



ECOLE SUPERIEURE D'AGRICULTURES
55, rue Rabelais – B.P. 748
49007 ANGERS CEDEX 01
TEL. : 02.41.23.55.55



OFFICE NATIONALE DE LA
CHASSE ET DE LA FAUNE
SAUVAGE
85 bis, avenue de Wagram
75 017 PARIS
TEL. : 01.44.15.17.17.



CENTRE D'ECOLOGIE
FONCTIONNELLE ET
EVOLUTIVE
1919, route Mende
34090 MONTPELLIER
TEL. : 04.67.61.34.34

ETUDE DES INTERACTIONS ENTRE LE LYNX ET SES PROIES PAR UTILISATION DE DONNEES ISSUES DE PIEGES PHOTOGRAPHIQUES



Stage recherche et innovation -20189

**MOTS clés : Ecologie, pièges photographiques,
interactions trophiques prédateur-proie**

CHAINE Anna

Promotion 118

Remerciements

Je remercie GIMENEZ Olivier, DUCHAMPS Christophe et MARESCOT Lucile de m'avoir accompagné tout au long de ce stage et tant appris. Merci pour votre grande disponibilité et ce que vous m'avez transmis.

Je souhaite, de plus, remercier toute l'équipe HAIR du CEFÉ, pour votre aide et votre bonne humeur. J'ai été plus que bien accueillie et passé d'excellents moments.

Mes remerciements également à FANJUL Jean-Baptiste et CHENESSEAU Delphine qui m'ont reçu dans le JURA et m'ont permis d'en apprendre plus sur les objectifs et actions du PPP lynx. Une pensée à JEAN Nicolas, pour la formation loup-lynx prodiguée en duo avec Christophe et qui m'a beaucoup apportée.

Pour finir, je n'oublie pas de remercier toutes les autres personnes plus enrichissantes les unes que les autres que j'ai pu côtoyer pendant ce stage.

Table des matières

Introduction	1
I- Contexte d'étude	2
1. Une espèce emblématique à forts enjeux de conservation : le lynx boréal	2
1.1 Biologie de l'espèce et comportement	2
1.2 De l'extinction à la réintroduction	3
1.3 Statut de conservation, perspectives et menaces	4
2. Etude, conservation et gestion du lynx et de ses proies : le Programme Prédateur Proie Lynx	5
2.1 Contexte de l'étude	5
2.2 De la collecte à l'analyse des données : des acteurs variés	5
2.3 Axes de recherche	7
2.4 Suivi des lynx par piégeage photographique	8
3. Contexte du stage : une nouvelle manière d'utiliser ces données	12
3.1 Objectif du stage	12
3.2 Question posée	13
3.3 Hypothèses de travail	13
II- Matériel et méthodes	15
1. Préparation des données	15
1.1 Etat du jeu de données avant préparation	15
1.2 Identification des espèces présentes	15
1.3 Préparation des données pour analyse : utilisation du logiciel RStudio	16
2. Analyses exploratoires	16
2.1 Analyses statistiques	17
3. Quantifier les interactions à l'aide d'un modèle linéaire	18
3.1 Calcul d'intervalles de temps et analyse par utilisation d'un modèle de régression linéaire mixte	18
3.2 Etude de la saisonnalité	19
3.3 Choix du modèle	20
3.4 Vérification des hypothèses du modèle	20
III- Résultats	21
1. Identification d'espèces	21
2. Analyses exploratoires	22
2.1 Analyse factorielle des correspondances (AFC)	22
2.2 Représentation cartographique	29
3. Quantifier les interactions à l'aide d'un modèle linéaire	30

3.1	Nombre d'intervalles par type et par saison.....	30
3.2	Estimations par le modèle.....	31
IV-	Discussion	35
	Conclusion	38

Sigles et abréviations

AFC : Analyse Factorielle des correspondances

ONCFS : Office Nationale de la Chasse et de la Faune Sauvage

FDC : Fédération Départementale des Chasseurs

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CEFE : Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive

PPP : Programme Prédateur Proies

Bibliographic record and abstract

Author : CHAINE Anna

Promotion : 118

Report data :

- **Title:** Study of lynx-prey interactions by using camera trapping data.
- **Pages :** 38
- **Tableaux :** 2
- **Figures :** 13
- **Annexes :** 6

Mots clés : Ecology, camera trap, trophic/ predator-prey interactions,

RESUME

Studying interactions in space and time between several animal species is of fundamental interest in ecology. Camera traps offer a non-invasive framework to study these interactions in the wild. However, the analysis of camera trap data for several species and traps is still underdeveloped. This study aims to better understand trophic interactions between a predator, the Eurasian lynx (*lynx lynx*) and its main preys, the chamois (*Rupicapra rupicapra*) and the roe deer (*capreolus capreolus*). To achieve that, data from camera traps were collected in Jura mountains in 2016 and 2017. First, we tagged all photographs manually to identify each species individually. Then, we conducted exploratory analyses (AFC for factorial correspondence analyses) in order to better visualize the data-set and detect particular associations among species. Then, based on the AFC results, we studied trophic interactions between lynx and its preys using time intervals between species as a proxy for interactions. We regressed time intervals between species appearance over interaction type that is appearance order of species (lynx followed by prey species or prey species followed by lynx), and season using linear mixed effect models. In particular, we examined spatial avoidance by estimating to which extent sites used by lynx influenced subsequent visits of prey and vice versa. We considered trap site as a random effect to account for spatial variation between traps in time intervals, extending an approach recently proposed in the literature. Time intervals were first compared all periods combined and in a second time per season. We then compared time difference between types of interaction of each species pair. Our results showed a spatiotemporal avoidance from preys facing predator pressure with a more important effect for roe deer than for chamois. Furthermore, we detected a significant season effect, with longer time intervals in winter between lynx and roe deer. Our study sheds new light on the interactions between lynx and its preys, with management implications for the Jura ecosystem. The statistical approach can be conveniently used for studying predator-prey interactions based on camera trap data. Furthermore, pursue this study and include data from more years and study areas and complementary tests will permit to have more results in the future.

Notice Bibliographique

Auteur : CHAINE Anna

Promotion : 118

Signalement du rapport :

- **Titre :** Etude des interactions entre le lynx et ses proies par utilisation de données issues de pièges photographiques.
- **Pages :** 38
- **Tableaux :** 2
- **Figures :** 13
- **Annexes :** 6

Mots clés : Ecologie, pièges photographiques, interactions trophiques prédateur-proie

RESUME

Etudier les interactions, dans l'espace et dans le temps, entre plusieurs espèces constitue un point central en écologie. Pour cela, de nouveaux moyens d'études, non intrusifs et indépendants d'un observateur, tel que les pièges photographiques ouvrent de nombreuses perspectives. Cependant, l'analyse de ces données, pour plusieurs espèces et plusieurs pièges, est encore peu développée. Notre étude, inscrite dans le cadre du Programme Prédateur Proies Lynx, a pour objectif la compréhension des interactions trophiques entre un prédateur, le lynx boréal (*lynx lynx*), et ses deux proies principales, le chamois (*Rupicapra rupicapra*) et le chevreuil (*capreolus capreolus*). Pour cela, elle s'appuie sur des données, issues de pièges photographiques et obtenues grâce à une campagne réalisée sur l'aire pilote du Jura lors des années 2016 et 2017. Après étiquetage manuel des images en fonction des espèces préalablement identifiées nous avons procédé à plusieurs analyses. Tout d'abord, des analyses exploratoires (analyse factorielle des correspondances et cartographies), ont permis une meilleure visualisation du jeu de données et l'observation de premières tendances. Des associations pertinentes entre espèces et pièges ont ainsi été détectées. Afin d'étudier ces interactions, notre approche s'est ensuite basée sur le calcul des intervalles de temps entre le passage de chacune des espèces sélectionnées par l'AFC. Ainsi, nous avons prédit le temps d'intervalle entre l'apparition de deux espèces en fonction du type d'intervalle correspondant à l'ordre d'apparition des espèces (prédateur-proie ou proie-prédateur). La saison à laquelle ont eu lieu ces interactions a également été prise en compte. Tout ceci a été effectué par utilisation d'un modèle de régression linéaire mixte. L'ajout d'un effet aléatoire fait la particularité de notre modèle et permet de prendre en compte la variabilité spatiale dans notre analyse. Nous avons ensuite estimé l'effet des saisons sur le temps d'apparition par type d'interactions. Ces analyses ont permis de mettre en évidence un potentiel évitement spatio-temporelle des proies face aux prédateurs. Un effet accentué pour le chevreuil a été observé. Nous avons également pu montrer un effet de la saison notamment pour le chevreuil en hiver avec des intervalles globalement plus importants et un évitement potentiel plus marqué face au lynx. L'approche utilisée ouvre de nombreuses perspectives. Ainsi, poursuivre l'étude sur plusieurs années, inclure d'autres sites et ajouter des tests complémentaires permettrait d'améliorer la fiabilité des résultats obtenus.

Introduction

Favoriser la cohabitation entre grands prédateurs et activités humaines est aujourd'hui un enjeu majeur. Dans ce cadre, l'Office nationale de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS) met en place différents programmes et dispositifs, au sein du réseau loup-lynx, afin d'éclairer par des données scientifiques les décisions prises en terme de conservation et de gestion de ces espèces. Dans ce contexte, le Programme Prédateur Proie Lynx (PPP Lynx), est un projet de recherche porté par l'Office Nationale de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS), la Fédération Nationale des Chasseurs (FDC) du Jura (<https://www.chasseurdujura.com/programme-predateur-proies-lynx.htm>), de l'Ain et de la Haute Savoie ainsi que le Centre National de Recherche Scientifique (CNRS).

Celui-ci, vise à améliorer à la fois la gestion et conservation de la population française de Lynx, concentrée principalement au niveau du massif jurassien, mais aussi celle d'ongulés sauvages tel que le chevreuil et le chamois. Ces derniers, proies principales du félin, sont également soumis à des plans de chasse adaptés dans un objectif de maintien de l'équilibre sylvo-cynégétique (Klein F., Rocquencourt A. et Ballon P., 2008). Celui-ci correspondant à une situation d'équilibre où les populations d'herbivores permettent une régénération forestière durable. Ainsi, cette étude permet d'améliorer la compréhension des interactions entre le lynx boréal, à fort enjeux de conservation, et ses proies en lien avec l'activité cynégétique.

