

Influence du changement climatique sur la biodiversité

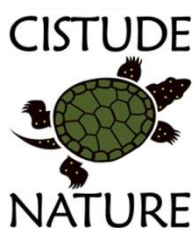
Cas de la grenouille des Pyrénées (*Rana pyrenaica* Serra-Cobo, 1993) :
évolution diachronique de l'abondance de ses têtards



GREGOIRE Loreyna

Stage effectué du 12 mars au 25 août 2017
à l'**association Cistude Nature**, chemin du Moulinât, 33185 Le Haillan
sous la direction scientifique des Messieurs **Matthieu BERRONEAU** et **Thomas RUYS**

Rapporteur : M. **Franck d'AMICO**



À Hortie.

Remerciements

Je souhaite remercier le Directeur de l'association Cistude Nature, Monsieur Christophe COÏC, son Président, Monsieur Laurent SOULIER, ainsi que l'équipe en charge du recrutement, de m'avoir permis de réaliser mon stage au sein de leur structure. Ce dernier fut possible grâce au financement de l'Europe, de la région Nouvelle-Aquitaine, des départements de la Gironde et des Pyrénées-Atlantiques que je remercie également.

Merci aussi à l'équipe de Cistude Nature, ainsi que leurs collaborateurs, pour la chaleur de leur accueil et le partage de leur expérience.

Mes remerciements les plus sincères vont à mes maîtres de stage, Messieurs Matthieu BERRONEAU et Thomas RUYS, dont la patience, la générosité et la gentillesse ne sont plus à démontrer. Leur disponibilité et leur soutien m'ont été indispensables pour la réussite de ce stage.

J'adresse également mes remerciements à l'équipe pédagogique de la licence professionnelle de Biologie appliquée aux écosystèmes exploités, qui m'a permis d'intégrer cette formation et d'assimiler les connaissances théoriques nécessaires à la bonne pratique de ce stage.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont, d'une façon ou d'une autre, contribué à la réussite de ce stage ainsi qu'à la rédaction de ce rapport, avec une pensée particulière pour Madame Lisa WALLS et Monsieur Bryan CARROLL dont le soutien a été indéfectible.

Avant-propos

Cistude Nature est une association « loi 1901 » créée en 1995. Elle est agréée au niveau régional :

- au titre de la protection de l'environnement
- comme association éducative complémentaire de l'enseignement public
- et au titre de la Jeunesse et de l'Education Populaire par la DRJSCS Aquitaine.

Ses activités relèvent de la protection du patrimoine naturel, au travers de missions de conservation d'espèces, de gestion de milieux naturels, de sensibilisation du public à l'environnement ou encore de publications diverses (atlas, films, maquettes pédagogiques...).

En 2012, Cistude Nature met en place le programme pluriannuel de conservation de la grenouille des Pyrénées (2012-2014), dans un but de sensibilisation, de recherche de nouvelles populations et de suivi de celles existantes.

Quatre ans plus tard, l'association lance le programme « Sentinelles du Climat » (2016-2021), dont le but est l'étude de l'influence du changement climatique sur la biodiversité, au travers du suivi de plusieurs espèces choisies stratégiquement : les « sentinelles ». Parmi elles figurent la marmotte des Alpes (*Marmota marmota*), les lézards catalan (*Podarcis liolepis*) et de Bonnal (*Iberolacerta bonnali*), et la grenouille des Pyrénées ; si j'ai procédé aux suivis de chacune de ces espèces de montagne durant mon stage, c'est sur la grenouille des Pyrénées que se centre le présent rapport.

<http://www.cistude.org/>

Table des matières

Introduction.....	8
Matériel et méthodes	10
<i>Présentation de la grenouille des Pyrénées</i>	<i>10</i>
<i>Présentation du territoire d'étude</i>	<i>11</i>
<i>Méthode d'inventaire des têtards</i>	<i>12</i>
<i>Méthode d'estimation de l'abondance des têtards.....</i>	<i>15</i>
<i>Méthode de recherche de variables corrélées.....</i>	<i>16</i>
Résultats	17
<i>Données brutes de comptage</i>	<i>17</i>
<i>Estimation statistique de l'abondance des têtards</i>	<i>20</i>
<i>Recherche de variables corrélées.....</i>	<i>23</i>
Discussion.....	25
Conclusion	28
Références bibliographiques.....	30
Annexes	34
<i>Annexe I. Répartition du temps de travail durant le stage.....</i>	<i>34</i>
<i>Annexe II. Fiche - description de la placette</i>	<i>35</i>
<i>Annexe III. Fiche - données de présence et d'échantillonnage</i>	<i>36</i>

Figures et tableaux

Figure 1. Individu adulte de <i>Rana pyrenaica</i> dans son habitat.....	10
Figure 2. Têtard de <i>Rana pyrenaica</i>	10
Figure 3. Site A, torrent encaissé sur roche nue formant une vasque.	11
Figure 4. Emplacement des sites d'étude de la grenouille des Pyrénées.	12
Figure 5. Répartition des placettes le long du site A.....	13
Figure 6. <i>Heatmap</i> (carte de chaleur) du site F.....	18
Figure 7. Nombre moyen de têtards comptés par placette inventoriée sur l'ensemble des sites, de 2012 à 2017.....	19
Figure 8. Evolution du nombre moyen de têtards par placette obtenu à partir des données brutes, de 2012 à 2017.....	20
Figure 9. A gauche : effectifs estimés de têtards de <i>Rana pyrenaica</i> par mètre carré des sites modélisés par modèle	22
Figure 10. Cercle des corrélations obtenu à partir de l'analyse en composantes principales. 23	
Figure 11. <i>Corplot</i> illustrant la corrélation (test de Pearson) entre 4 variables: l'estimation du nombre total de têtards par an, et les données climatiques de l'hiver précédant le comptage: les températures moyennes maximales et minimales, ainsi que la pluviométrie.....	24
 Tableau 1. Statistique descriptive des données brutes de comptage de têtards sur l'ensemble des sites.	17
Tableau 2. Exemple de données brutes de comptage de têtards, par visite et par placette, en 2017 sur le site F.....	18
Tableau 3. Nombre moyen avec écart-type de têtards par placette, par site et par année... 19	
Tableau 4. Résultats des deux modèles à N-mélanges de Royle (l'un tenant compte de la variable temporelle, l'autre non), par an et par site : effectif estimé des têtards de <i>Rana pyrenaica</i> avec.....	21

Introduction

A l'échelle des milliers d'années, le vivant a su évoluer pour s'adapter aux changements climatiques (Mallard *et al.*, 2016). Or, selon les constatations de la communauté scientifique, la biodiversité subit actuellement une sixième extinction de masse (Ceballos *et al.*, 2017) ; la cinquième concernait l'extinction des dinosaures non aviens, marquant la crise du Crétacé-Tertiaire. De fait, le changement climatique actuel est à une toute autre échelle : entre 1880 et 2012, la surface de la terre s'est réchauffée d'environ 0,85°C (IPCC, 2014) ; et d'ici 2100, les températures moyennes devraient augmenter de plus de 4°C (GIEC, 2013). Cette rapidité met à mal la capacité de résilience du vivant.

De nos jours, les facteurs responsables de l'érosion de la biodiversité sont la modification et la fragmentation de l'habitat, la surexploitation, la pollution, l'appauvrissement des écosystèmes et la propagation des espèces envahissantes (IPCC, 2014).

L'ensemble de ces facteurs combiné au trop rapide changement climatique sont les causes de disparitions de nombreuses espèces (Root *et al.*, 2003). Ce dernier exerce donc une pression sur les écosystèmes naturels, de façon directe mais aussi en accentuant les effets des autres causes de diminution de la biodiversité. Toutes ces menaces ont une réelle incidence sur la communauté végétale comme animale (Cameron & Scheel, 2001).

Si on sait que changement climatique, modification et fragmentation de l'habitat, surexploitation, pollution, appauvrissement des écosystèmes et propagation des espèces envahissantes ont une incidence négative sur la biodiversité, la capacité d'adaptation du vivant reste encore peu étudiée. Les principaux événements inhérents au changement climatique sont (Daufresne *et al.*, 2009 ; Feehan *et al.*, 2009) :

- la diminution de la diversité des espèces et de leurs effectifs, le déplacement de leurs aires de répartition (colonisation vers des climats plus cléments par les espèces exotiques, vers de plus hautes altitudes pour les autres ; extinction pour celles ne pouvant opérer les déplacements suffisants)
- le changement de la phénologie des espèces : avancée des dates de reproduction, éclosions précoces, modification des dates de migration, entraînant une entrée en compétition d'espèces aux niches écologiques proches ; détérioration des diverses relations interspécifiques
- le changement de la physiologie des espèces avec une diminution de la fitness.

Finalement, les espèces auront trois réponses face au changement climatique : la persistance en s'adaptant malgré le changement, la migration vers un environnement plus approprié, ou l'extinction locale (Davis & Shaw, 2001).

Une façon d'étudier la réponse de la biodiversité face au changement climatique est l'étude du comportement d'espèces sélectionnées et de leur évolution face à cette pression. L'avantage est une réduction des paramètres à prendre en compte et la simplification d'une approche rendue déjà complexe par l'interdépendance de tous les facteurs.

Ces taxons doivent répondre à un certain nombre de critères pour que les effets du changement soient suffisamment remarquables :

- des capacités de développement faible
- une évolution lente
- une aire de répartition réduite
- un mode de vie spécialiste

Ces espèces, réduisant leur présence à des milieux très particuliers, sont les premières à apparaître dans le point de mire de l'extinction (Feehan *et al.*, 2009) ; leur adaptation génétique est probablement plus lente que le changement climatique (Bradshaw & Holzapfel, 2006). Elles deviennent indicatrices de la biodiversité ; ce sont des repères qui permettent une évaluation concrète de l'évolution du vivant.

