3	Ecr.Présence	Jus.Absence	Sub.Matière organique fine	Tur.Opaque	650	455	65
PUJ3	3	Ecr.Présence	Jus.Absence	Sub.Boue	Tur.Claire	900	180	450
FAB	3	Ecr.Présence	Jus.Absence	Sub.Matière organique fine	Tur.Opaque	5500	550	3300
LPI1	3	Ecr.Présence	Jus.Absence	Sub.Boue	Tur.Opaque	900	450	0
LPI2	3	Ecr.Présence	Jus.Présence majeure	Sub.Boue	Tur.Opaque	1800	180	0
SAB1	3	Ecr.Présence	Jus.Absence	Sub.Matière organique grossière	Tur.Trouble	1100	110	440
BCR1	3	Ecr.Présence	Jus.Absence	Sub.Matière organique fine	Tur.Trouble	350	210	35
BCR2	3	Ecr.Présence	Jus.Absence	Sub.Boue	Tur.Opaque	200	140	60
BCR3	3	Ecr.Présence	Jus.Absence	Sub.Matière organique fine	Tur.Trouble	625	62,5	62,5

Code	ARES 1A	ASSEC	INVERTEBRES	POISSON	OISEAUX	HAB_TERRESTRES	CRETE	PALME	SCORE HSI	HISTORIQUE
TRL1	2	Asc.Toujours	Inv.Moderée	Poi.Absence	Ois.Présence mineure	Hab.Moderée	Cre.Absent	Pal.Absent	0,63162072	Non.Historique
PUJ1	4	Asc.Toujours	Inv.Moderée	Poi.Absence	Ois.Absence	Hab.Bonne	Cre.Absent	Pal.Présent	0,565593592	Non.Historique
VE02	4	Asc.Jamais	Inv.Moderée	Poi.Absence	Ois.Absence	Hab.Bonne	Cre.Absent	Pal.Présent	0,712040146	Non.Historique
ACA	0	Asc.Toujours	Inv.Moderée	Poi.Absence	Ois.Absence	Hab.Bonne	Cre.Absent	Pal.Présent	0,569963253	Non.Historique
TRQ	0	Asc.Toujours	Inv.Faible	Poi.Absence	Ois.Absence	Hab.Bonne	Cre.Présent	Pal.Présent	0,394131238	Non.Historique
SYL3	1	Asc.Toujours	Inv.Faible	Poi.Absence	Ois.Absence	Hab.Mauvaise	Cre.Présent	Pal.Présent	0,371073995	Historique
PAT	1	Asc.Jamais	Inv.Forte	Poi.Présence mineure	Ois.Présence mineure	Hab.Mauvaise	Cre.Absent	Pal.Présent	0,443114812	Non.Historique
TRL3	2	Asc.Toujours	Inv.Faible	Poi.Présence possible	Ois.Absence	Hab.Moderée	Cre.Absent	Pal.Présent	0,627750944	Non.Historique
TRL2	2	Asc.Toujours	Inv.Faible	Poi.Absence	Ois.Absence	Hab.Bonne	Cre.Absent	Pal.Absent	0,533461902	Non.Historique
SYL2	1	Asc.Toujours	Inv.Faible	Poi.Présence mineure	Ois.Absence	Hab.Bonne	Cre.Absent	Pal.Absent	0,436217991	Non.Historique
SAX	0	Asc.Fréquent	Inv.Moderée	Poi.Présence majeure	Ois.Présence mineure	Hab.Bonne	Cre.Absent	Pal.Absent	0,394458455	Non.Historique
PTN	1	Asc.Toujours	Inv.Faible	Poi.Absence	Ois.Absence	Hab.Mauvaise	Cre.Absent	Pal.Absent	0,333133331	Non.Historique
SYL1	1	Asc.Fréquent	Inv.Très Faible	Poi.Absence	Ois.Absence	Hab.Bonne	Cre.Absent	Pal.Absent	0,542028839	Historique
RNT	0	Asc.Toujours	Inv.Faible	Poi.Absence	Ois.Présence majeure	Hab.Mauvaise	Cre.Absent	Pal.Absent	0,371632431	Historique