L'étude des interactions entre espèces, processus dynamiques variant selon les contextes environnementaux et écologiques, constitue un point d'étude central en Ecologie. Cette étude permet notamment d'appréhender la dynamique des populations et écosystèmes étudiés mais aussi d'expliquer le comportement de certaines espèces et de prédire leur répartition. Au cours de ce stage, nous nous intéressons aux interactions spatio-temporelles entre le lynx boréal et ses proies dans le département du Jura. L'étude des interactions trophiques représente cependant un réel défi étant donné leur variabilité en fonction des échelles temporelles et spatiales (Cenci et Saavedra, 2018., Carroll et al., 2019., Thurman et al., 2019).

I- Contexte d'étude

1. Une espèce emblématique à forts enjeux de conservation : le lynx boréal

1.1 Biologie de l'espèce et comportement

Le Lynx boréal (*Lynx Lynx*), animal forestier est, en France, essentiellement présent dans les forêts de montagne. Il peut cependant également s'adapter à des milieux arborés de basse altitude.

Carnivore strict, il n'est que très rarement charognard et se nourrit essentiellement de proies qu'il chasse et tue lui-même (Odden et al, 2006.). La composition de son régime alimentaire varie en fonction, notamment, du milieu dans lequel il évolue. En France, le régime alimentaire du lynx boréal est composé majoritairement de petits ongulés sauvages (chevreuils et chamois) mais il peut très occasionnellement se nourrir de mustélidés, chats sauvages, etc. (ONCFS, 2018.) (Cf. ANNEXE 2).

Le Lynx est un animal solitaire. Il chasse seul, le plus souvent du crépuscule au lever du soleil. Il use donc de sa très bonne vue nocturne et de son ouïe fine pour repérer sa proie qu'il est capable de détecter à 300m de distance. Le pistage peut, par la suite, prendre plusieurs heures. Le félin joue, au moment propice, sur l'effet de surprise pour capturer sa proie. Ainsi, il avance à pas feutrés et utilise le couvert végétal pour se camoufler. Ce camouflage est amélioré par son pelage tacheté. De plus, ses pattes palmées lui donnent un avantage important lorsqu'il doit courir dans la neige. Tapit, il observe longuement sa proie puis bondit au moment opportun. En un bond, il peut ainsi franchir jusqu'à 5 m de distance. Mauvais coureur de fond, du fait de sa faible capacité cardiaque, il est cependant très rapide. De plus, en cas d'échec, le félin n'aura plus qu'une chance sur 6 de capturer sa proie et l'ensemble des autres proies potentielles seront alors averties de sa présence. On estime cependant que 70 % des attaques lancées à moins de 20 mètres aboutissent à une capture (Jost J.P. et Jost-Tse Y.C., 2012.).

Pour capturer sa proie, le lynx la saisie et l'immobilise grâce à ses griffes. Il tue, par la suite, les ongulés par étouffement en comprimant leur trachée grâce à sa mâchoire et les rongeurs en brisant leur colonne vertébrale. Une fois tuées, les proies sont trainées à couvert.

Selon la taille de ces dernières, le lynx peut revenir plusieurs jours sur sa proie. Celui-ci ne consommera cependant que les proies tuées par ses soins.

Les lynx sont des animaux territoriaux. Bien que leurs territoires puissent se chevaucher, mâles et femelles ne se rencontrent réellement qu'en période de rut au début du printemps.

Chaque lynx adulte évolue sur un domaine vital dont l'étendue varie de 100 à 400 km² selon, entre autre, l'abondance des proies et la présence d'autres individus. Les territoires peuvent se chevaucher pour des individus de sexes différents mais sont défendus contre les individus de même sexe. Ils sont marqués par des dépôts odorants (urines, liquides de glandes sudoripares, etc.).

Un jeune individu atteint sa maturité sexuelle vers l'âge de 2 ans. Après une période de reproduction et de rut puis une gestation d'environ 10 semaines, chaque femelle donne naissance, en moyenne, à deux ou trois petits qu'elle élève seule. Cette longue période d'élevage permet notamment un apprentissage de la chasse. Ces jeunes individus disperseront vers l'âge de 9-11 mois. Les jeunes femelles, en fonction des proies disponibles, s'installent en général non loin de leur mère. Les jeunes mâles, quant à eux, parcourent de plus longues distances à la recherche d'un nouveau territoire (Breitenmoser, 2000).

1.2 De l'extinction à la réintroduction

La France abrite aujourd'hui une des dix sous-populations de lynx boréals présentes en Europe. Bien que cette sous population représente aujourd'hui un peu plus d'une centaine d'individus, la situation du lynx en France n'a pas toujours été ainsi (Linnell et al., 2009).

En effet, le lynx boréal est, au 15^{ème} siècle, présent sur pratiquement tout le territoire français, en plaine comme en montagne. Particulièrement sensible aux destructions successives de son habitat (déboisement) mais aussi à la diminution des populations de proies, celui-ci s'éteint progressivement. D'abord cantonné aux massifs montagneux, il disparaît des Vosges dès le milieu du 17^{ème} siècle, du Jura et du massif central à la fin du 19^{ème} siècle et enfin définitivement du massif Alpin et Pyrénéen au début du 20^{ème} siècle (Stahl et al., 1998).

L'histoire du Lynx en France ne s'arrête cependant pas là. Réintroduit en Suisse dans les années 1970, l'espèce a progressivement fait son retour dans l'hexagone. La sous-population ainsi formée s'est ensuite développée jusqu'à s'installer de manière pérenne dans le massif jurassien. Une vingtaine d'individus ont également été introduits dans les Vosges françaises

entre 1983 et 1993 n'aboutissant cependant pas à l'établissement d'une population pérenne (Breitenmoser et al., 2007).

La plus grande partie de la sous-population actuelle est présente dans le massif jurassien. Elle occupe ainsi les départements de l'Ain et du Jura et s'étend progressivement à celui du Doubs. Le nombre d'individus présents dans les deux autres noyaux est bien plus faible. Ainsi, le noyau historique vosgien est au bord de l'extinction. En effet, seul deux individus mâles ont été détectés dans cette région en 2018. Enfin, on observe de manière très marginale, la présence de l'espèce dans le massif alpin. Ainsi, 80 % de l'aire de présence du félin se concentre dans le massif jurassien (FERUS, 2019.).

1.3 Statut de conservation, perspectives et menaces

Le lynx boréal est aujourd'hui une espèce protégée à la fois au niveau national et au niveau européen. L'espèce est ainsi classée comme « espèce en danger » sur la liste rouge de l'UICN (Breitenmoser et al., 2000). Bien qu'elle se pérennise localement comme dans le massif jurassien, la population de lynx reste fragile et vulnérable. En plus de sa mortalité naturelle, celle-ci fait face à une augmentation de mortalité dû aux activités humaines. Les collisions routières et ferroviaires représentent ainsi les causes les plus connues. En moyenne, les lynx juvéniles sont plus touchés par ce type de mortalité que les lynx adultes. Le braconnage en est également une autre source (WWF France, 2019).

Un autre point, concernant l'ensemble des populations de lynx boréals d'Europe occidentale, correspond à la fragmentation des habitats forestiers due à une urbanisation croissante. De ce fait, les possibilités de dispersion et d'échanges d'individus entre les noyaux de population se trouvent réduites. Cela peut également entraîner un affaiblissement de la diversité génétique. L'exemple du noyau vosgien illustre bien ce phénomène. En effet, du fait d'infrastructures routières trop importantes (autoroute A4), celui-ci est aujourd'hui pratiquement isolé des autres noyaux de population. Des échanges entre noyaux n'ont donc pas permis de compenser la mortalité dans cette région. Favoriser ces échanges de populations, notamment par la création de passages à faune efficaces, est donc un point majeur de la conservation de cette espèce (Blanc, 2015).

Cette conservation passe également par l'acquisition de connaissances scientifiques au travers d'études mises en place par différents acteurs dont l'ONCFS et le Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive CEFE.

2. Etude, conservation et gestion du lynx et de ses proies : le Programme Prédateur Proie Lynx

2.1 Contexte de l'étude

Intéressante dans le but de maintenir l'équilibre sylvo-cynégétique du milieu, l'arrivée d'un prédateur modifie cependant profondément l'écosystème. Face à ce constat, l'ONCFS, les FDC de l'Ain, du Jura et de la Haute Savoie et le CNRS, mettent en place, en 2017, le Programme Prédateur Proie (PPP) Lynx (Cf. Schéma de fonctionnement du Programme Prédateur Proie Lynx). L'objectif de cette étude est de produire la connaissance scientifique afin d'améliorer la compréhension des liens lynx-proies-chasseurs. Celle-ci contribue, par ce biais, au suivi et à la conservation du lynx boréal en France mais aussi à la gestion des populations d'ongulés sauvages dans les régions occupées par le félin en lien avec l'équilibre sylvo-cynégétique (Klein, Rocquencourt et Ballon, 2008).

2.2 De la collecte à l'analyse des données : des acteurs variés

Le PPP lynx est le fruit d'une collaboration entre plusieurs acteurs aux compétences et moyens d'actions complémentaires. Le stage a ainsi été mené en lien avec chacun de ces acteurs.

En effet, sous la direction de l'ONCFS, celui-ci se déroulait au CEFE avec qui les analyses ont été réalisées. De plus, au cours de quelques jours sur le terrain, j'ai pu participer et être formée par des membres de l'ONCFS et de la FDC du Jura à la collecte de données. Une pluralité d'acteurs qui fait la richesse du PPP lynx et de l'accompagnement que j'ai pu recevoir pendant ce stage.

2.2.1 L'Office nationale de la chasse et de la faune sauvage

Créé en 1972, l'Office Nationale de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS), est un établissement public sous tutelle des ministères de la Transition écologique et solidaire et de l'Agriculture et de l'Alimentation. Cet établissement, présent dans tous les départements de France et d'Outre-mer, remplit de nombreuses missions. En effet, il met en place la surveillance des territoires et gère la police de l'environnement et de la chasse. Il réalise également de l'appui technique et du conseil, à la fois pour les administrations, les collectivités territoriales, les gestionnaires et aménageurs du territoire. Il organise l'examen et permet la délivrance du permis de chasse. Il accompagne également l'évolution de la chasse selon les principes du développement durable et travaille à une gestion des territoires ruraux respectueuse de l'environnement. Pour finir, à la frontière entre acquisition de connaissances et gestion, il met en place des études et recherches sur la faune sauvage et ses habitats. L'ONCFS se charge, dans ce cadre, du suivi et de la gestion des populations de plusieurs espèces d'oiseaux et de mammifères dont le lynx, le chamois et le chevreuil. Différentes études sont ainsi menées, certaines dans le cadre du PPP lynx (ONCFS, Rapport d'activité du PPP lynx, 2018). Pour mettre en place ces études, l'ONCFS s'associe à la fois aux fédérations départementales des chasseurs, aux centres nationaux de recherche scientifiques et aux universités.