Parmi elles, se trouvent les amphibiens, les reptiles, les micromammifères et certains invertébrés. C'est pour cette raison que la grenouille des Pyrénées, qui répond à tous les critères cités, a été choisie pour le programme Sentinelles du Climat. De plus, l'écosystème montagnard qu'elle occupe est particulièrement sensible au changement climatique (Thomas *et al.*, 2004 ; Engler *et al.*, 2011). En outre, ectotherme, cette grenouille dépend fortement du niveau de température et du rythme des saisons ; elle a donc une plus forte probabilité d'extinction en réponse au changement climatique (Huey *et al.*, 2009 ; Moreno-Rueda *et al.*, 2011 ; Aragón *et al.*, 2010). Enfin, elle faisait déjà l'objet d'un suivi depuis 2012 au travers du programme de conservation de l'espèce mené par Cistude Nature, ce qui permettait déjà de disposer de données exploitables.

L'objectif de cette étude est de poursuivre les suivis menés les années précédentes, afin d'obtenir un ensemble de données qui, par leur traitement et leur interprétation, permettront d'appréhender l'évolution des populations de grenouille des Pyrénées et peut-être, révéleront des pistes de réponse de l'espèce face au changement climatique.

Matériel et méthodes

Présentation de la grenouille des Pyrénées



Figure 1. Individu adulte de *Rana pyrenaica* dans son habitat.
©M. Berroneau

L'espèce *Rana pyrenaica*, décrite pour la première fois en 1993 par Serra-Cobo, est une petite grenouille brune (4 cm de long en moyenne) de la famille des *Ranidae*. Elle est endémique de l'ouest de la chaîne pyrénéenne ; on ne la trouve que sur des secteurs restreints d'Espagne en Aragon et en Navarre (Serra-Cobo, 1993 ; Llamas *et al.*, 1998 ; Pleguezuelos *et al.*, 2002 ; Llamas Saíz & Martínez Gil, 2005 ; Gosá *et al.*, 2010 ; Manenti & Bianchi, 2011 ; Manenti, 2014), et de petits territoires des Pyrénées-Atlantiques (Berroneau, 2015 ; Lescure & de Massary, 2012 ; Berroneau, 2014).

Cet anoure, la plus strictement torrenticole des grenouilles d'Europe, fréquente les cours d'eau permanents et bien oxygénés de montagne. La femelle y pond en hiver un petit nombre d'œufs en les fixant à un substrat rocheux, de sorte que le courant ne les emporte pas (Duguet & Melki, 2003 ; Vieites & Vences, 2009 ; Gosá *et al.*, 2010). Les têtards, noirs pailletés (Vences *et al.*, 1997 ; Miaud & Muratet, 2004), apparaissent au printemps et au début de l'été. Robustes, dotés d'une nageoire musclée, ils sont adaptés à la vie lotique et se maintiennent dans les vasques des torrents. En 3 à 4 mois, le têtard est assez développé pour se métamorphoser. Il faut 3 ans à la grenouille pour être mature sexuellement.



Figure 2. Têtard de *Rana pyrenaica*.
©M. Berroneau

La grenouille des Pyrénées souffre de différentes menaces. En premier lieu, son habitat lui-même (milieux torrenticoles) est soumis à de fortes perturbations : avalanches, glissements de terrain... La qualité de l'eau peut être soumise à des perturbations et devenir inhospitalière. Elle doit aussi composer avec d'autres espèces avec lesquelles elle entre potentiellement en compétition, comme la grenouille rousse (*Rana temporaria*). Par ailleurs, elle est la cible de prédateurs dont les plus connus sont la truite fario (*salmo trutta*) (Gosá *et al.*, 2010) et potentiellement d'une espèce introduite dans certains secteurs pyrénéens, l'écrevisse signal (*Pacifastacus leniusculus*) : en effet, cette dernière est prédatrice des œufs et larves d'amphibiens (Axelsson *et al.*, 1997). Enfin, du fait de sa petite taille et de son mode de reproduction l'empêchant d'opérer d'importantes migrations en un temps réduit, *Rana*

pyrenaica peut être victime de la fragmentation de son habitat, ce qui peut compromettre son brassage génétique et entraîner de la consanguinité.

La grenouille des Pyrénées est évaluée « en danger d'extinction » sur les listes rouges mondiale et européenne de l'UICN, et sur la liste rouge des amphibiens de France métropolitaine et des espèces menacées en Aquitaine (Le Moigne & Jailloux, 2013). Elle est en outre, inscrite à l'Annexe III de la Convention relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe (Convention de Berne, 1979), et à l'article 3 de la liste des amphibiens et des reptiles protégés sur l'ensemble du territoire français (2007). En revanche, elle n'est pas inscrite à la Directive habitats, faune et flore (1992), car sa découverte est postérieure à cette mesure européenne.

Présentation du territoire d'étude

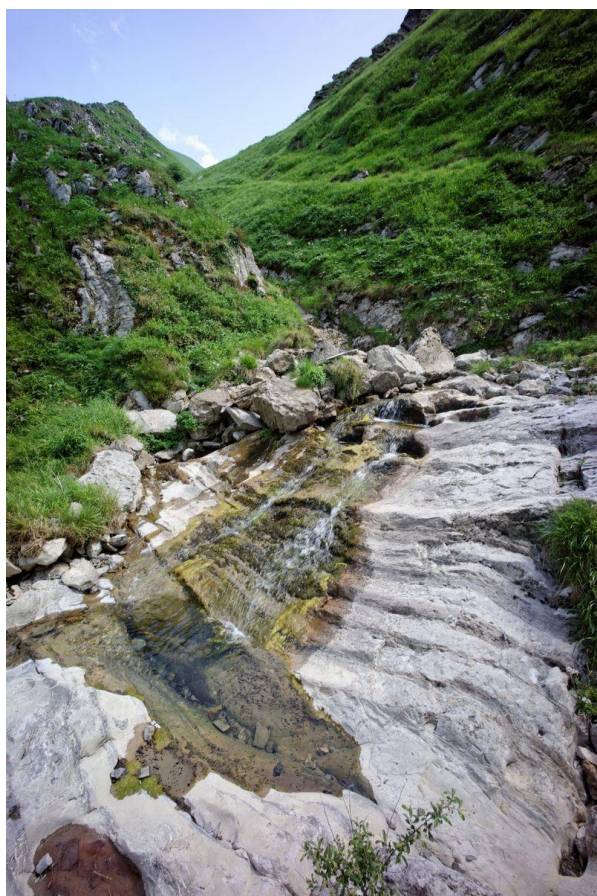


Figure 1. Site A, torrent encaissé sur roche nue formant une vasque. ©M. Berroneau

Les sites inventoriés sont des sections de petits torrents dans lesquels la présence ou la forte proximité de la grenouille des Pyrénées est connue. Ils peuvent être bordés de feuillus (hêtre *Fagus sylvatica*, noisetier *Corylus avellana*...) ou au contraire, bénéficier d'une forte luminosité ; quant au fond du lit, généralement irrégulier, il est tantôt fait de roche nue calcaire formant un relief karstique, tantôt de blocs plus réduits mêlés de graviers et de limon. Le débit comme l'exposition ou le dénivelé de ces rivières est variable, mais l'eau y est toujours d'une belle transparence et majoritairement sans algues. Il n'est pas toujours aisé d'en arpenter les berges qui sont de toutes sortes : rocheuses, forestières à flanc de montagne, tourbeuses..., longeant un torrent parfois encaissé. Souvent, ce dernier forme une suite de cascates et de vasques.

Méthode d'inventaire des têtards

Cet inventaire repose sur une adaptation du protocole PopAmphibiens proposé par la Société Herpétologique de France et le Muséum National d'Histoire Naturelle.

Ce sont les têtards de la grenouille des Pyrénées qui sont inventoriés. En effet, l'adulte étant rare et discret à l'inverse de sa forme larvaire, la recherche des têtards est bien plus fiable et permet un traitement des données plus vraisemblable.

Les sites choisis pour l'inventaire des têtards sont identiques depuis 2012, c'est-à-dire trois sections de torrents au Pays Basque (sites A, B et D) et deux en vallée d'Aspe (sites E et F). Ces choix font suite aux descriptions de Llamas *et al.* (1998) et Duchateau *et al.* (2012). Trois nouveaux sites (C, G et H) ont également été inventoriés, proches des précédents mais représentant également un intérêt pour le suivi de la grenouille des Pyrénées.

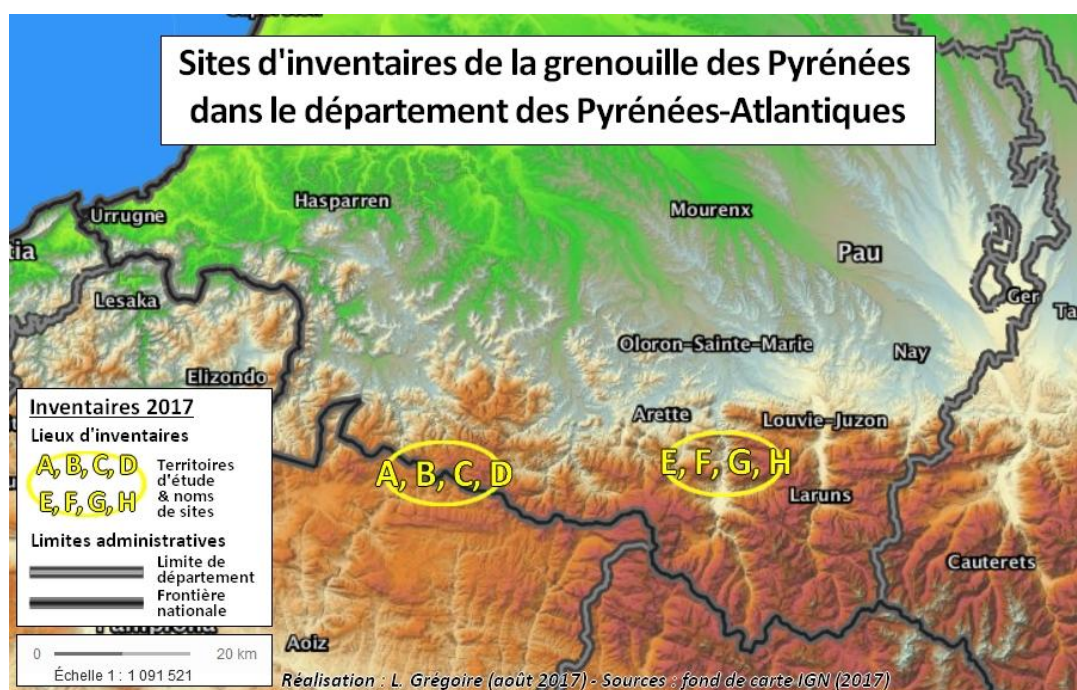


Figure 2. Emplacement des sites d'étude de la grenouille des Pyrénées.