RLH	4	Asc.Toujours	Inv.Faible	Poi.Absence	Ois.Absence	Hab.Mauvaise	Cre.Absent	Pal.Absent	0,287960579	Historique
VE01	4	Asc.Toujours	Inv.Très Faible	Poi.Absence	Ois.Absence	Hab.Bonne	Cre.Absent	Pal.Absent	0,541758567	Historique
CAP	4	Asc.Jamais	Inv.Faible	Poi.Présence majeure	Ois.Absence	Hab.Mauvaise	Cre.Absent	Pal.Absent	0,411730276	Non.Historique
IPI	1	Asc.Toujours	Inv.Très Faible	Poi.Présence mineure	Ois.Absence	Hab.Moderée	Cre.Absent	Pal.Absent	0,251061504	Non.Historique
BOS	1	Asc.Jamais	Inv.Forte	Poi.Présence mineure	Ois.Absence	Hab.Bonne	Cre.Absent	Pal.Absent	0,774443227	Non.Historique
SAB2	2	Asc.Occasionnel	Inv.Faible	Poi.Présence mineure	Ois.Absence	Hab.Mauvaise	Cre.Absent	Pal.Absent	0,61030717	Non.Historique
PIS	1	Asc.Jamais	Inv.Très Faible	Poi.Présence majeure	Ois.Absence	Hab.Mauvaise	Cre.Absent	Pal.Absent	0,226565495	Historique
LAU	2	Asc.Jamais	Inv.Moderée	Poi.Présence majeure	Ois.Présence mineure	Hab.Moderée	Cre.Absent	Pal.Absent	0,485500429	Non.Historique
FOS2	2	Asc.Jamais	Inv.Faible	Poi.Présence mineure	Ois.Présence majeure	Hab.Moderée	Cre.Absent	Pal.Absent	0,402036467	Non.Historique
FOS3	2	Asc.Jamais	Inv.Faible	Poi.Présence mineure	Ois.Absence	Hab.Moderée	Cre.Absent	Pal.Absent	0,623123953	Non.Historique
PUJ3	4	Asc.Jamais	Inv.Faible	Poi.Présence mineure	Ois.Présence majeure	Hab.Bonne	Cre.Absent	Pal.Absent	0,487883631	Non.Historique
FAB	1	Asc.Jamais	Inv.Faible	Poi.Présence mineure	Ois.Présence majeure	Hab.Mauvaise	Cre.Absent	Pal.Absent	0,591321464	Non.Historique
LPI1	1	Asc.Fréquent	Inv.Faible	Poi.Présence mineure	Ois.Présence mineure	Hab.Bonne	Cre.Absent	Pal.Absent	0,568395981	Historique
LP2	1	Asc.Fréquent	Inv.Faible	Poi.Présence mineure	Ois.Présence mineure	Hab.Moderée	Cre.Absent	Pal.Absent	0,538839325	Non.Historique
SAB1	1	Asc.Fréquent	Inv.Faible	Poi.Absence	Ois.Présence mineure	Hab.Moderée	Cre.Absent	Pal.Absent	0,663361099	Historique
BCR1	2	Asc.Jamais	Inv.Faible	Poi.Présence mineure	Ois.Présence mineure	Hab.Moderée	Cre.Absent	Pal.Absent	0,590721437	Historique
BCR2	2	Asc.Fréquent	Inv.Faible	Poi.Présence mineure	Ois.Absence	Hab.Moderée	Cre.Absent	Pal.Absent	0,558293177	Historique
BCR3	2	Asc.Jamais	Inv.Faible	Poi.Présence mineure	Ois.Présence mineure	Hab.Bonne	Cre.Absent	Pal.Absent	0,637184859	Historique

Annexe 2(b) : Résultats des prospections, de la caractérisation des habitats et de la classification hiérarchique (HCPC) sur les 36 sites de la zone « La Capelle ».