2.2.2 La Fédération nationale des chasseurs

La Fédération nationale des chasseurs est une organisation française de chasseurs. Celle-ci se donne plusieurs missions. Ainsi, elle assure le développement de la chasse à l'échelle nationale mais aussi la représentation et la défense des intérêts cynégétiques auprès des instances nationales et européennes. Elle coordonne les actions des fédérations départementales et régionales (éducation à la nature, gestion des dégâts de gibier aux cultures, actions en faveur de la biodiversité, sécurité, etc.). Dans le cadre du PPP Lynx, en plus du soutien financier que la Fédération apporte, celle-ci permet une partie de la collecte des données nécessaire aux études menées (<https://www.chasseurdujura.com/programme-predateur-proies-lynx.htm>).

2.2.3 Le centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive

Le centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE) est un laboratoire dont la tutelle principale est le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Le CEFE est un des plus importants laboratoires de recherche en écologie en France et une référence dans ce domaine. Divisé en quatre départements (Ecologie évolutive, Biodiversité et conservation, Ecologie fonctionnelle et Interaction écologie et société), il traite des nombreuses préoccupations actuelles de notre société. Ainsi l'un de ces objectifs est d'établir des scénarios d'évolution des systèmes écologiques ainsi que des stratégies pour leur gestion, conservation et restauration. Au sein du PPP Lynx, le CEFE apporte son expertise dans l'analyse des données récoltées. Les résultats produits permettent une amélioration de la gestion et de la conservation des espèces concernées.

2.3 Axes de recherche

Le PPP Lynx comprend ainsi 5 volets indépendants afin de couvrir l'ensemble des enjeux de conservation et de gestion de ces espèces.

Le premier projet, mené par des ethnologues du CEFE, s'attache à étudier la perception des relations lynx/ongulés/chasseurs par les acteurs locaux. La dimension sociale issue de ces interactions est donc prise en compte et mise en avant.

Un second volet mené notamment par des acteurs de l'ONCFS et du KORA, permet l'évaluation dans le temps et l'espace de la pression de chasse et de la prédation du lynx sur les populations d'ongulés sauvage.

Mené par le CNRS et l'ONCFS, un troisième projet s'attache à la démographie des populations d'ongulés et plus particulièrement à l'influence de la prédation par le lynx et de la chasse sur cette dernière.

De même, un quatrième volet étudie l'influence de la prédation et de la chasse sur l'habitat des ongulés.

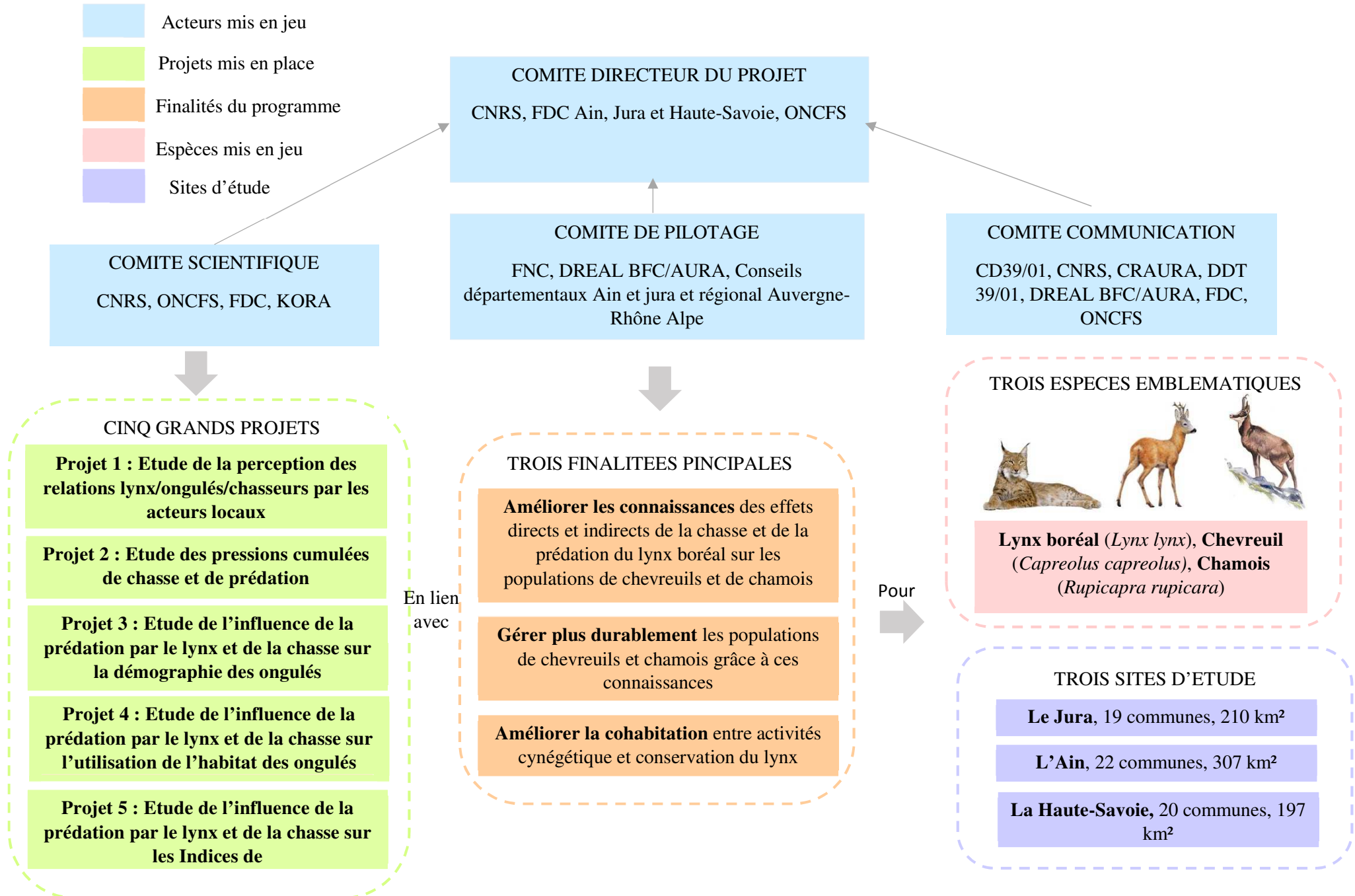
Pour finir, le cinquième projet s'intéresse à cette influence au travers d'indicateurs de changement écologiques.

Ces 5 volets sont donc complémentaires et permettent une compréhension globale de ces enjeux

SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU PROGRAMME PREDATEUR PROIES LYNX

Légende :

- Acteurs mis en jeu
- Projets mis en place
- Finalités du programme
- Espèces mis en jeu
- Sites d'étude



2.4 Suivi des lynx par piégeage photographique

Alors que l'étude de la faune sauvage se développe, de nouveaux moyens sont mis en place et viennent s'ajouter aux indices de présence déjà utilisés (traces, déjections, poils, etc.). Les appareils de piégeage photographique sont ainsi un bon moyen supplémentaire afin de détecter la présence d'espèces dans un secteur défini et d'en estimer la densité (Burton et al., 2015., Blanc et al, 2013.).

Du fait de la difficulté de capture et d'observation du lynx, l'acquisition de données par piégeage photographique est une des méthodes les plus utilisées pour l'étude des grands mammifères et en particulier des félidés (Karanth, 1995.) Ces caméras sont en effet très utilisées pour l'étude de la faune sauvage car elles permettent l'obtention d'une grande quantité de données de manière non invasive. Chaque caméra, équipée de capteur de mouvement, se déclenche ainsi dès qu'un animal passe dans sa zone de détection. Un certain nombre d'informations tel que la date, l'heure et le lieu de la prise de vue seront inscrites dans les métadonnées de la photo correspondante (Cf. ANNEXE 3). Un autre intérêt d'une telle méthode est qu'elle permet une capture de données en continue sur des périodes de temps longues. De plus, ces données représentent un intérêt majeur. En effet, contrairement au cas du loup, la reconnaissance individuelle du lynx peut être effectuée grâce à ces images par patron de pelage (Deharte A., 2018). Cette méthode est bien moins coûteuse que par signature génétique. Il existe donc très peu d'alternatives permettant d'obtenir ce niveau d'information de manière non-invasive et peu coûteuse pour une étude multi-spécifique.

2.4.1 Sites d'étude

Le piégeage photographique, dans le cadre de l'étude, est utilisée sur deux sites du massif jurassien : le Jura et l'Ain et sur un site en Haute Savoie (ONCFS, Rapport d'activité du PPP lynx, 2018).

2.4.1.1 Site du Jura

Le dispositif du site pilote du Jura couvre une surface de 210 km² et s'étend sur 19 communes. Il est caractérisé par un taux de boisement de 62% ainsi qu'une altitude variant entre 520 et 1150 mètres, ce qui en fait un milieu particulièrement propice au lynx.

L'étude par piégeage photographique y a ainsi été menée entre juin 2016 et décembre 2017. Ce type de suivi a été interrompu en fin d'année 2017 dans le but d'économiser le matériel. Sur ce site, 30 pièges photo ont été posés, 21 ont été conservés notamment pour leur positivité au lynx.

2.4.1.2 Site de l'Ain

Le site de l'Ain s'étend, quant à lui, sur 22 communes et couvre une surface de 307 km². Le taux de boisement y est de 69 % pour une altitude de 400 à 950 m.

L'étude par piège photographique, débuté en janvier 2017 s'est poursuivi en 2018 avec 24 sites équipés de 2 caméras chacun. Ainsi, au cours de l'année 2018, 94 captures photographiques du félin ont pu être réalisées. Sur ces 94 évènements, 13 individus ont été identifiés.