Chaque site est divisé en placettes géo-référencées indépendantes les unes des autres, dont le nombre varie de 4 pour les plus petits, à 28 pour le plus grand. Ces placettes correspondent aux tronçons inventoriés et sont réparties sur les cours d'eau (cf. Figure 3). Chacune mesure 5 mètres de long avec une largeur correspondant à celle de la rivière. Elles sont photographiées pour être aisément identifiées sur le terrain ; les photographies sont régulièrement renouvelées pour pallier aux éventuels changements de morphologie des torrents.

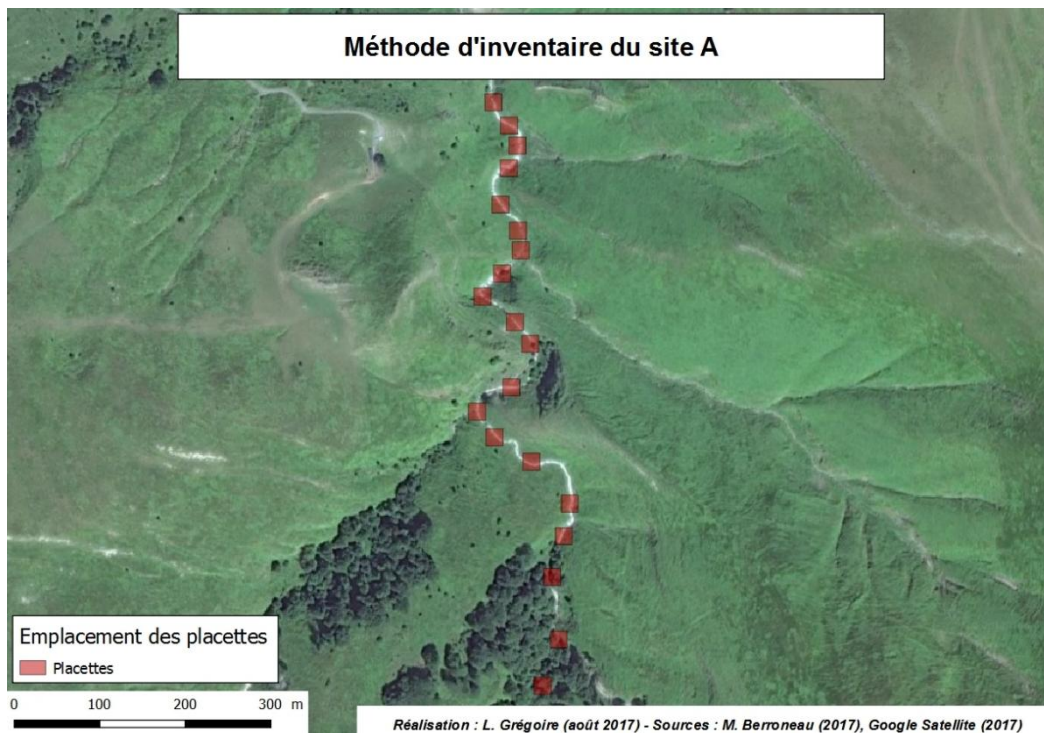


Figure 3. Répartition des placettes le long du site A.

Le comptage se déroule chaque année à partir de la fin du mois d'avril, date où la majorité des œufs ont éclos sur certains secteurs (par exemple, les éclosions sur les sites F, G et H ont tendance à être plus précoces que les autres) jusqu'à la fin du mois de juillet, où les têtards commencent à se métamorphoser. Dans la mesure où la date d'éclosion des têtards n'est pas immuable, des visites préliminaires sont réalisées en Pays Basque comme en vallée d'Aspe.

Le comptage se fait visuellement, sans manipulation du cours d'eau (déplacement de roches...), d'aval en amont. Il se déroule en trois sessions espacées d'au moins deux semaines. Cette contrainte temporelle, ainsi que spatiale pour la disposition des placettes, est établie pour permettre à la fois :

- le respect des conditions de fermeture de population recommandées par Kendall & White (2009) pour le traitement statistique ultérieur des données,
- et la réalité du terrain et ses contraintes météorologiques.

En plus du nombre de têtards, plusieurs données sont relevées sur chaque placette à l'aide d'une fiche qui suit le protocole de caractérisation des populations de grenouille des Pyrénées mis en place par Cistude Nature en 2012 :

- des variables d'échantillonnage
 - l'heure de début et de fin d'inventaire par placette
 - la météo : température de l'eau et de l'air, la pluviométrie, la nébulosité. Température de l'air et pluviométrie des 7 jours précédents sont également notifiées à l'aide du site <http://www.meteofrance.com/climat/meteo-date-passee>
 - la météo de l'hiver précédent, à l'aide du site https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=129&id_rubrique=52
 - la profondeur maximale de la placette, la turbidité, le débit
 - la présence d'adultes ou de pontes de grenouille des Pyrénées
 - la présence d'adultes ou de larves de crapaud commun (*Bufo bufo*), de calotriton des Pyrénées (*Calotriton asper*), de salamandre (*Salamandra salamandra*), d'alyte accoucheur (*Alytes obstetricans*) ou de tout autre amphibien, d'écrevisse signal, de truite fario ou autre poisson, de reptiles comme la couleuvre vipérine.
- des variables de site (ici des placettes)
 - l'altitude, l'exposition, la distance de la source
 - la largeur, le dénivelé, le substrat
 - le nombre de vasques dont le diamètre dépasse 40 cm
 - la présence, même hors placette, d'écrevisse signal
 - la moyenne des températures ainsi que le total de la pluviométrie de l'hiver précédent
 - le type de paysage (boisement feuillu, prairie...) et la présence ou non d'élevage
 - la répartition des strates de végétation le long de la placette

Pour obtenir ces données, le matériel nécessaire se compose de : GPS, montre, thermomètres pour l'air et l'eau, appareil photographique, décamètre, fiches de relevé (cf. Annexe II. et Annexe III.), bottes. Par souci de faisabilité sur le terrain, la nébulosité, le débit et la pluviométrie en temps réel sont notifiés sous forme d'indices.

La méthode employée pour l'inventaire des têtards est maintenue à l'identique depuis 2012, pour une cohérence optimale des résultats. Toutefois, faute de moyens, certains comptages n'ont pas été réalisés en 2015 (sites E et F) ; en outre et comme déjà mentionné, le suivi des sites C, G et H n'a commencé qu'en 2017.

Méthode d'estimation de l'abondance des têtards

En premier lieu, les abondances relevées sur le terrain sont schématisées sous forme de *heatmaps*, ou cartes de chaleur, afin d'obtenir un rendu visuel des sites. Cela permet une première base de comparaison entre les différentes années de suivi, mais aussi entre chaque session de comptage. Le rendu final est une figure représentant des niveaux de couleurs dont l'intensité est proportionnelle à l'abondance des têtards. Ces *heatmaps* sont réalisées sous R, à l'aide du package *ggplot2* (Wickham, 2009).

L'abondance réelle des têtards est estimée sur l'ensemble des placettes de chaque site au moyen de l'approche de Royle (2004) qui repose sur les « modèles de N-mélange ». Cette méthode est adaptée à des données de comptages répétées dans l'espace et dans le temps, comme ce qui a été réalisé pour la grenouille des Pyrénées ; elle tient compte des imperfections de la détection des têtards (Kéry & Schmidt, 2008) et donc se rapproche de la réalité du terrain. Les abondances de chaque site représentent des variables aléatoires indépendantes, distribuées selon une loi de mélange : distribution de Poisson, binomiale négative, ou encore de Poisson avec inflation du zéro (« ZIP » : Zero-Inflated Poisson).

Pour être conforme à l'approche de Royle, les données respectent certaines contraintes, en plus des comptages qui doivent être répétés dans l'espace et dans le temps. Chaque placette abrite une population fermée : ni décès, ni naissance, ni migration. On admet que dans le cas des têtards de *Rana pyrenaica*, les populations restent constantes en dépit de mouvements individuels aléatoires (Dail & Madsen, 2011).

La modélisation des données de comptage a été réalisée à l'aide du logiciel R, via la fonction *PCount* du package *unmarked* (Fiske & Chandler, 2011) qui détermine d'emblée la loi de mélange la plus cohérente (distribution de Poisson, binomiale négative ou ZIP) tout en ajustant le modèle de Royle. Les méthodes de *bootstrap* paramétriques utilisées permettent des tests d'ajustement et fournissent également des intervalles de confiance.

Deux modèles simples ont été construits :

- un modèle pour lequel la probabilité de détection des têtards reste constante au cours du temps $\lambda(.)p(.)$
- et un second tenant compte d'une variation de la probabilité de détection en fonction du temps $\lambda(.)p(t)$.

Le modèle le plus vraisemblable ayant été retenu présente le critère d'information d'Akaike le plus faible, et donc représentant le meilleur compromis entre biais et parcimonie.

Par la suite, l'estimation du nombre réel de têtards sur l'ensemble du site (et donc dans et hors des placettes) est calculée pour obtenir un nombre de têtards par mètre carré.

Méthode de recherche de variables corrélées

Une autre démarche statistique a été entreprise, à partir de la création d'un tableau compilant l'ensemble des données relevées lors de l'inventaire. Les variables ainsi obtenues pouvant apporter de la vraisemblance au modèle à N-mélanges de Royle, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée dans le but de revenir à un espace de dimension réduite tout en déformant le moins possible la réalité. En d'autres termes, l'objectif est de ne conserver que les variables ayant le plus d'influence sur le nombre de têtards de grenouille des Pyrénées, pour par la suite faire l'usage d'un modèle statistique le plus réaliste possible. C'est avec le logiciel R, via *FactomineR* (Husson *et al.*, 2008) du package *rcmdr* (Fox, 2005), que cette ACP a été réalisée.