Code Cluster	ECREVISSE	SUBSTRAT	TURBIDITE	SURFACE TOTALE	SURFACE OMBRÉE	SURFACE MACROPHYTES	MARES 1KM	ASSEC	INVERTEBRES	CRETE	SCORE HSI
C01	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Trouble	56	28	16,8	35	Asc. Fréquent	Inv. Faible	Cre. Absent	0,59481556
C02	1 Ecr. Non détectée	Sub. Matière organique grossière	Tur. Trouble	28	14	0,28	35	Asc. Fréquent	Inv. Modérée	Cre. Absent	0,55135923
C07	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Trouble	24	18	0	35	Asc. Fréquent	Inv. Faible	Cre. Absent	0,49404252
C08	1 Ecr. Non détectée	Sub. Matière organique grossière	Tur. Opaque	12	10	2,4	35	Asc. Toujours	Inv. Faible	Cre. Absent	0,31020257
C09	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Claire	20	10	7	35	Asc. Fréquent	Inv. Très Faible	Cre. Absent	0,38992613
C11	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Claire	12	3	1,8	35	Asc. Fréquent	Inv. Très Faible	Cre. Absent	0,37584801
C12	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Claire	9	4,5	1,8	35	Asc. Fréquent	Inv. Modérée	Cre. Absent	0,57835632
C14	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Claire	30	7,5	13,5	35	Asc. Fréquent	Inv. Très Faible	Cre. Absent	0,39554612
C15	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Claire	45	11,25	11,25	35	Asc. Fréquent	Inv. Très Faible	Cre. Absent	0,38346636
C19	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Trouble	25	25	0	35	Asc. Fréquent	Inv. Très Faible	Cre. Absent	0,30726007
C20	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Claire	55	41,25	8,25	35	Asc. Fréquent	Inv. Très Faible	Cre. Absent	0,39243192
C21	1 Ecr. Non détectée	Sub. Matière organique grossière	Tur. Trouble	12	9	0	35	Asc. Fréquent	Inv. Très Faible	Cre. Absent	0,34826749
C22	1 Ecr. Non détectée	Sub. Matière organique grossière	Tur. Trouble	4	3	0	35	Asc. Toujours	Inv. Très Faible	Cre. Absent	0,23551357
C24	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Trouble	35	26,25	0	35	Asc. Fréquent	Inv. Faible	Cre. Absent	0,49404252
C25	1 Ecr. Non détectée	Sub. Matière organique grossière	Tur. Claire	35	17,5	35	35	Asc. Toujours	Inv. Faible	Cre. Absent	0,38190416
C26	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Opaque	60	30	60	35	Asc. Fréquent	Inv. Faible	Cre. Absent	0,61641403
C30	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Claire	15	7,5	6	33	Asc. Toujours	Inv. Modérée	Cre. Absent	0,40449326
C31	1 Ecr. Non détectée	Sub. Matière organique grossière	Tur. Claire	30	15	21	33	Asc. Fréquent	Inv. Modérée	Cre. Absent	0,61986695
C03	1 Ecr. Non détectée	Sub. Matière organique fine	Tur. Claire	45	11,25	2,25	35	Asc. Fréquent	Inv. Faible	Cre. Présent	0,51993518
C04	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Claire	60	15	6,6	35	Asc. Fréquent	Inv. Très Faible	Cre. Présent	0,40643445
C05	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Trouble	40	10	0	35	Asc. Fréquent	Inv. Faible	Cre. Présent	0,5119818
C06	1 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Claire	40	0	2	35	Asc. Toujours	Inv. Faible	Cre. Présent	0,3516027
C13	2 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Claire	100	25	90	35	Asc. Jamais	Inv. Modérée	Cre. Absent	0,7472329
C17	2 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Claire	100	25	100	35	Asc. Fréquent	Inv. Faible	Cre. Absent	0,64872016
C10	2 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Claire	75	18,75	18,75	35	Asc. Fréquent	Inv. Modérée	Cre. Présent	0,65169873
C27	2 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Claire	100	50	45	31	Asc. Jamais	Inv. Modérée	Cre. Présent	0,73373267
C28	2 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Trouble	120	30	90	31	Asc. Jamais	Inv. Modérée	Cre. Présent	0,76904164
C29	2 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Trouble	18	13,5	0	32	Asc. Fréquent	Inv. Modérée	Cre. Présent	0,53029852
C32	2 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Trouble	45	11,25	33,75	33	Asc. Fréquent	Inv. Modérée	Cre. Présent	0,61986695
C16	3 Ecr. Non détectée	Sub. Matière organique fine	Tur. Trouble	75	37,5	15	35	Asc. Jamais	Inv. Faible	Cre. Absent	0,63779157
C18	3 Ecr. Présence	Sub. Matière organique fine	Tur. Opaque	72	18	36	35	Asc. Fréquent	Inv. Faible	Cre. Absent	0,62775567
C23	3 Ecr. Présence	Sub. Matière organique fine	Tur. Trouble	70	35	0	35	Asc. Jamais	Inv. Faible	Cre. Absent	0,6018629
C33	3 Ecr. Présence	Sub. Matière organique fine	Tur. Opaque	80	40	0	29	Asc. Fréquent	Inv. Très Faible	Cre. Absent	0,51040877
C34	3 Ecr. Présence	Sub. Matière organique fine	Tur. Opaque	250	62,5	25	29	Asc. Fréquent	Inv. Faible	Cre. Absent	0,66335865
C35	3 Ecr. Non détectée	Sub. Boue	Tur. Trouble	125	62,5	1,25	32	Asc. Fréquent	Inv. Faible	Cre. Absent	0,60335868
C36	3 Ecr. Non détectée	Sub. Matière organique fine	Tur. Opaque	75	56,25	0	33	Asc. Fréquent	Inv. Faible	Cre. Absent	0,51448587