2.4.1.3 Site de Haute Savoie

Ce site, sur une surface de 197 km² s'étend sur 20 communes. Moins boisé que les deux précédents et d'une altitude comprise entre 450 et 1112 mètres, il est peu fréquenté par le lynx. Ainsi, bien que la volonté d'améliorer les connaissances des lynx soit présente, les données dont dispose le réseau sur cette zone sont assez faibles. 15 sites y ont été suivis pour une période d'environ 2,5 mois (du début du mois de mars à la fin du mois de mai). Malgré cette courte période un lynx a pu y être détecté.

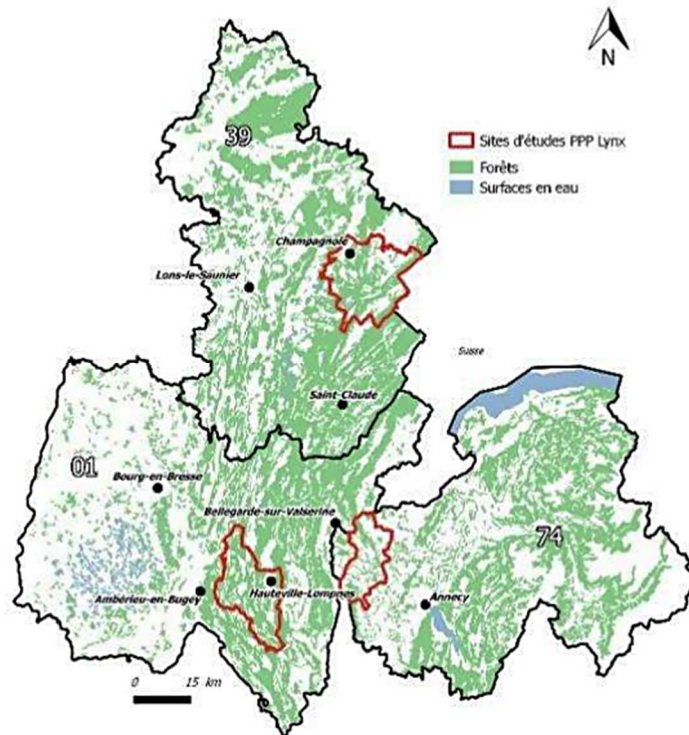


Figure 1: Cartographie des 3 sites d'études du PPP lynx (Source : Incr.org, Bulletin d'information n°1, 2018.)

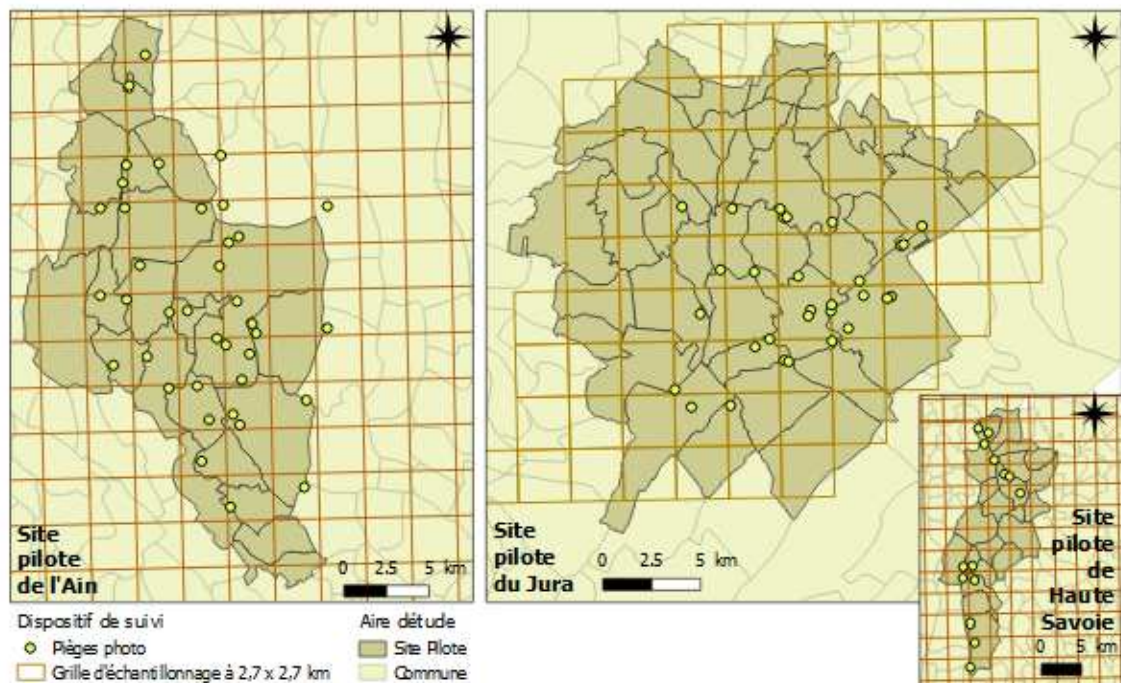


Figure 2: Cartographie des sites pilotes et dispositifs de suivi du PPP lynx (Source : Deharte, 2018)

2.4.2 Protocole d'étude, acquisition et utilisation des données

Chacun des sites pilotes présentés est équipé d'un réseau de pièges photographiques aux emplacements bien définis.

2.4.2.1 Mise en place d'un plan d'échantillonnage systématique

Chaque site est, préalablement à l'étude, découpé suivant une grille d'échantillonnage aux mailles 2.7 x 2.7 km. Cette grille, géoréférencée sous Système d'Information Géographiques (SIG), permet une répartition homogène des pièges sur l'ensemble de l'aire d'étude et ainsi l'obtention d'un résultat représentatif de la population totale étudiée, ici la population de lynx.

Chaque maille est ainsi équipée d'un ou de plusieurs pièges photos composés chacun de deux appareils, placés de part et d'autre d'un chemin forestier. Ceux-ci, placés l'un en face de l'autre, permettent de photographier les deux flancs de l'animal. La photographie des deux flancs d'un lynx permet par la suite une identification individuelle de celui-ci.

Chaque piège photo n'est pas placé de manière aléatoire. En effet, l'objectif des études mises en place est, initialement, d'estimer des densités de lynx. De ce fait, chaque appareil est mis en place par des opérateurs locaux de manière à optimiser la détection du félin. Ainsi les chemins forestiers larges – souvent voies de passage anthropiques – sont privilégiés. Si un piège photographique ne capture pas assez de lynx ou trop peu, celui-ci est remplacé au sein de la même maille ou supprimé. On identifie donc chacun des pièges photos par un numéro composé du numéro de la maille et du numéro du piège posé. Ainsi dans la maille 4, 3 pièges ont été posés. Le piège 4.1 et 4.2 ont été supprimés tandis que le piège 4.3 est toujours en activité. Dans tous les cas, au moins un piège composé de deux appareils doit être en activité pour chaque maille durant la période d'étude.

Récemment, le maillage a été harmonisé avec celui utilisé en Suisse. Les mailles passent alors aux dimensions 2.5 km x 2.5 km. L'objectif est ainsi de faciliter les travaux transfrontaliers futurs. Cette nouvelle grille d'échantillonnage ne concerne cependant pas les données récoltées sur les campagnes 2016 et 2017 que nous étudions ici.

2.4.2.2 Utilisation des données issues de ces pièges

Ces données font actuellement en France l'objet de plusieurs utilisations. Ainsi, après identification de chaque félin, il est possible d'étudier des domaines vitaux de certains individus et d'estimer des densités de populations.

L'identification individuelle du lynx est réalisée grâce à des patrons de pelage de chaque flanc de l'individu. Un logiciel permet ainsi de comparer les motifs de chaque nuage de tâche et d'estimer si l'individu a déjà été observé auparavant ou non et si oui de relier ces deux identifications.

Les données issues de piégeage photographique permettent également l'étude de la densité de population. Des estimations démographiques sont ainsi réalisées par capture-marquage-recapture. Ces méthodes sont basées sur des estimations de probabilités de survie et de recapture du félin à l'aide de l'identification individuelle basées sur les données de piégeage photographiques. Ainsi, il existe un risque de ne pas capturer un individu, pourtant présent sur le site, estimer une probabilité de recapture permet de corriger cela.

3. Contexte du stage : une nouvelle manière d'utiliser ces données

Bien que placés sur les voies de passages potentielles du lynx, les données récoltées par les pièges sont variées. Ainsi, de nombreuses espèces forestières sont capturées, dont le lynx et ses proies. Alors qu'auparavant seules les données photographiques de lynx étaient utilisées, l'idée d'utiliser les données d'autres espèces semblait une piste intéressante pour identifier et quantifier les interactions entre le lynx et ses proies.

3.1 Objectif du stage

Ce stage a été mis en place par l'ONCFS au sein du CEFÉ dans le but de valoriser ces données photographiques au potentiel encore sous-exploité. Il vise donc, à l'échelle du massif

jurassien français, à améliorer les connaissances déjà acquises sur les interactions entre le lynx boréal et les populations d'ongulés en lien avec l'activité cynégétiques. Pour ce faire, celui-ci se concentre sur les données issues de pièges photographiques récoltées sur les années 2016 et 2017 sur le site d'étude du Jura.

3.2 Question posée

On cherche ici à mettre en place une démarche basée sur des analyses multi-spécifiques encore peu utilisées en France. **On s'interroge sur l'existence d'interactions entre le lynx et ses proies dans le département du Jura.** Cette réflexion permettra notamment d'obtenir des informations sur la manière dont les espèces se distribuent dans l'espace et le temps en lien avec ces interactions.

Un schéma général de la démarche suivi pour répondre à cette interrogation présente cette approche et sera par la suite détaillée (cf II).

3.3 Hypothèses de travail

L'arrivée d'un prédateur dans un nouveau milieu induit de profonds changements au niveau de la dynamique des proies mais aussi, la plupart du temps, concernant leur comportement. Cela se traduit, par exemple, par une vigilance accrue des proies ou encore une occupation différente du territoire. De ce fait, on peut, dans notre cas, émettre l'hypothèse d'un évitement spatio-temporelle des proies, chevreuils et chamois, face à leur prédateur, le lynx.

De plus, on peut supposer que l'intensité de cet évitement différera suivant la nature de la proie (chamois ou chevreuil), ces deux ongulés présentant un comportement et une occupation du territoire différent.