Enfin, et toujours dans l'optique d'augmenter la vraisemblance du modèle statistique, la corrélation entre, d'une part, les données climatiques de l'hiver précédant chaque comptage et, d'autre part, le nombre total de têtards estimé par année a été étudiée au travers un test de Pearson. Les résultats obtenus ont été illustrés sous R, au moyen du package *corrplot* (Wei & Simko, 2016).

Résultats

Données brutes de comptage

Sur l'année 2017, une totalité de 985 têtards a été comptabilisée sur la première visite, 1142 sur la deuxième et 940 sur la troisième. Les résultats vont de 0 à 183 têtards par placette, avec une moyenne de 11 têtards pour un écart-type de 26. Le recensement présentant le plus de têtards (548) est celui du site A (Pays Basque) lors de la deuxième visite ; celui où aucun têtard n'a été vu est le site C (*idem*), peu important la session de comptage, ainsi que sur le site E (vallée d'Aspe) lors de la première visite.

Tableau 1. Statistique descriptive des données brutes de comptage de têtards sur l'ensemble des sites.

Site	Moyenne	Ecart-type	Min	Q1	Médiane	Q3	Max
A	27,4	44,1	0	0	5	20	183
B	0,5	1,7	0	0	0	1	9
C	0,0	0,0	0	0	0	0	0
D	6,0	6,7	0	0	4	5,25	15
E	0,0	0,2	0	0	0	0	2
F	10,8	20,5	0	0	0	26,25	67
G	22,3	39,2	0	0	5	15,75	112
H	32,6	35,7	0	8,5	14	48,5	146

Le site présentant la meilleure moyenne (32,6) ainsi que la meilleure médiane (14) de têtards par placette est le site H. Sur 3 autres sites, la moyenne dépasse la dizaine (sites A, F et G) avec un écart-type toujours supérieur à 20. C'est sur le site A qu'ont été comptés le plus de têtards sur une placette (183). Sur chaque site, au moins une parcelle n'a montré aucun têtard.

Tableau 2. Exemple de données brutes de comptage de têtards, par visite et par placette, en 2017 sur le site F.

N° de placette (d'aval en amont)	Visite - 2017		
	1 - Avril	2 - Mai	3 - Juin
1	40	26	24
2	0	0	0
3	66	43	39
4	1	0	0
5	55	27	26
6	0	14	0
7	2	0	12
8	67	44	34
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
Total	231	154	135

A chaque visite, ce sont les placettes 3 et 8 qui présentent le plus de têtards. La plupart du temps (sauf sur les placettes 6 et 7), le nombre de têtards décroît au fil des sessions.

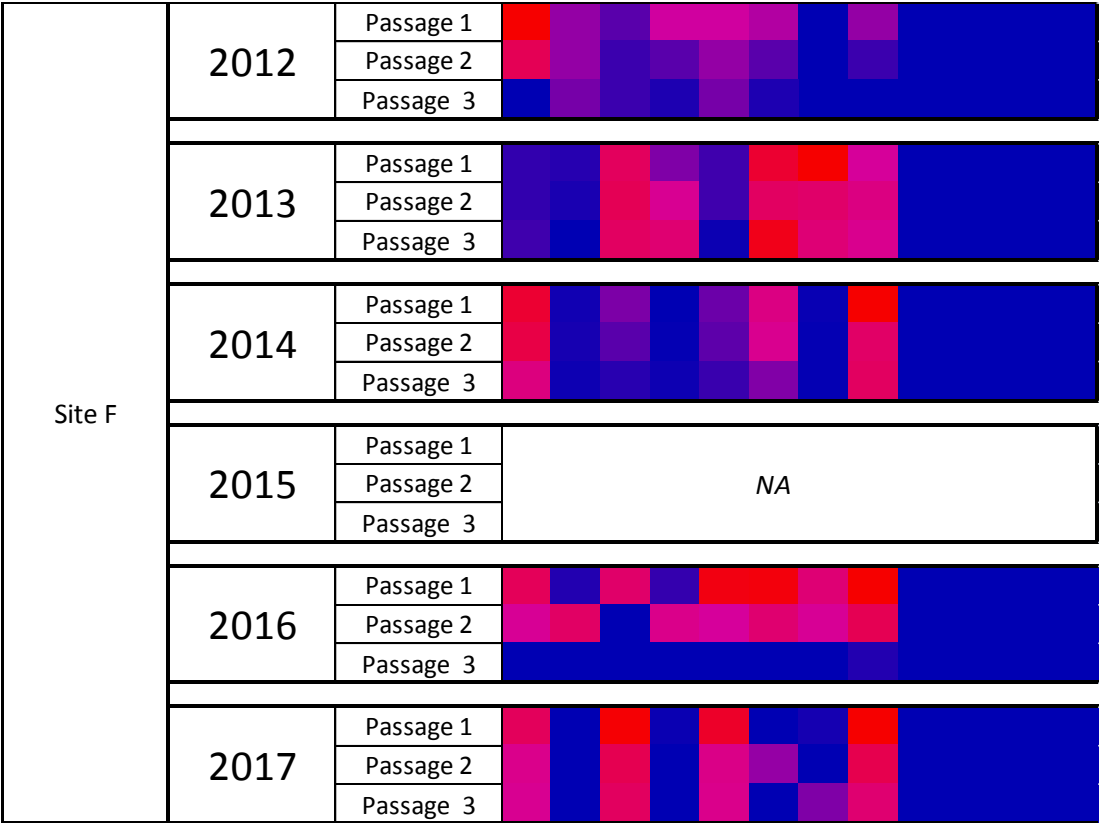


Figure 4. Heatmap (carte de chaleur) du site F.

Sur la carte de chaleur, plus la couleur vire au rouge, plus il y a d'individus inventoriés. L'amont (à droite) indique un comptage nul des têtards de *Rana pyrenaica* en 2017, ce qui signifie qu'ils y sont absents ou qu'ils n'ont pas été détectés. L'absence de données, c'est-à-dire lorsqu'aucun inventaire n'a été réalisé, est notée NA (« *Not Available* »).

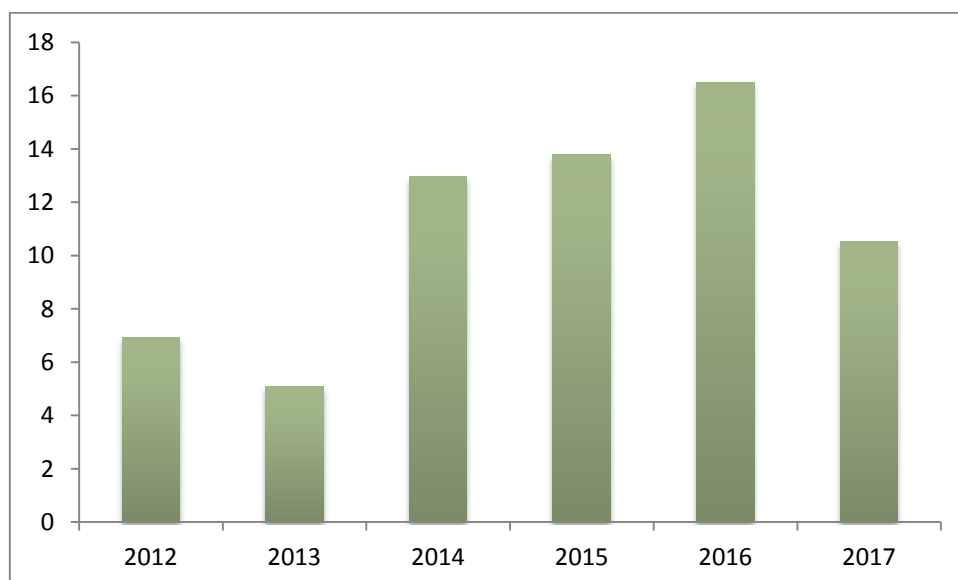


Figure 5. Nombre moyen de têtards comptés par placette inventoriée sur l'ensemble des sites, de 2012 à 2017.

Au contraire de 2013, l'année 2016 semble particulièrement favorable à la reproduction de la grenouille des Pyrénées.

Tableau 3. Nombre moyen avec écart-type de têtards par placette, par site et par année.

Site		2012	2013	2014	2015	2016	2017
A	Moyenne	22,2	4,8	31,0	22,3	54,6	27,4
	Ecart-type	37,8	8,6	49,3	20,1	79,7	44,1
B	Moyenne	3,1	0,8	2,2	2,7	1,1	0,5
	Ecart-type	5,0	1,7	2,8	3,4	2,0	1,7
C	Moyenne	NA	NA	NA	NA	NA	0,0
	Ecart-type	NA	NA	NA	NA	NA	0,0
D	Moyenne	4,7	1,8	6,8	3,8	4,3	6,0
	Ecart-type	4,3	1,2	6,3	6,1	5,9	6,7
E	Moyenne	0,3	0,3	0,2	NA	0,4	0,0
	Ecart-type	0,8	0,5	0,5	NA	0,8	0,2
F	Moyenne	2,9	13,6	26,1	NA	8,9	10,8
	Ecart-type	4,8	16,6	42,0	NA	12,9	20,5
G	Moyenne	NA	NA	NA	NA	NA	22,3
	Ecart-type	NA	NA	NA	NA	NA	39,2
H	Moyenne	NA	NA	NA	NA	NA	32,6
	Ecart-type	NA	NA	NA	NA	NA	35,7

Tout au long des années de suivi, c'est le site A qui présente le nombre record de têtards moyens recensés par placette avec 54,6 en 2016. Le site F se distingue également des autres avec un nombre moyen souvent autour de la dizaine. Le graphique ci-dessous illustre ces moyennes par site et par année, et permet de visualiser leur hétérogénéité, tant au cours du temps que d'un site à l'autre. Une année favorable pour un site (par exemple, 2016 pour le site A) ne l'est pas forcément pour un autre (site F). Les sites G et H, dont le suivi n'a commencé qu'en 2017, présentent déjà des moyennes par placette élevées par rapport aux autres.