Annexe 3 : Nomenclature détaillée de Corine Land Cover (mise à jour le 02/09/2015)

1. Territoires artificialisés

11. Zones urbanisées

111. Tissu urbain continu	
	Espaces structurés par des bâtiments. Les bâtiments, la voirie et les surfaces artificiellement recouvertes occupent la quasi-totalité du sol. Plus de 80 % de la surface est imperméable. La végétation non linéaire et le sol nu sont exceptionnels.
112. Tissu urbain discontinu	
	Espaces structurés par des bâtiments. Les bâtiments, la voirie et les surfaces artificiellement recouvertes coexistent avec des surfaces végétalisées et du sol nu, qui occupent de manière discontinue des surfaces non négligeables. Entre 30 et 80 % de la surface est imperméable.

12. Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication

121. Zones industrielles ou commerciales et installations publiques	
	Zones bâties et recouvertes artificiellement (zones cimentées, goudronnées, asphaltées ou stabilisées : terre battue, par exemple). Ces zones peuvent comprendre aussi de la végétation ou d'autres surfaces non imperméabilisées. Elles servent à une utilisation industrielle ou commerciale, ou bien à des équipements de service public.
122. Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	
	Autoroutes, voies ferrées, y compris les surfaces annexes (gares, quais, remblais, végétation de moins de 100 m de large). Largeur minimale prise en compte : 100 m.
123. Zones portuaires	
	Infrastructures des zones portuaires, y compris les quais, les chantiers navals et les ports de plaisance.
124. Aéroports	
	Infrastructures des aéroports : pistes, bâtiments et surfaces associées. Tous les équipements au sol qui servent au transport aérien.

1.3. Mines, décharges et chantiers

131. Extraction de matériaux	
	Extraction à ciel ouvert de matériaux de construction (sabl��res, carrières) ou d'autres matériaux (mines à ciel ouvert). Y compris gravières sous eau, à l'exception toutefois des extractions dans le lit des rivières.
132. Décharges	
	Décharges et dépôts des mines, des industries ou des collectivités publiques.
133. Chantiers	
	Espaces en construction, excavations et sols remaniés.

14. Espaces verts artificialisés, non agricoles

141. Espaces verts urbains	
	Espaces végétalisés inclus dans le tissu urbain, généralement à but récréatif ou ornemental et accessibles au public. Y compris parcs urbains et cimetières avec végétation.
142. ��quipements sportifs et de loisirs	
	Infrastructures des terrains de camping, des terrains de sport, des parcs de loisirs, des golfs, des hippodromes, etc. Y compris les parcs aménagés non inclus dans le tissu urbain.

2. Territoires agricoles**21. Terres arables**

	211. Terres arables hors périmètres d'irrigation
	Cultures annuelles pluviales, y compris les jachères, incluses dans un système de rotation. Y compris les cultures irriguées occasionnellement par aspersion, sans équipement permanent.
	212. Périmètres irrigués en permanence
	Cultures irriguées en permanence ou périodiquement, grâce à une infrastructure permanente (canal d'irrigation, réseau de drainage et autres installations). Une grande partie de ces cultures ne pourrait pas être cultivée sans l'apport artificiel d'eau. Non compris les surfaces irriguées occasionnellement.
	213. Rizières
	Surfaces aménagées pour la culture du riz. Terrains plats avec canaux d'irrigation. Surfaces régulièrement recouvertes d'eau.