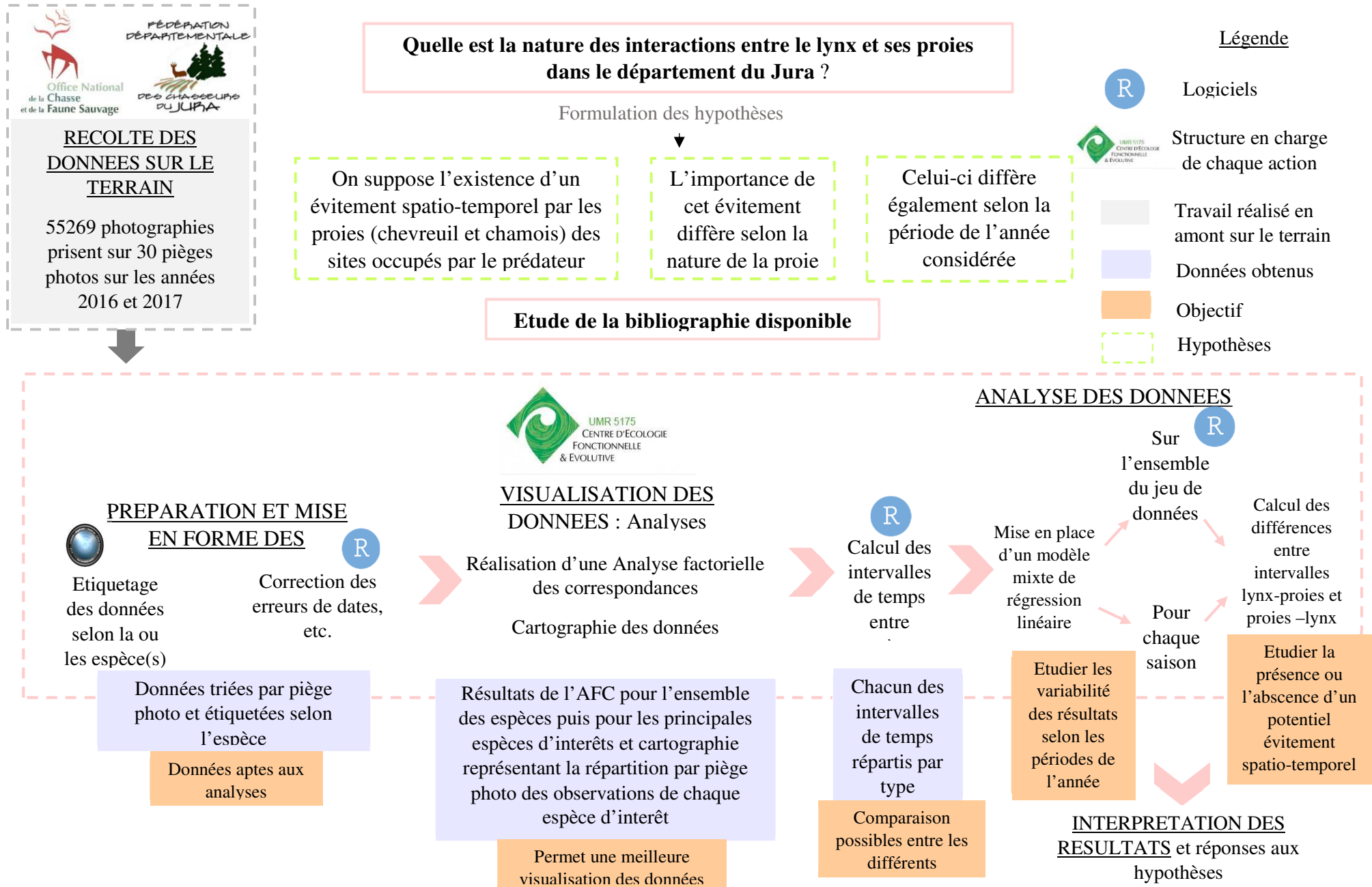
Pour finir, on s'attend à obtenir des interactions différentes suivant la période de l'année. En effet, lynx et ongulés présentent des différences importantes de comportement suivant la saison qui influencent leurs domaines vitaux (Breitenmoser et Haller, 1993.). Des études ont par exemple mis en évidence la descente des femelles chamois durant la saison hivernale (Unterthiner et al., 2012.) vers les zones de vallées que lynx et chevreuils ont tendance à occuper (Breitenmoser et Haller, 1993.) La période hivernale est de plus, en terme d'occupation de l'espace, une période au cours de laquelle les domaines vitaux des proies et carnivores ont

tendance à se superposer (Mark Elbroch et al. 2018). Il s'agit également d'une période plus stable pour le lynx, qui laisse place à une période de rut plus agitée puis à la naissance et élevage des petits. De plus, la part de chacune des espèces d'ongulés dans le régime alimentaire du félin peut différer suivant la saison. Ainsi, celui-ci se focaliserait par exemple plus sur les chevreuils, espèce plus vulnérable, en période neigeuse d'hiver. Ceci peut évidemment influencer sur les interactions entre ces deux espèces.

En partant de ces postulats, nous pouvons supposer que le chevreuil, étant plus vulnérable à la prédation durant la période hivernale est sans doute plus enclin à montrer des associations positives avec son prédateur c'est-à-dire un évitement spatio-temporel plus faible. On s'attend alors à ce que le temps d'apparition entre la paire chevreuil-lynx soit plus faible que pour les autres saisons.

Une seconde hypothèse s'appuierait sur l'idée d'un changement saisonnier de niches écologiques notamment pour le chamois. Ce changement induirait une superposition des niches écologiques du chamois et du chevreuil pendant la période hivernale pouvant ainsi encourager le lynx à changer de proie durant cette période.

SCHEMA GENERAL DE LA DEMARCHE SUIVIE



II- Matériel et méthodes

1. Préparation des données

1.1 Etat du jeu de données avant préparation

Avant de débiter l'analyse, il était nécessaire de mettre en forme les données récoltées (Cf. Schéma général de la démarche suivie). En effet, bien que les images soient datées et géolocalisées, les espèces présentes n'étaient pas identifiées. De plus, le piège photographique se déclenchant au mouvement, le vent ou les végétaux pouvaient être à l'origine de certaines images non exploitables. Un travail de tri et d'identification, au préalable, a donc été nécessaire.

Le jeu de données brutes, avant préparation, était composé de 55 692 photos. Celles-ci étaient triées selon le piège photographique (1.1 à 20.1), la position de l'appareil (droite ou gauche symbolisés par les lettres D et G) et le numéro de pose, si l'appareil avait été déplacé et posé à de multiples reprises. Une mention était apportée aux appareils supprimés au cours de l'étude.

La date, l'heure et le lieu de la prise de vue étaient inscrits au sein des métadonnées de chacune des photos. Un certain nombre de photographies cependant, du fait d'un mauvais calibrage ou d'une erreur de l'appareil, n'était pas datées de la bonne année ou de la bonne heure ce qui a dû être modifié manuellement par la suite.

1.2 Identification des espèces présentes

1.2.1 Identification et étiquetage manuel, utilisation du logiciel Digikam

L'utilisation d'une méthode d'identification et d'étiquetage manuel a été privilégiée au cours de ce stage. Pour cela, le logiciel Digikam a été choisi (Cf. ANNEXE 4). En effet, celui-

ci présente de nombreux avantages. Gratuit, il est très simple d'utilisation et permet, par groupage, un étiquetage plus rapide.

Chaque photo a donc été étiquetée suivant la ou les espèces identifiées. Cette étiquette, correspondant au nom de l'espèce identifié, pour être utilisable par n'importe quel ordinateur et logiciel d'analyse de données, doit être inscrite au sein des métadonnées de la photo correspondante sous forme d'un mot clé (données EXIF et IPTC). Digikam, une fois paramétré, permet cela de manière automatique. Les photos dont l'espèce n'était pas identifiable ou qui ne présentait aucune espèce animale étaient également triées et étiquetées « non identifié ».

Ce travail d'identification et d'étiquetage a ainsi été réalisé au début de mon stage, après étude de la bibliographie disponible. Le débit de travail, d'environ 4000 photos par jour, a été augmenté au fur et à mesure grâce à l'expérience acquise à environ 8000-9000 photos par jour. Cette méthode a ainsi permis le traitement de 55 692 photos sur environ 9 jours.

1.3 Préparation des données pour analyse : utilisation du logiciel RStudio

En plus de l'identification et de l'étiquetage, d'autres paramètres ont dû être adaptés et modifiés pour permettre l'analyse. Ainsi, les erreurs de dates signalées par Jean-Baptiste FANJUL, chargé étude et animateur du PPP, ont été corrigées directement sur le logiciel RStudio (version 3.6.0).

Après extraction des métadonnées de chaque photo sur ce même logiciel, celles-ci sont organisées sous forme d'une matrice représentant le nombre de capture de chaque espèce par piège photo. Les appareils, droite ou gauche, ne sont ici pas représentés.

2. Analyses exploratoires

Dans un premier temps, afin de visualiser au mieux le jeu de données étudié et d'estimer de premières tendances, des analyses exploratoires ont été réalisées. Celles-ci permettent une meilleure compréhension du jeu de données mais aussi d'enrichir les hypothèses formulées et les analyses suivantes.

2.1 Analyses statistiques

2.1.1 Analyse factorielle de données

L'analyse factorielle de données permet, dans le cas d'un jeu de données multivarié, d'estimer les variables les plus intéressantes afin de renseigner à la fois sur la structure du jeu de données et sur les liens possibles entre ces variables. Ici la variabilité du jeu de données s'exprime sur deux dimensions : les pièges et les espèces présentes.

Dans un premier temps, une table de contingence croisant ces deux variables qualitatives a été construite. Le travail a été effectué, pour cette AFC sur un tableau de présence-absence de chaque espèce sur chaque site modélisé par un piège photo.

L'analyse factorielle de donnée a, tout d'abord, été mise en place sur l'ensemble des espèces observées. Quelques espèces ont cependant été supprimées du fait d'une trop faible occurrence (écureuil et oiseau). Par la suite, une deuxième AFC prenait en compte les quatre espèces caractéristiques du PPP : lynx, chamois, chevreuil et humain.

Cette analyse a entièrement été réalisée en ligne sur le logiciel RStudio (version 3.6.0.).

2.1.2 Visualisation cartographique

Les données ont ensuite été représentées spatialement. Une carte a ainsi été réalisée pour chacune des quatre espèces précédentes. Cette cartographie a entièrement été mise en place sur le logiciel RStudio (v3.6.0.) par utilisation du package sp (v1.3-1).