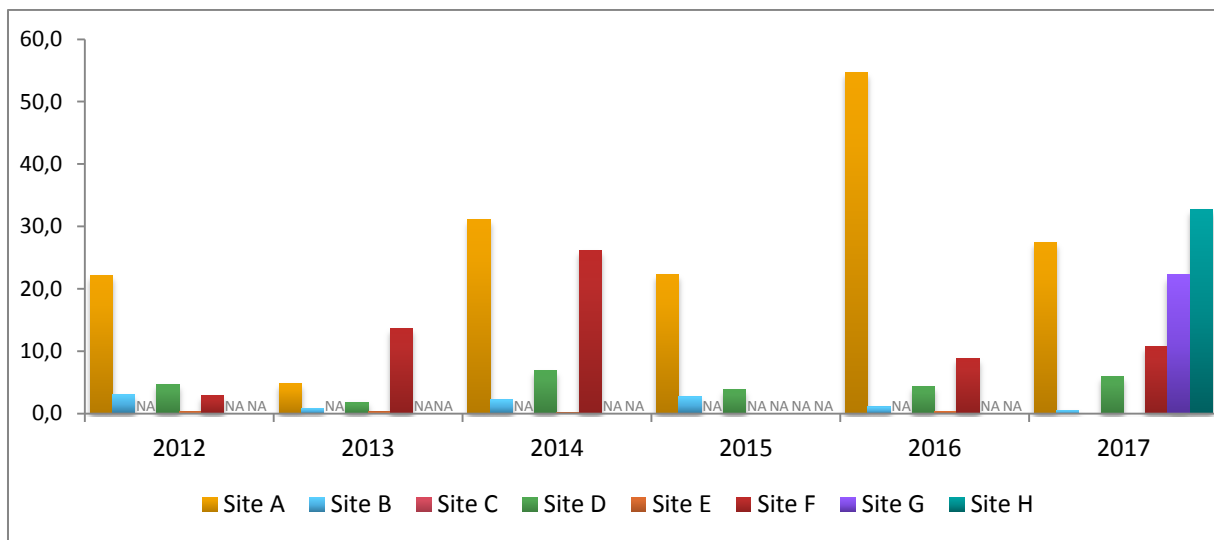


Figure 6. Evolution du nombre moyen de têtards par placette obtenu à partir des données brutes, de 2012 à 2017.

Pour rappel, le comptage des sites C, G et H n'a commencé qu'en 2017, et les sites E et F n'ont pas été inventoriés en 2015.

Estimation statistique de l'abondance des têtards

Quatre sites n'ont pu être retenus pour le calcul statistique :

- les sites D et G présentent un nombre de placettes insuffisant ($n=4$) pour permettre l'obtention d'un modèle vraisemblable
- les sites C et E présentent quant à eux, un nombre de têtards inventoriés trop faible (0 pour l'un, 2 pour l'autre) pour un calcul statistique correct.

Finalement, seuls les sites A, B, F et H ont fait l'objet d'une modélisation à N-mélanges de Royle.

Tableau 4. Résultats des deux modèles à N-mélanges de Royle (l'un tenant compte de la variable temporelle, l'autre non), par an et par site : effectif estimé des têtards de *Rana pyrenaica* avec intervalle de confiance à 95%, probabilités de détection du têtard (par visite dans le cas du modèle à détection variable), critère d'information d'Akaike.

Site	Année	Probabilité de détection variable en fonction du temps $\lambda(.)p(t)$						Détection constante $\lambda(.)p(.)$			
		Effectif estimé	IC	p(V1)	p(V2)	p(V3)	AIC	Effectif estimé	IC	p(.)	AIC
Site A	2012	564	[532 - 612]	0,73	0,87	0,64	1498,3	584	[542 - 641]	0,72	1574,7
	2013	286	[207 - 377]	0,18	0,34	0,43	609,7	328	[236 - 438]	0,28	652,0
	2014	1832	[1646 - 2029]	0,37	0,11	0,49	2881,9	2019	[1806 - 2241]	0,29	3542,3
	2015	928	[813 - 1058]	0,22	0,50	0,65	902,8	1568	[1348 - 1806]	0,27	1216,4
	2016	2689	[2459 - 2935]	0,50	0,44	0,27	4365,9	2935	[2676 - 3214]	0,37	4672,8
	2017	1130	[983 - 1294]	0,31	0,48	0,37	2445,8	1175	[1017 - 1347]	0,37	2513,6
Site B	2012	59	[49 - 78]	0,72	0,51	0,49	187,4	61	[50-84]	0,55	190,7
	2013	26	[19 - 45]	0,00	0,58	0,50	80,1	35	[19-64]	0,27	105,1
	2014	87	[54 - 126]	0,29	0,36	0,20	171,9	89	[56-127]	0,27	173,6
	2015	404	[293 - 526]	0,07	0,12	0,03	170,2	682	[527 - 844]	0,04	188,8
	2016	57	[28 - 96]	0,33	0,30	0,00	96,2	149	[86 - 222]	0,08	124,4
	2017	22	[15 - 39]	0,23	0,55	0,18	84,1	27	[15 - 50]	0,26	87,6
Site F	2012	62	[57 - 74]	0,92	0,56	0,19	137,0	86	[65-112]	0,40	192,7
	2013	363	[338 -392]	0,78	0,74	0,64	567,6	366	[342-395]	0,71	580,3
	2014	406	[368 - 450]	0,70	0,66	0,58	547,6	483	[449-521]	0,65	983,0
	2015	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	2016	414	[328 - 506]	0,46	0,31	0,00	446,7	NA	NA	0,06	722,5
	2017	281	[259 - 315]	0,82	0,55	0,48	706,1	304	[269 - 350]	0,57	779,5
Site H	2012	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	2013	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	2014	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	2015	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	2016	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	2017	647	[576 - 724]	0,53	0,43	0,41	807,0	670	[596 - 752]	0,44	824,2

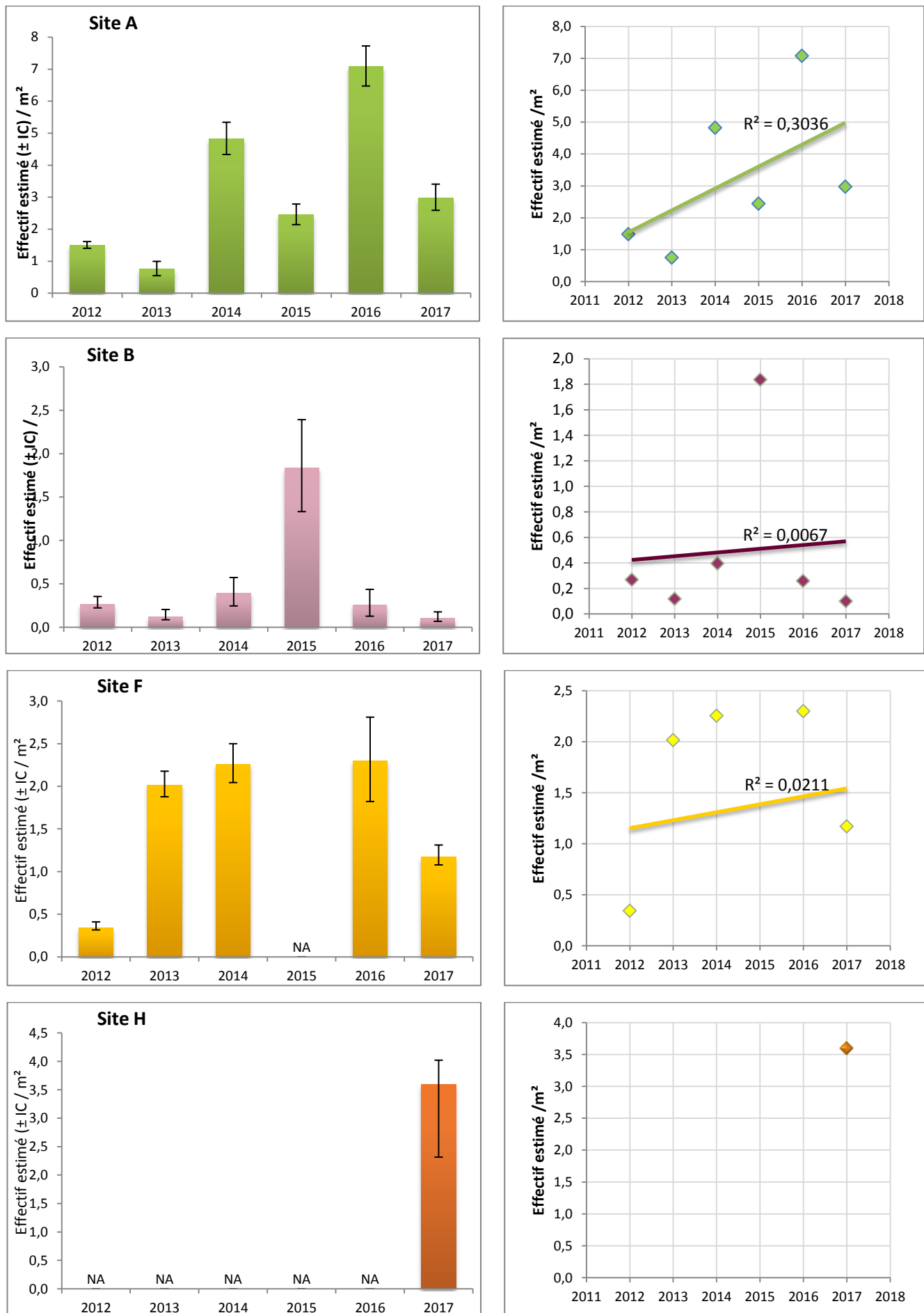


Figure 7. A gauche : effectifs estimés de têtards de *Rana pyrenaica* par mètre carré des sites modélisés par modèle variable $\lambda(\cdot)p(t)$, avec intervalle de confiance à 95%. A droite : nuage de points des effectifs avec droite de régression.