22. Cultures permanentes

	221. Vignobles
	Surfaces plantées de vignes.
	222. Vergers et petits fruits
	Parcelles plantées d'arbres fruitiers ou d'arbustes fruitiers : cultures pures ou mélanges d'espèces fruitières, arbres fruitiers en association avec des surfaces toujours en herbe. Y compris les châtaigneraies et les noiseraies.
	223. Oliveraies
	Surfaces plantées d'oliviers, y compris oliviers et vignes sur la même parcelle.

23. Prairies

	231. Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole
	Surfaces enherbées denses de composition floristique constituée principalement de graminées, non incluses dans un assolement. Principalement pâturées, mais dont le fourrage peut être récolté mécaniquement. Y compris des zones avec haies (bocages).

24. Zones agricoles hétérogènes

	241. Cultures annuelles associées à des cultures permanentes
	Cultures temporaires en association avec des cultures permanentes sur les mêmes parcelles.
	242. Systèmes cultureux et parcellaires complexes
	Mosaïque de petites parcelles de cultures annuelles diversifiées, de prairies et/ou de cultures permanentes complexes, avec éventuellement des maisons et jardins épars.
	243. Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants
	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des zones naturelles ou semi-naturelles (y compris des zones humides, des plans d'eau ou des affleurements rocheux).
	244. Territoires agroforestiers
	Cultures annuelles ou pâturages sous couvert arboré composé d'espèces forestières.

3. Forêts et milieux semi-naturels**31. Forêts**

311. Forêts de feuillus	Formations végétales principalement constituées par des arbres, mais aussi par des buissons et arbustes en sous-étage, où dominent les espèces forestières feuillues.
312. Forêts de conifères	Formations végétales principalement constituées par des arbres, mais aussi par des buissons et arbustes en sous-étage, où dominent les espèces forestières de conifères.
313. Forêts mélangées	Formations végétales principalement constituées par des arbres, mais aussi par des buissons et arbustes en sous-étage, où ni les feuillus ni les conifères ne dominent.

32. Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée

321. Pelouses et pâturages naturels	Herbages de faible productivité, non soumis ou peu soumis à l'influence de l'homme. Souvent situés dans des zones accidentées. Comportent fréquemment des surfaces rocheuses ou des zones d'autre végétation (semi-) naturelle.
322. Landes et broussailles	Formations végétales basses et fermées, composées principalement de buissons, d'arbustes et de plantes herbacées (bruyères, ronces, genêts, ajoncs, cytises, etc.).
323. Végétation sclérophylle	Végétation arbustive persistante. Y compris maquis, matorrals et garrigues.
324. Forêt et végétation arbustive en mutation	Végétation arbustive et herbacée avec arbres épars. Formations pouvant résulter de la dégradation de la forêt ou d'une recolonisation/régénération de la forêt.

33. Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation

331. Plages, dunes et sable	Étendues de sable, de galets et de graviers, du milieu littoral et continental, naturellement sans végétation, comme les plages, les dunes et les lits de graviers. Y compris les lits des rivières à régime torrentiel.
332. Roches nues	Éboulis, falaises, affleurements rocheux, y compris des zones d'érosion active, rochers et récifs situés au-dessus du niveau des hautes eaux, zones salées intérieures.
333. Végétation clairsemée	Zones à végétation clairsemée, couvrant de 10 à 50 % de la surface. Comprend les steppes, les toundras, les « badlands », les zones karstiques et la végétation éparse de haute altitude.
334. Zones incendiées	Zones affectées par des incendies récents, les matériaux carbonisés étant encore présents.
335. Glaciers et neiges éternelles	Surfaces couvertes par des glaciers ou des neiges éternelles.

4. Zones humides**41. Zones humides intérieures**

411. Marais intérieurs	
	Terres basses généralement inondées en hiver et plus ou moins saturées d'eau en toutes saisons.
412. Tourbières	
	Terrains spongieux humides dont le sol est constitué principalement de mousses et de matières végétales décomposées (principalement des sphaignes). Tourbières exploitées ou non.