L'objectif était ainsi de pouvoir visualiser non seulement la présence ou l'absence de chaque espèce pour chacun des pièges photo mais aussi le nombre d'occurrences de celles-ci par piège. Un maillage 2.7 x 2.7 superposé à la carte du Jura divisée en communes a été représentés. La présence d'une espèce sur chaque piège a été identifiée par une couleur spécifique à l'espèce. Le nombre de photographies pris par espèce était représenté par la taille du figuré de manière proportionnelle.

3. Quantifier les interactions à l'aide d'un modèle linéaire

Pour cette analyse, nous nous sommes basés sur un papier rédigé par NIEDBALLA J. et al., « Assessing analytical methods for detecting spatiotemporal interactions between species from camera trapping data », publié en 2019. Nous avons adapté cette approche aux particularités de notre jeu de données et notamment à la multiplicité des pièges et espèces étudiées. Toutes les analyses ont été réalisées sur le logiciel R studio.

3.1 Calcul d'intervalles de temps et analyse par utilisation d'un modèle de régression linéaire mixte

Dans un premier temps, nous avons évalué les interactions entre le lynx, le chamois et le chevreuil. Espèce primaire, le lynx est symbolisé par la lettre L. Le chamois et le chevreuil, espèces secondaires, sont respectivement symbolisés par les lettres C et V.

Nous avons par la suite étudié une à une les interactions entre le lynx et chacune de ses proies, c'est-à-dire le temps d'intervalle entre chacune de ces espèces.

Au cours de cette étude, nous considérons que le lynx n'est pas influencé par le comportement des ongulés. Au contraire, chamois et chevreuils peuvent présenter, face au prédateur, un comportement d'évitement.

Nous avons ici étudié l'évitement spatio-temporel possible entre proies et prédateur. Celui-ci se manifeste par une diminution de la fréquentation, par les proies, de lieux occupés peu auparavant par le prédateur. Dans le cas du piégeage photographique, il correspond à la diminution de la probabilité d'enregistrement de la proie après passage du prédateur pour un piège.

Nous avons, par la suite, calculé sur RStudio l'ensemble des intervalles entre les enregistrements du lynx et des ongulés : LC correspond à l'intervalle lynx-chamois et LV à l'intervalle lynx-chevreuil. Dans ce cas, si plusieurs enregistrements du lynx étaient observés à la suite les uns des autres, seul le dernier, précédent l'enregistrement d'une autre espèce, était utilisé. Les intervalles ont ainsi été calculés avec une précision à la seconde puis exprimés en

jours. En utilisant la même méthode, les intervalles CL (chamois-lynx) et VL (chevreuil-lynx) ont été calculés.

Pour chaque paire d'espèces, ces intervalles de temps, ont ensuite permis l'utilisation d'un modèle de régression linéaire mixte. Ce modèle était caractérisé par une variable à expliquer, la durée de l'intervalle, représentant l'évitement possible, et plusieurs variables explicatives, les types d'intervalles (LC, LV, CL et VL).

Un modèle mixte comprend à la fois des effets fixes et des effets aléatoires. Nous avons pris en compte l'identité des pièges comme effet aléatoire. Celui-ci, en partant de l'hypothèse que les pièges ont été choisis de manière représentative de l'habitat des espèces d'intérêt, a permis de considérer un effet commun du type d'interactions sur la durée des intervalles et une variabilité entre pièges dans cette durée sans avoir à appliquer le modèle séparément à chaque piège. On optimise ainsi l'utilisation des données puisque tous les pièges participent à l'estimation des effets.

3.2 Etude de la saisonnalité

On sait que les déplacements et comportements du lynx et de ses proies peuvent varier au cours de l'année.

Ainsi, on peut estimer trois grandes saisons caractérisées par des activités différentes du félin. Dans un premier temps, d'octobre à janvier, on observe une période hivernale stable au niveau des déplacements et du territoire. La période de février à mai est, quant à elle, caractérisée par une activité beaucoup plus élevée liée aux activités de pré-reproduction/rut et à la naissance des petits de l'année. La période juin-septembre, pour finir, est principalement caractérisée par l'élevage des jeunes.

Notre jeu de donnée, qui s'étendait d'octobre 2016 à octobre 2017 a été découpé selon ces trois périodes. La variable « saison » est ainsi venue s'ajouter aux autres variables explicatives de notre modèle, les types d'interactions, afin d'identifier de potentielles différences de comportement selon les saisons.

3.3 Choix du modèle

Afin de répondre au mieux aux attentes de la régression linéaire et d'obtenir les résultats les plus fiables possible nous avons réalisé une ANOVA sur plusieurs modèles afin d'évaluer leur significativité. Notre choix c'est porté sur le modèle le plus significatif, un modèle mixte tenant compte de la saisonnalité évoquée précédemment.

Après vérification de la significativité des résultats, en plaçant les intervalles LC et LV comme intervalles de référence, nous avons pu comparer les intervalles deux à deux par paires d'espèces. Ainsi, les différences entre les intervalles prédateur-proies et proies-prédateurs ont été calculées. Ceci a été mis en place sur RStudio toutes périodes confondues puis par saison. Un résultat négatif suggérerait un évitement potentiel tandis qu'un résultat positif n'indiquait pas d'évitement entre les deux espèces étudiées. Des intervalles de temps de manière générale plutôt élevés suggérerait des rencontres plus rares entre les espèces que des intervalles courts.

La réalisation de tableaux et graphiques a permis une meilleure visualisation de l'évolution des résultats sur l'année facilitant par là même l'interprétation.

3.4 Vérification des hypothèses du modèle

Enfin, les principales hypothèses du modèle ont été vérifiées. Ceci a nécessité l'utilisation de différents tests mis en place sur les résidus du modèle, c'est à dire les erreurs observées. Le modèle théorique n'est, en effet, satisfaisant que si ces résidus possèdent un certain nombre de propriétés. Premièrement, ceux-ci doivent être distribués de manière normale et ne pas être corrélés entre eux. De plus, ces derniers doivent être homoscedastiques. C'est-à-dire qu'ils doivent présenter la même variance quel que soit le groupe ou la variable explicative considérée.

La normalité des résidus du modèle a été vérifiée par un test de Kolmogorov-Smirnov compatible avec de grands jeux de données. L'homoscedasticité a été évalué par un test de Breusch-Pagan. Pour finir, un test de Durbin-Watson a permis de vérifier leur indépendance (absence d'autocorrélation).

III- Résultats

1. Identification d'espèces

Après traitement de 55 692 photos, quinze espèces différentes ont pu être identifiées :

- Les **humains** pour lesquels différentes composantes de la fréquentation humaine ont été étiquetées (véhicules, chien, chasseurs, promeneurs, cavaliers, etc.). Ceux-ci représentaient la plus grande partie du jeu de données avec 47 695 photos prises.
- Les photographies de **lynx** étaient, elles, au nombre de 394.
- Les **chamois**, autre espèce emblématique du PPP étaient représentés 1722 fois.
- Les **chevreuils** étaient, quant à eux, observés 502 fois.

De nombreuses autres espèces, non étudiées au sein du PPP, étaient, elles aussi, représentées. Ainsi, on pouvait observer :

- Des **renards** avec 2489 photos.
- Des **blaireaux** au nombre de 588.
- Des **sangliers** capturés 589 fois.
- Des **chats forestiers**, eux aussi, en nombre non négligeable avec 418 captures contre 49 observations pour les **chats domestiques**.
- Des **lièvres** au nombre de 196.
- Des **cerfs** au nombre de 92.
- **Fouines** et **martres** qui ont été observées respectivement 23 et 60 fois.
- **Ecureuil et oiseaux** qui ont été très peu capturés avec chacun 3 captures. Ceux-ci, trop faiblement représentés, ont cependant été supprimés pour la suite de l'analyse.

2. Analyses exploratoires

2.1 Analyse factorielle des correspondances (AFC)

2.1.1 Toutes espèces

Après construction d'un tableau de présence/absence des espèces considérées sur les différents pièges et suppression d'espèces trop peu présentes (écureuil et oiseau), nous avons effectué l'analyse factorielle de données.

Pour cette analyse, nous prenons en compte deux variables qualitatives. La variable « piège » est composée de 31 modalités et correspond aux pièges photos (1.1, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3, 3.1, 4.1, 4.2, 4.3, 5.1, 6.1, 7.1, 8.1, 8.2, 8.3, 9.1, 9.2, 10.1, 11.1, 11.2, 12.1, 12.2, 13.1, 14.1, 14.2, 15.1, 16.1, 17.1, 18.1, 19.1 et 20.1). La variable « espèce observée », quant à elle, comprend 13 modalités (Humain, lynx, chevreuil, chamois, blaireaux, chat domestique, chat forestier, renard, sangliers, fouine, martre, cerf, lièvre).

Le test de Khi2, réalisé par la suite, confirme la dépendance entre nos deux variables, permettant ainsi de poursuivre l'analyse.

En analysant le poids des lignes on peut voir que chacun des pièges, en fonction du nombre de photographies prises par celui-ci, pèse plus ou moins dans l'analyse. Ici, deux pièges se distinguent des autres par leurs poids: le piège 10.1 (0.32) et le piège 13.1 (0.18) avec respectivement 17 633 et 9907 photos prises. Ces deux pièges sont, en effet, placés sur des voies de passage humaines importantes (chemins de randonnées) d'où un grand nombre de captures.

De même, le poids des colonnes diffère selon le nombre de captures effectuées pour chaque espèce. Une capture correspond, ici, à une photographie d'un individu de l'espèce en question. Avec 47 695 photos prises, le poids de la modalité « humain » est bien plus important que celui des autres espèces dans l'analyse (0.87). Viennent ensuite avec un bien plus faible poids chamois (0.03) et renards (0.05). On observe enfin chevreuils, lynx, sangliers, blaireaux et chats forestiers (0.01).

Les vecteurs propres exprimant 80% de l'inertie, trois axes ont été conservés pour cette analyse.