Les droites de régression indiquent une tendance à l'augmentation des effectifs des têtards de *Rana pyrenaica* de 2012 à 2017 sur les sites A, B et F. Cette tendance, plus marquée sur le site A que sur le site F, est discrète sur le site B. Sur ce dernier, elle serait d'ailleurs décroissante si le comptage de 2015 n'avait pas été effectué. Aucune droite de régression n'a été faite sur le site H, puisque son inventaire a commencé en 2017. Les différents R^2 présents ci-dessus révèlent une faible représentativité des droites de régression.

Recherche de variables corrélées

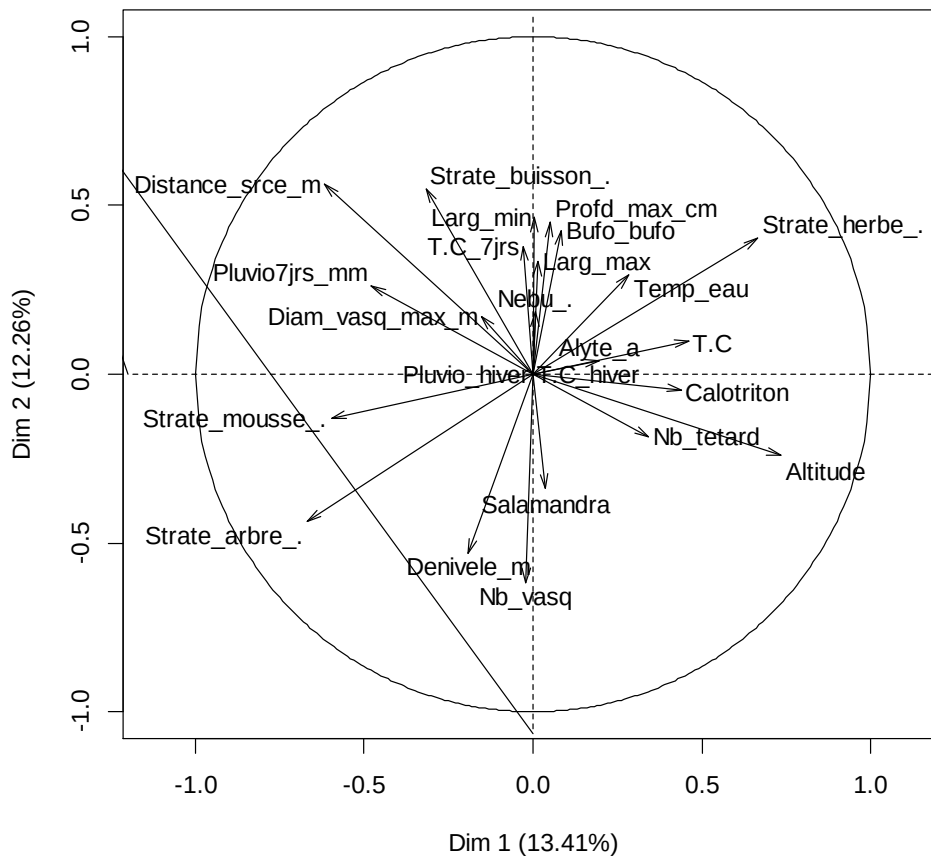


Figure 8. Cercle des corrélations obtenu à partir de l'analyse en composantes principales.

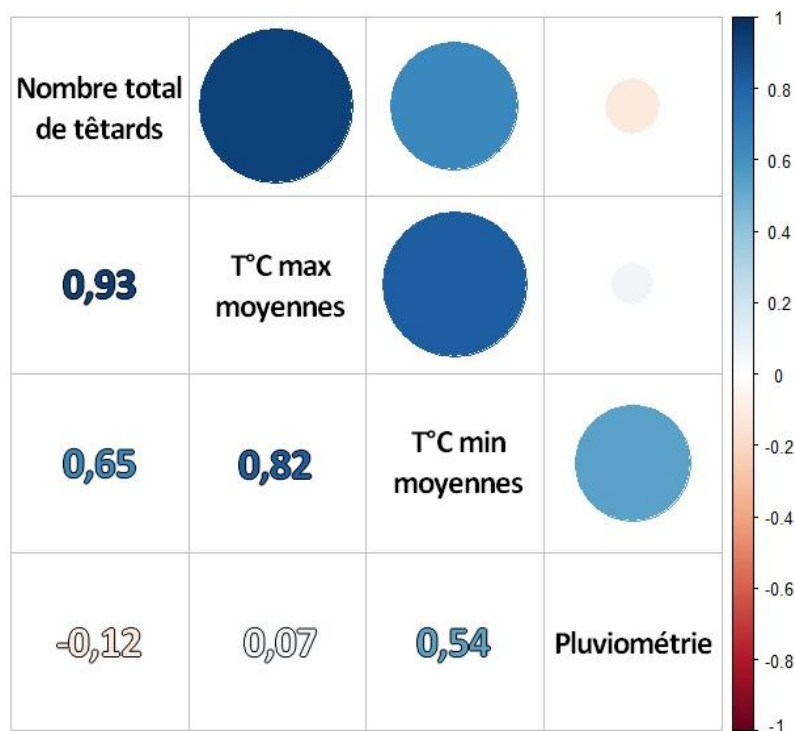


Figure 9. *Corplot* illustrant la corrélation (test de Pearson) entre 4 variables: l'estimation du nombre total de têtards par an, et les données climatiques de l'hiver précédant le comptage: les températures moyennes maximales et minimales, ainsi que la pluviométrie.

Le test de Pearson permet de révéler une très forte corrélation positive entre les températures moyennes maximales et le nombre de têtards. La corrélation est également forte entre ce dernier et les températures moyennes minimales. En revanche, la corrélation entre le nombre de têtards et la pluviométrie est négative et trop faible pour être significative.

Discussion

La méthode d'inventaire des têtards de *Rana pyrenaica* et de construction d'un modèle statistique a permis d'obtenir des données comparables d'une année sur l'autre, et donc de réaliser un suivi sur un intervalle de temps choisi. De cette manière, un aperçu de l'évolution des populations de grenouille des Pyrénées sur les secteurs sélectionnés est possible, à travers le nombre de têtards estimé ainsi que les probabilités de détection de l'espèce.

Le modèle à N-mélanges de Royle présentant le critère d'information d'Akaike le plus faible, et donc le plus vraisemblable, est systématiquement celui prenant en compte la variabilité de la détectabilité des têtards en fonction du temps $\lambda(.)p(t)$ (cf. Tableau 4). C'est donc ce modèle qu'on aura tendance à retenir. Toutefois sur le site B, et pour l'année 2014 seulement, le ΔAIC étant inférieur à 2 ($\Delta AIC = 1,7$), on ne peut rejeter le second modèle constant $\lambda(.)p(.)$.

Bien que la méthode de traitement statistique prenne en compte les conditions de fermeture inhérentes au modèle à N-mélanges de Royle en faisant le compromis entre proximité temporelle des visites et faisabilité, le fait est que les placettes peuvent voir leur nombre de têtards inventoriés diminuer - ou brutalement augmenter - d'une visite à l'autre, par exemple des suites d'une violente crue, de la métamorphose des premiers-nés ou encore de prédatons. On constate également une décroissance du nombre de têtards comptabilisés au fil des sessions (cf. Tableau 2). Malgré tous les efforts, le modèle ne peut donc être parfaitement appliqué et présente de ce fait ses limites, comme par exemple une surestimation d'effectif (Chandler *et al.*, 2011) ; il permet toutefois d'obtenir une estimation d'abondance et une probabilité de détection relativement cohérente, dans la mesure où ces événements sont rares. En outre, la valeur souvent élevée de la probabilité de détection du têtard permet d'appréhender une éventuelle surestimation par la comparaison entre les comptages bruts et les effectifs estimés. La sédentarité des têtards, et leur développement en une seule année permet de tout de même se rapprocher des conditions de fermeture ainsi que de l'indépendance des placettes. Le nombre de têtards comptés par placettes, illustré par les *heatmaps* (cf. Figure 4), indique en effet majoritairement une faible migration des individus comptabilisés d'une visite à l'autre. Cette notion se traduit également par une forte structuration et une stabilité de la distribution au cours d'une même année.

Ce traitement présente une autre limite, dans la mesure où il ne peut se faire sur les sites présentant un nombre de placettes trop faible ou ayant trop de dénombrements nuls, ce qui entraîne la mise à l'écart de secteurs pourtant potentiellement stratégiques pour l'étude de l'espèce. Or, les sites présentant peu ou pas d'effectifs de têtards ne peuvent être écartés : le site C, sur lequel aucun têtard n'a été vu en 2017, possède des affluents occupés par ces derniers ; il peut donc potentiellement être colonisé dans les années à venir.

Finalement, aucun de ces sites à faibles résultats n'est forcément boudé de manière définitive par la grenouille des Pyrénées et doit donc être conservé dans l'étude. Au contraire, la potentielle recolonisation de ces sites pourra peut-être permettre d'en savoir plus sur les choix de lieux de ponte de l'espèce.

En outre, d'autres ajouts de sites dans un temps futur ne sont pas improbables, dans la mesure où l'état des connaissances sur la grenouille des Pyrénées ainsi que la réalité technique et financière ne sont pas choses figées. Le nombre de sites pouvant varier au cours du temps comme ce fut le cas en 2017, un parfait comparatif entre les différentes années de suivi s'avère compromis.