42. Zones humides côtières

421. Marais maritimes	
	Terres basses avec végétation, situées au-dessus du niveau de marée haute, susceptibles d'être inondées par les eaux de mer. Souvent en voie de colmatage par des sédiments, colonisées petit à petit par des plantes halophiles (vivant en milieu salé).
422. Marais salants	
	Salines actives ou en voie d'abandon. Parties des marais maritimes mises en exploitation pour la production de sel par évaporation. Les marais salants se distinguent nettement du reste des marais par leurs parcelles d'exploitation et leur système de digues.
423. Zones intertidales	
	Zones côtières sous l'influence de la marée, régulièrement inondées par l'eau de mer 2 fois par jour. Étendues de vase, de sable ou de rochers, généralement sans végétation, comprises entre le niveau des hautes et des basses eaux.

5. Surfaces en eau**51. Eaux continentales**

511. Cours et voies d'eau	
	Cours d'eau naturels ou artificiels qui servent de chenal d'écoulement des eaux. Y compris les canaux. Largeur minimale de prise en compte : 100 m.
512. Plans d'eau	
	Étendues d'eau, naturelles ou artificielles, de plus de 25 hectares, couvertes d'eau stagnante la plus grande partie de l'année.

52. Eaux maritimes

521. Lagunes littorales	
	Étendues d'eau salée ou saumâtre sans végétation, séparées de la mer par des avancées de terre ou autres topographies similaires. Ces surfaces en eau peuvent être connectées à la mer à certains endroits ponctuels, soit de façon permanente, soit de façon périodique à certains moments de l'année.
522. Estuaires	
	Parties terminales à l'embouchure des fleuves, subissant l'influence du flux et reflux des marées.
523. Mers et océans	
	Zones au-delà de la limite des plus basses marées.

Résumé

La basse vallée du Rhône constitue la limite méridionale de l'aire de répartition mondiale du Triton crêté (*Triturus cristatus*). La population de la mare de Trinquetaille, seule population connue de la région PACA, est aujourd'hui menacée par le comblement naturel de la mare et des projets d'urbanisme. L'objectif initial de cette étude était d'identifier d'éventuels nouveaux noyaux de population de Triton crêté, de confirmer des données historiques de présence, puis de caractériser leurs habitats afin d'émettre des prédictions sur leur statut dans la basse vallée du Rhône à l'aide de modèles de présence/absence. Malgré l'utilisation de 4 méthodes de prospections distinctes (ADNe, pièges Ortmann, nasses à poissons, troubleau), aucun Triton crêté n'a pu être détecté sur l'ensemble des sites prospectés. Par le biais d'analyses multivariées (AFDM), de classifications hiérarchiques (HCPC) et d'une analyse de l'évolution de l'occupation des sols, il apparaît que l'accélération du déclin des populations de Triton crétés dans le contexte rhodanien est probablement liée à des facteurs anthropiques (fragmentation et destruction des habitats) et environnementaux (action délétère de l'Ecrevisse de Louisiane sur les milieux). La mare de Trinquetaille est donc plus que jamais un enjeu de conservation majeur et sa restauration doit être sérieusement envisagée.

Abstract

The lower Rhone valley constitutes the southern limit of the Great crested newt's (*Triturus cristatus*) world range. The population of the pond of Trinquetaille, the only known population of the PACA region, is today threatened by the natural filling of the pond and urban planning projects. The initial objective of this study was to identify potential new Great crested newt population nuclei, to confirm historical presence data and then to characterize their habitats in order to make predictions about their status in the lower Rhone valley using presence / absence models. Despite the use of 4 different methods of surveying (eDNA, Ortmann traps, fish traps, amphibian dip net), no Great crested newt could be detected on all the surveyed sites. Through multivariate analyzes (AFDM), hierarchical classifications (HCPC) and an analysis of the evolution of land use, it appears that the acceleration of the decline of the Great crested newt populations in the Rhodanian context is linked to both anthropogenic (fragmentation and destruction of habitats) and environmental factors (deleterious action of the Crayfish *Procambarus clarkii* on the environment). The pond of Trinquetaille is therefore more than ever a major conservation issue and its restoration must be seriously considered.

Mots clés : Triton crêté ; ADN environnemental ; Biologie de la conservation ; Ecrevisse de Louisiane ; Ecologie du paysage