Au niveau de la qualité de représentation des lignes, on observe que celle-ci est différente pour chaque piège suivant les dimensions. Les pièges 1.1, 10.1, 12.1, 13.1, 14.2, 20.1 et 9.1 sont très bien représentés au niveau de la première dimension qui exprime à elle seule 45% de l'inertie. Les pièges 17.1, 18.1, 4.3 et 6.1 le sont également assez bien. La deuxième dimension,

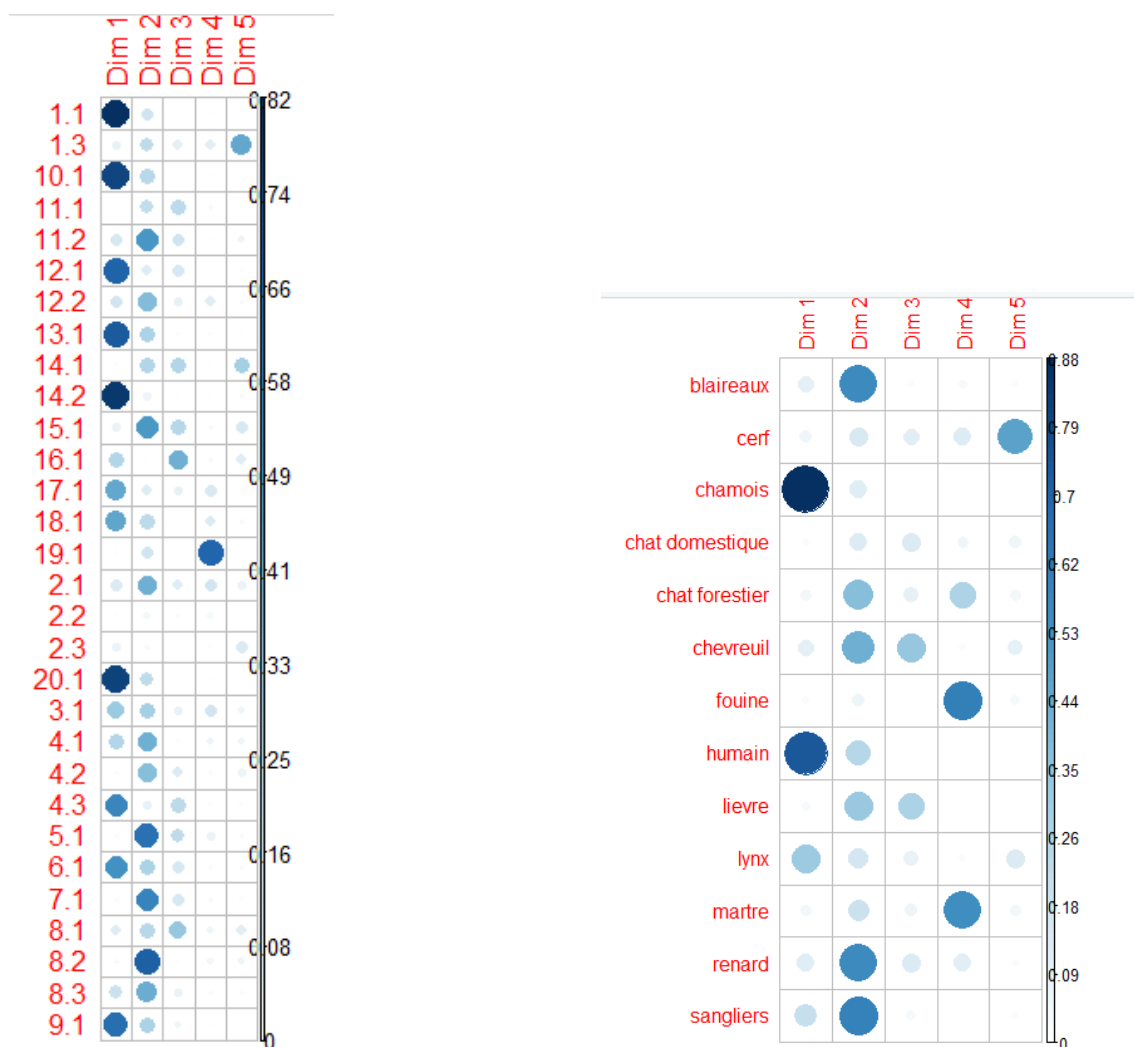


Figure 1: Qualité de représentation des lignes correspondant aux pièges photographiques (à gauche) et des colonnes correspondant aux espèces (à droite)

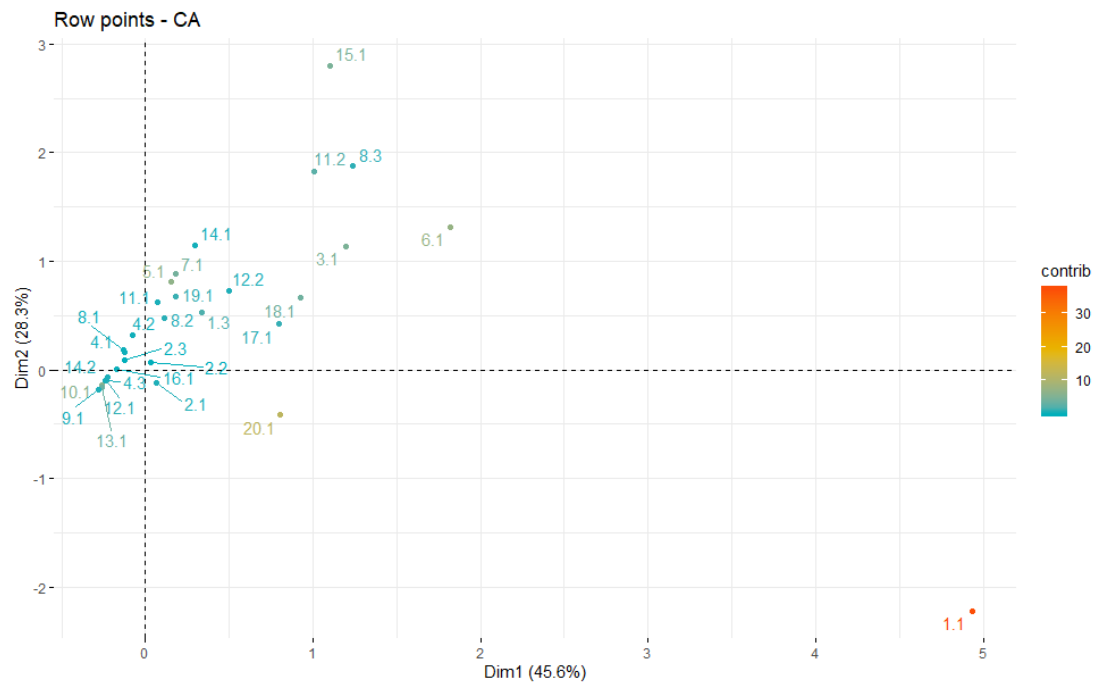


Figure 2: Contribution des lignes (les pièges photographiques)

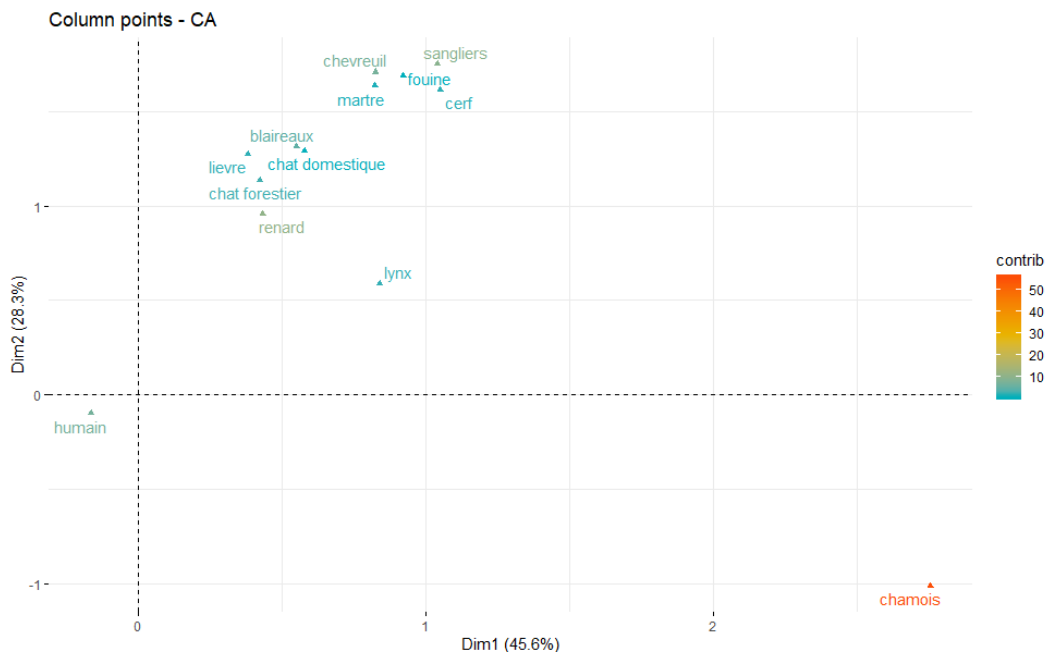


Figure 3: Contribution des colonnes (espèces) à la construction des axes

exprime environ 28 % de l'inertie. Les pièges 5.1, 7.1 et 8.2 y sont très bien représentés suivi des pièges 11.2, 12.2, 15.1, 2.1, 4.1, 4.2, 8.3.

Pour la troisième dimension qui exprime environ 7 % de l'inertie, avec une bonne représentation des pièges 16.1 et 8.1.

Nous avons ensuite étudié la qualité de représentation des colonnes, c'est-à-dire des différentes espèces sur les trois dimensions. Sur la première dimension, humains et chamois sont très bien représentés suivi des lynx. Sur la deuxième dimension, on observe une bonne qualité de représentation des blaireaux, renard et sanglier suivi des modalités chats forestiers, chevreuil et lièvre. Ces deux dernières modalités sont également bien représentées sur la troisième dimension.

La contribution de chaque espèce et de chaque piège à la construction des axes a ensuite été étudiée plus finement.

Le piège 20.1 contribue fortement à la construction des axes (notamment de l'axe 1). Les pièges 10.1, 13.1, 5.1, 7.1, 3.1, 6.1, 18.1 et 15.1 y contribue également, plus modérément.

Pour la variable espèces, la modalité chamois participe fortement à cette construction. Plus modérément la contribution des modalités renards et sanglier se détachent.

Quand on visualise les données sur un plan factoriel, on peut voir que l'analyse est peu discriminante pour la plupart des espèces. Cependant, certaines tendances se dessinent.