Les données brutes de comptages de têtards présentent une forte hétérogénéité, que ce soit à l'échelle des placettes ou à celle des sites. Cette disparité ne sera pas contredite par l'abondance estimée au moyen du modèle à N-mélanges (cf. Figure 7). Les causes supposées les plus logiques sont la qualité d'accueil du site du point de vue de la grenouille des Pyrénées, tant au niveau des ressources disponibles, qu'au comportement de l'eau ou encore à la présence de prédateurs. Ces différences annuelles d'effectifs s'observent de manière générale chez les amphibiens (Duguet & Melki, 2003). Cette variation de résultats, couplée au nombre réduit d'années d'inventaires, ne permet pas pour le moment de tirer de conclusions quant à l'influence du changement climatique sur la grenouille des Pyrénées. De nombreuses autres années d'étude seront sans doute nécessaires pour voir se démarquer une tendance générale permettant de faire un lien, d'une façon ou d'une autre, avec le changement climatique. Par ailleurs, ce dernier n'étant finalement qu'un type de pression, il n'exerce pas forcément une influence directe sur l'espèce. Les effets liés spécifiquement au changement climatique sont toujours difficiles à mettre en évidence à cause de la difficulté de mesure, du manque de connaissances sur les interactions, des résultats d'observations effectués localement et sur des temps courts... L'ensemble des pressions se combinent dans le temps (changement du climat, destruction, fragmentation des habitats,...) et elles sont plus ou moins couplées entre elles.

Ceci est corroboré par l'ACP (cf. Figure 8) qui, pour l'année 2017, n'a pas donné de résultats suffisamment significatifs pour permettre d'intégrer des covariables (de site comme d'échantillonnage) au modèle à N-mélanges. Seul le modèle $\lambda(.)p(t)$, en plus du modèle simple constant, a pu être construit jusqu'à présent pour estimer l'abondance des têtards de *Rana pyrenaica*. Le test de Spearman (cf. Figure 9) a toutefois pu révéler une corrélation positive forte entre l'estimation du nombre total de têtards et les températures moyennes de l'hiver précédent (que ce soient les moyennes maximales ou minimales). Cela signifie que lorsque la température de l'hiver précédent augmente, le nombre estimé de têtards augmente aussi. Ces variables de température pourront, ultérieurement, être ajoutées aux modèles d'estimation du nombre de têtards pour davantage de vraisemblance. Toutefois, ce test n'établit pas de lien de causalité entre ces différentes variables.

En outre, on pourrait déduire de ces résultats que le changement climatique – sans ses conséquences sur son habitat – a une incidence directe positive sur les densités de populations des têtards de la grenouille des Pyrénées ; mais il faut prendre garde à la niche thermique de cette dernière qui est très probablement bornée. Une étude est actuellement menée à ce sujet par l'Université de Pau et des Pays de l'Adour.

Enfin, toutes les données – qu'elles soient sous forme de tableau, d'écrit ou de figure – impliquant des moyennes (cf. Tableau 1, Tableau 3, Figure 5 et Figure 6) doivent toujours être considérées avec leur écart-type pour pouvoir en tirer des conclusions.

Conclusion

La découverte de l'espèce étant récente (1993), les connaissances de l'espèce demeurent encore imparfaites. Actuellement, de nombreux facteurs sont susceptibles d'influencer ses effectifs. Certains sont liés entre eux ; d'autres seront probablement exacerbés par le changement climatique. Tous, actuels comme à venir, doivent être pris en compte dans les prédictions d'évolution des populations de *Rana pyrenaica*. Parmi eux, se trouvent :

- le « déclin mondial des amphibiens » (Gosá *et al.*, 2010), phénomène provoqué par une multitude de facteurs climatiques, anthropiques..., qui ne touchent pas seulement la grenouille des Pyrénées
- une plus forte exposition des embryons aux rayons UV-B causée par la diminution de la hauteur d'eau, entraînant la mortalité des œufs (*ibidem*)
- la propagation du champignon *Batrachochytridium dendrobatidis* (*ibidem*)
- la fragmentation de son habitat
- le bouleversement de son aire de répartition suite au changement climatique : une possible réduction de 100% à l'horizon 2100 (Araújo *et al.*, 2011)
- les catastrophes naturelles entraînant une perte soudaine d'habitat : avalanches, glissements de terrain, disparition de ruisseaux
- l'augmentation des sécheresses estivales : assèchement des ruisseaux avant la fin du développement larvaire (Blaustein *et al.*, 2010)
- une hypothèse de glissement de la niche de *Rana pyrenaica* vers de plus hautes altitudes en raison du changement climatique, mais sans forcément y trouver d'habitat (Gosá *et al.*, 2010)
- les activités humaines :
 - l'alevinage (notamment en truite fario) des cours d'eau de la vallée d'Aspe
 - les exploitations forestières qui, en plus de favoriser l'érosion du sol via des coupes de rajeunissement, dégradent les milieux forestiers : fréquentation notamment par les véhicules, aménagements type fossés de drainage...
 - les activités de loisir, les secteurs à grenouille des Pyrénées étant appréciés par le tourisme, avec notamment le canyoning qui vient impacter directement les cours d'eau.

En outre, les effectifs de cet anouère en France sont si faibles, que ce qui ne serait qu'une simple diminution de population chez une autre espèce, pourrait entraîner sa disparition brutale sur l'un des sites d'étude. Ainsi, elle est particulièrement sensible à la moindre fluctuation de ses effectifs, quelle qu'en soit la cause, climatique ou non.

De par sa sensibilité, la grenouille des Pyrénées représente une « Sentinelle » stratégique quant au changement climatique ; l'étude de l'impact de ce dernier sur cet amphibien ne peut se faire que dans une perspective à moyen, voire long terme. Il est encore trop tôt pour faire le lien entre ces deux entités.

Références bibliographiques

- Aragón P., Rodríguez M.A., Olalla-Tárraga M.A. & Lobo J.M., 2010. Predicted impact of climate change on threatened terrestrial vertebrates in central Spain highlights differences between endotherms and ectotherms. *Anim. Conserv.*, 13, 363-373.
- Araújo M.B., Alagador D., Cabeza M., Nogués Bravo D. & Thuiller W., 2011. Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters* 14: 484-492.
- Axelsson E., Nyström P., Sidenmark J. & Brönmark C., 1997. Crayfish predation on amphibian eggs and larvae. *Amphibia-Reptilia*, 18: 217-228.
- Barrioz M. & Miaud C. (coord.), 2016. Protocoles de suivi des populations d'amphibiens de France, POPAmphibien. Societe Herpetologique de France.
- Berroneau M., 2014. Atlas des Amphibiens et Reptiles d'Aquitaine. Édition C. Nature, Le Haillan, 256p.
- Berroneau M., D'Amico F., Fournier A., Devaux B. & Chazal R., 2015. Trois années de suivi des populations françaises de *Rana pyrenaica* Serra-Cobo, 1993 (Amphibia : Ranidae) : premières données d'abondance des têtards. *Bull. Société Herpétologique Fr.*
- Berroneau M., 2015. Guide des Amphibiens et Reptiles d'Aquitaine. Association Cistude Nature, Le Haillan, C. Nature., 180 p.
- Bradshaw W.E. & Holzapfel C.M., 2006. Climate change. Evolutionary response to rapid climate change. *Science*, 312, 1477-1478.
- Cameron G.N. & Scheel D., 2001. Getting Warmer: Effect of Global Climate Change on Distribution of Rodents in Texas. *J. Mammal.*, 82, 652-680.
- Ceballos G., Ehrlich P.R. & Dirzo R., 2017. Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. [En ligne] URL : www.pnas.org/content/114/30/E6089.abstract (consulté le 30 août 2017).
- Chandler R.B., Royle J.A. & King D.I., 2011. Inference about density and temporary emigration in unmarked populations. *Ecology* 92:1429-1435.
- Dail D. & Madsen L., 2011. Models for estimating abundance from repeated counts of an open metapopulation. *Biometrics*, 67: 577-587.
- Daufresne M., Lengfellner K. & Sommer U., 2009. Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 106, 12788-12793.
- Davis M.B. & Shaw R.G., 2001. Range Shifts and Adaptive Responses to Quaternary Climate Change. *Science*, 292, 673-679.

- Duchateau S., Berroneau M., Cantegrel L., Goyeneche L., de Reinach Hirtzbach J. & Tillo S., 2012. Découverte de *Rana pyrenaica* Serra-Cobo, 1993 (Anura, Ranidae) sur le versant nord des Pyrénées. *Bulletin de la Société Herpétologique de France*, 142-143 : 51-63.
- Duguet R. & Melki F., 2003, Les amphibiens de France, Belgique et Luxembourg. Biotope, coll. ACEMAV, 480p.
- Engler R. *et al*, 2011. 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. *Glob. Change Biol.*, 17, 2330-2341.
- Feehan J., Harley M. & Van Minnen J., 2009. Climate change in Europe. 1. Impact on terrestrial ecosystems and biodiversity. *Agron. Sustain. Dev. EDP Sci.*, 29, 409-421.
- Fiske I. & Chandler R., 2011. unmarked: An R package for fitting hierarchical models of wildlife occurrence and abundance. *Journal of Statistical Software*, 43(10): 1-23. [En ligne] URL : www.jstatsoft.org/v43/i10 (consulté le 13 août 2017).
- Fox J., 2005. The R Commander: A Basic Statistics Graphical User Interface to R. *Journal of Statistical Software*, 14(9) : 1–42.
- GIEC, 2013. Changements climatiques 2013 les éléments scientifiques : extraits de la contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Geneva, Switzerland, 204 p.
- Gosá Oteiza A., Rubio Pilarte X. & Iraola Apaolaza A., 2010. *Rana pyrenaica*, une relique des Pyrénées. Sociedad de Ciencias Aranzadi, Donostia - San-Sebastian. 51 p.
- Huey R.B. *et al*, 2009. Why tropical forest lizards are vulnerable to climate warming. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, 276, 1939-1948.
- Husson F., Lê S. & Josse J., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*. 25(1). pp. 1-18.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Working Group II Contribution to the IPCC 5th Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- Kendall W.L. & White G.C., 2009. A cautionary note on substituting spatial subunits for repeated temporal sampling in studies of site occupancy. *Journal of Applied Ecology*, 46: 1182-1188
- Kéry M. & Schmidt B.R., 2008. Imperfect detection and its consequences for monitoring for conservation. *Community Ecology*, 9: 207-216.
- Le Moigne C. & Jailloux A., 2013. Liste rouge régionale des amphibiens et reptiles d'Aquitaine. Observatoire Aquitain de la Faune Sauvage. Talence, 48 p.
- Le Treut, 2013. Les impacts du réchauffement climatique en Aquitaine : un état des lieux scientifique. Presses universitaires de Bordeaux, 365 p.

- Lescure J. & Massary de J.-C. (coords), 2012., Atlas des Amphibiens et Reptiles de France. Biotope, Mèze. Museum d'Histoire Naturelle, Paris (collection Inventaire & biodiversité), 272 p.
- Llamas A., Martínez-Gil O. & Arribas A., 1998. *Rana pyrenaica*, a new species for the French herpetofauna. *Bol. Asoc. Herpetol. Esp.*, 9: 12-13.
- Llamas Saíz A. & Martínez Gil O.R., 2005. Distribución de rana pirenaica (*Rana pyrenaica*) en Navarra, nuevos límites occidentales y cota mínima para la especie. *Bol. Asoc. Herpetol. Esp.*, 15(2): 66-68.
- Lobera M.A., « Grenouille des Pyrénées, endémique et en sursis », *Pyrénées magazine*, N° 172 juillet-août 2017, p. 19 à 23.
- Mallard F., 2016. Programme les sentinelles du climat. Tome I : Développement d'indicateurs des effets du changement climatique sur la biodiversité en Nouvelle Aquitaine. Cistude Nature, 86 p.
- Mallard F. (coord.), 2016. Programme les sentinelles du climat – Tome II : Protocoles d'échantillonnage des indicateurs des effets du changement climatique sur la biodiversité en Nouvelle Aquitaine, 453 p.
- Manenti R. & Bianchi B., 2011. A new western limit for *Rana pyrenaica* Serra-Cobo, 1993 in the Irati region (Pyrenees). *Herpetology Notes*, 4: 403-404.
- Manenti R., 2014. Les nouvelles découvertes de *Rana pyrenaica* Serra-Cobo, 1993 (Anura : Ranidae) et la limite occidentale de l'espèce. *Bull. Soc. Herp. France*, 149: 3-7.
- Miaud C. & Muratet J., 2004. Identifier les oeufs et les larves des amphibiens de France. Editions INRA. Paris. 200 p.
- Moreno-Rueda G., Pleguezuelos J.M., Pizarro M. & Montori A., 2011. Northward shifts of the distributions of Spanish reptiles in association with climate change. *Conserv. Biol. J. Soc. Conserv. Biol.*, 26, 278-283.
- Pleguezuelos J.M., Márquez R. & Lizana M., 2002. Atlas y libro rojo de los Anfíbios y los Reptiles de España. Dirección general de Conservación de la Naturaleza - Asociación Herpetologica Española, Madrid. 587 p.
- Prud'Homme O., 2005. Observations sur la Grenouille des Pyrénées (*Rana pyrenaica*) en forêt d'Iraty (Pyrénées Atlantiques). *Bulletin de la Société Herpétologique de France*, 113-114 : 72-76.
- Root T.L. *et al.*, 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421, 57-60.
- Royle J.A., 2004. N-mixture models for estimating population size from spatially replicated counts. *Biometrics*, 60: 108-115.

- Segev O., Hill N., Templeton A.R. & Blaustein L., 2010. Population size, structure and phenology of an endangered salamander, *Salamandra infraimmaculata*, at temporary and permanent breeding sites. *Journal for Nature Conservation* 18:189-195
- Serra-Cobo J., 1993. Descripción de una nueva especie europea de rana parda (Amphibia, Anura, Ranidae). *Alytes*, 11: 1-15.
- Thomas C.D. *et al*, 2004. Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145-148.
- Vences M., Kupfer A., Llorente G.A., Montori A. & Carretero M.A., 1997. Description of the larval stages of the Pyrenean frog, *Rana pyrenaica* Serra-Cobo, 1993 (Amphibia: Ranidae). *Boll. Mus. reg. Sci. nat. Torino*, 15(1): 1-23.
- Vieites D.R. & Vences M., 2009. Rana pirenaica – *Rana pyrenaica*. En: Enciclopedia Virtual de los Vertebrados Españoles. Salvador, A., Martínez-Solano, I. (Eds.). Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid.
- Wei T. & Simko V., 2016. Visualization of a correlation matrix. [En ligne] URL : <https://CRAN.R-project.org/package=corrplot/> (consulté le 20 août 2017).
- Wickham H., 2009. ggplot2: elegant graphics for data analysis. Springer, Ser. « Use R » VII, New York. 213 p.

Annexes

Annexe I. Répartition du temps de travail durant le stage

	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
Recherches bibliographiques						
Appropriation des thèmes et outils - adaptation, conception						
Visites préliminaires des différents sites - prospections						
Inventaires grenouille des Pyrénées						
Inventaires lézard catalan						
Inventaires marmotte des Alpes						
Inventaires lézard de Bonnal						
Traitement des données						
Rédaction du présent rapport						

A noter que toutes les actions concernent l'ensemble des espèces étudiées, sauf lorsqu'une espèce est indiquée précisément.

Annexe II. Fiche - description de la placette

Tronçon n°		12	Observateur :			Année :	
		N-O			N-E		
		S-O			S-E		
Aide localisation :							
Altitude (m)							
Largeur max. (m)							
Largeur min. (m)							
Dénivelé (m)							
Exposition							
Nombre de vasques							
Diamètre de la plus grande vasque							
Substrat / Granulométrie							
Distance source							
Présence connue de P. leniusculus dans le ruisseau							
Hiver précédent			Température				
			Pluviométrie				
Paysage	Boisement feuillu						
	Boisement résineux						
	Boisement mixte						
	Bocage						
	Prairie						
	Sol nu						
	Autres						
Elevage							
Strates de végétation (%)	Strate muscinale						
	Strate herbacée						
	Strate buissonnante						
	Strate supérieure						

Annexe III. Fiche - données de présence et d'échantillonnage

Tronçon n° :				
Passage		1	2	3
Observateur				
Date				
Heure	Début			
	Fin			
Météo et état du cours d'eau	T°			
	T° 7 jours			
	T° eau			
	Nébulosité			
	Pluvio.			
	Pluvio. 7 jours			
	Profondeur max.			
	Turbidité max.			
	Débit			
Contact G. des Pyrénées	Nbre têtards			
	Nbre groupes			
	Nbre adultes			
	Nbre pontes			
Contact Faune	Nbre adultes Calotriton asper			
	Nbre larves Calotriton asper			
	Nbre larves Salamandra salamandra			
	Nbre têtards A. accoucheur			
	Nbre têtards C. commun			
	Autres amphibiens			
	Nbre P. leniusculus			
	P/A Salmo trutta			
	P/A N. maura			
Commentaire				

Résumé

La rapidité du changement climatique actuel est préoccupante vis-à-vis de la biodiversité. Pour étudier la réponse de cette dernière face à ce changement, l'association Cistude Nature a lancé le programme Sentinelles du Climat (2016-2021). Elle a sélectionné des espèces particulièrement sensibles au changement climatique ; parmi elles, la grenouille des Pyrénées (*Rana pyrenaica* Sera-Cobo, 1993). Elle faisait déjà l'objet d'un suivi par l'association, dans le cadre d'un programme de conservation de l'espèce (2012-2014). Les têtards de cet anouire inféodé aux torrents de l'Ouest des Pyrénées sont inventoriés chaque année sur des sites sélectionnés selon une méthode proche du protocole *PopAmphibiens*, afin d'étudier l'évolution de leurs effectifs au cours du temps. Au cours de cette étude, leur abondance est estimée au moyen de deux modèles simples à N-mélanges de Royle (l'un prenant en compte la variation de la probabilité de détection de l'espèce au cours du temps $\lambda(.)p(t)$; l'autre, $\lambda(.)p(.)$, non) et plusieurs variables de site et d'échantillonnage sont relevées dans un but prochain de les intégrer au modèle. Le modèle le plus vraisemblable obtenu est celui prenant en compte les variations de détectabilité en fonction du temps. L'analyse en composantes principales effectuée pour étudier les relations des différentes variables entre elles n'a pas donné de résultats exploitables, mais un test de corrélation de Pearson révèle que les températures de l'hiver précédant la reproduction sont positivement corrélées à l'abondance des têtards. Ces covariables pourront donc être intégrées au modèle ultérieurement pour le rendre plus réaliste. Cette étude ne permet pas pour le moment de tirer des conclusions à propos de l'impact du changement climatique sur la grenouille des Pyrénées, d'autant plus que l'espèce est influencée par un ensemble de facteurs interdépendants, mais chaque année apporte de nouvelles réponses.

Mots-clefs : Grenouille des Pyrénées, *Rana pyrenaica*, têtard, montagne, Sentinelles du Climat, abondance, probabilité de détection, modèle à N-mélanges, test de corrélation de Pearson

Abstract

The pace of undergoing climate change is worrying about biodiversity. In order to study the response of living beings to global warming, Cistude Nature association launched the “*Sentinelles du Climat*” program (2016-2021). Species, which are the sentinels, are chosen for their sensitivity to climate change, including the Pyrenean frog (*Rana pyrenaica* Serrano-Cobo, 1993). It has already been the subject of a study by the association, in a program of conservation of this specie (2012-2014). The tadpoles of this anuran, which only lives in the West of Pyrenean mountain streams, are counted each year according to the “PopAmphibiens” protocol, to study the evolution of the number throughout the time. During this study, its abundance is estimated by using two simple models of N-mixture of Royle (one taking account the variability of the specie’s detection throughout the time $\lambda(.)p(t)$; the other, $\lambda(.)p(.)$, doesn’t). Several sites and sampling covariates are recorded in order to integrate them later to the model. The most likely model is finally the one that has the variability of detectability depending of time $\lambda(.)p(t)$. The principal component analysis made to study the relations between the variables didn’t give any exploitable result, but a test of Pearson’ correlation reveals that the winter temperatures before the reproduction are positively related to tadpoles’ abundance. Later, these covariates will be incorporated into the model, in order to increase its likelihood. This study gives no answers about the influence of global warming on the Pyrenean frog yet, especially since this specie is affected by a combination of several and related factors, but each year, new pieces of the puzzle are found.

Avec le soutien de :