Les photographies d'humains, bien que très nombreuses, sont réparties de manière assez homogènes sur la plupart des pièges d'où une position au centre du plan factoriel. On peut relier cela au choix de pose des pièges sur des chemins de randonnées larges.

L'AFC discrimine cependant fortement l'espèce chamois des autres espèces. En ce sens, le piège 20.1 regroupe la plupart des captures de chamois.

Les espèces renard, chat forestier, chat domestique, lièvre, blaireaux, quant à elles, forment un bloc. Un deuxième bloc, peu discriminé du précédent, est formé par les espèces chevreuil, cerf, sanglier. Ceci pourrait traduire des voies de passages privilégiées selon la taille de l'animal. Enfin, le lynx semble, bien que plutôt corrélés à ces blocs, plus central.

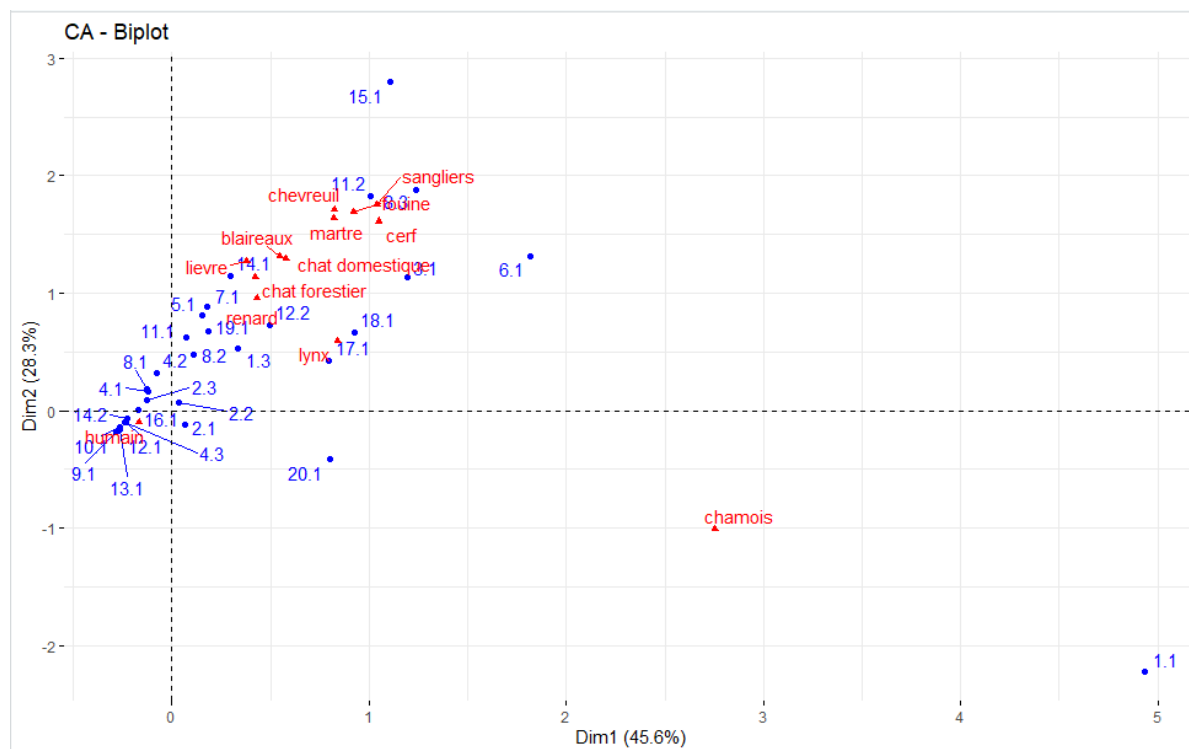


Figure 4: Représentation sur un plan factoriel de l'Analyse factorielle des correspondances pour toutes les espèces et tous les pièges étudiés

2.1.2 Espèces caractéristiques du PPP lynx

Une analyse factorielle de données a également été réalisée uniquement pour les quatre espèces emblématiques du PPP lynx. Seul les modalités « lynx », « humain », « chamois » et « chevreuil » ont, de ce fait, été conservées.

Au niveau du poids des lignes et des colonnes, de même que pour l'analyse précédente, on observe un poids important des pièges 10.1 et 13.1 ainsi que de la modalité « humain » (0.95). Ceci est suivi par la modalité « chamois » (0.03) puis par « chevreuils » et « lynx » (0.1).

Les vecteurs propres exprimant 97% de l'inertie on conserve dans ce cas deux axes.

Au niveau de la qualité de représentation, les pièges 1.1, 10.1, 11.1, 12.1, 13.1, 14.2, 17.1, 18.1, 2.1, 2.3, 20.1, 3.1, 4.1, 4.3, 5.1, 6.1, 8.1 et 6.1 sont très bien représentés sur la dimension 1. Sur la dimension 2, les pièges 11.2, 12.2, 14.1, 15.1, 16.1, 19.18.2 et 8.3 se distinguent suivant ce même critère. Pour les espèces, chamois et humain sont très bien représentés sur la dimension 1, chevreuil sur la dimension 2. Les lynx présentent, quant à eux, une qualité de représentation similaire sur ces deux dimensions.

Lorsqu'on étudie la contribution des variables aux axes, on peut voir que le piège 20.1 (ayant capturé principalement des chamois) et le piège 15.1 (capturant beaucoup de chevreuils) contribuent fortement à la construction des axes. Ceux-ci sont suivis par le piège 6.1. De même, au niveau des espèces, les chamois contribuent fortement à la construction des axes suivis par les chevreuils.

Enfin, lorsqu'on représente les pièges et les espèces sur un plan factoriel, la modalité humain est, comme précédemment, répartie uniformément sur tous les pièges. Chevreuil et chamois sont quant à eux bien discriminés. Le lynx, un peu plus proche de la modalité chevreuil est cependant relativement centré entre les deux proies.

L'AFC ne nous permet pas de mettre en avant des phénomènes précis. On peut cependant voir que les humains se répartissent de manière uniforme sur l'ensemble de l'aire d'étude. Chevreuils et chamois semblent, quant à eux, se différencier tandis ce que les lynx oscillent entre ces deux répartitions.

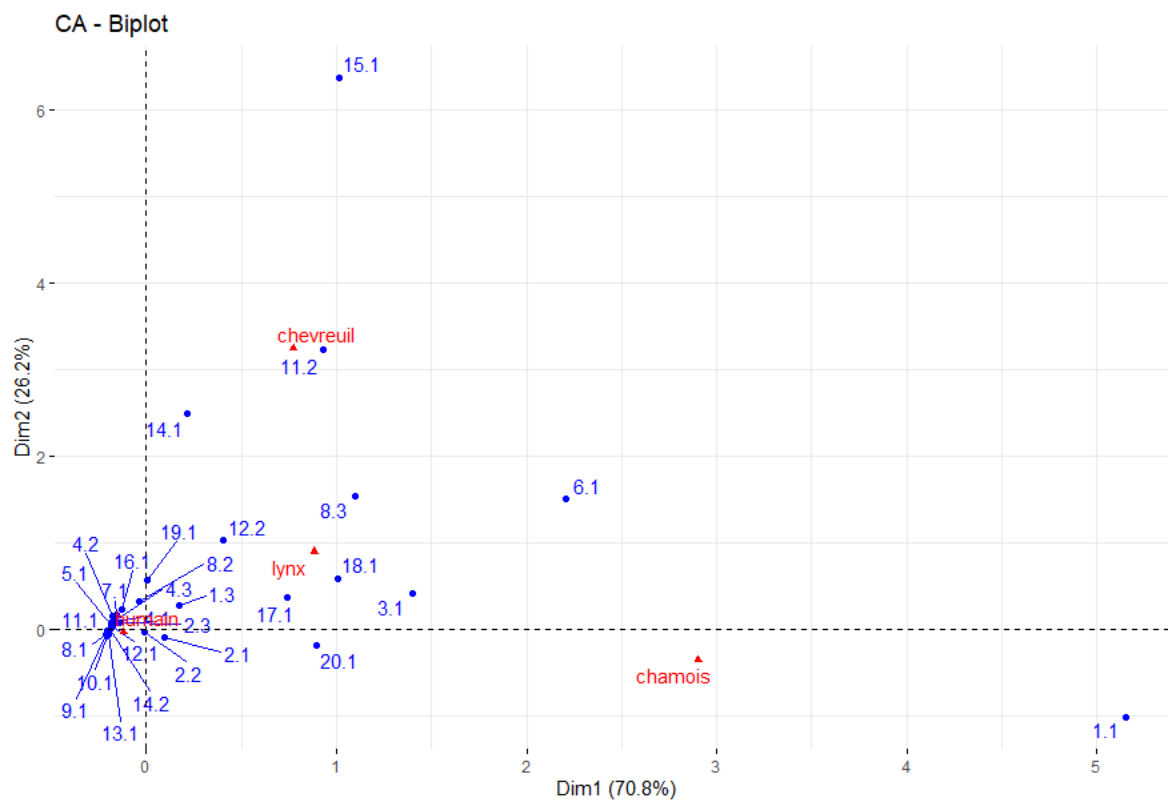


Figure 5: Représentation sur un plan factoriel de l'AFC pour les 4 espèces caractéristiques du PPP lynx

2.2 Représentation cartographique

Les représentations cartographiques de même que les analyses factorielles de données permettent une meilleure visualisation du jeu de données étudié. Comme nous avons pu l'identifier lors de l'AFC, le lynx est présent sur la plupart des pièges. Ceci n'est pas un phénomène étonnant car le protocole d'acquisition de données a été mis en place avec pour objectif de capturer du lynx (lieu de pose des appareils, déplacement si nécessaire, etc.). L'homme est également présent sur l'ensemble de la zone étudiée bien que plus présents sur certains pièges. Ceci est également liée au protocole de pose des pièges. En effet, le félin se déplace principalement sur des sentiers assez larges qui sont le plus souvent également des voies de passages humaines (sentiers de randonnées, etc.). Les chevreuils sont présents de manière assez homogène sur les différents pièges bien que certains semblent désertés par l'animal. Pour les chamois cependant, certains pièges semblent avoir capturé beaucoup plus de chamois que d'autres ce qui laisse présager d'une plus forte abondance de chamois sur une partie du territoire.

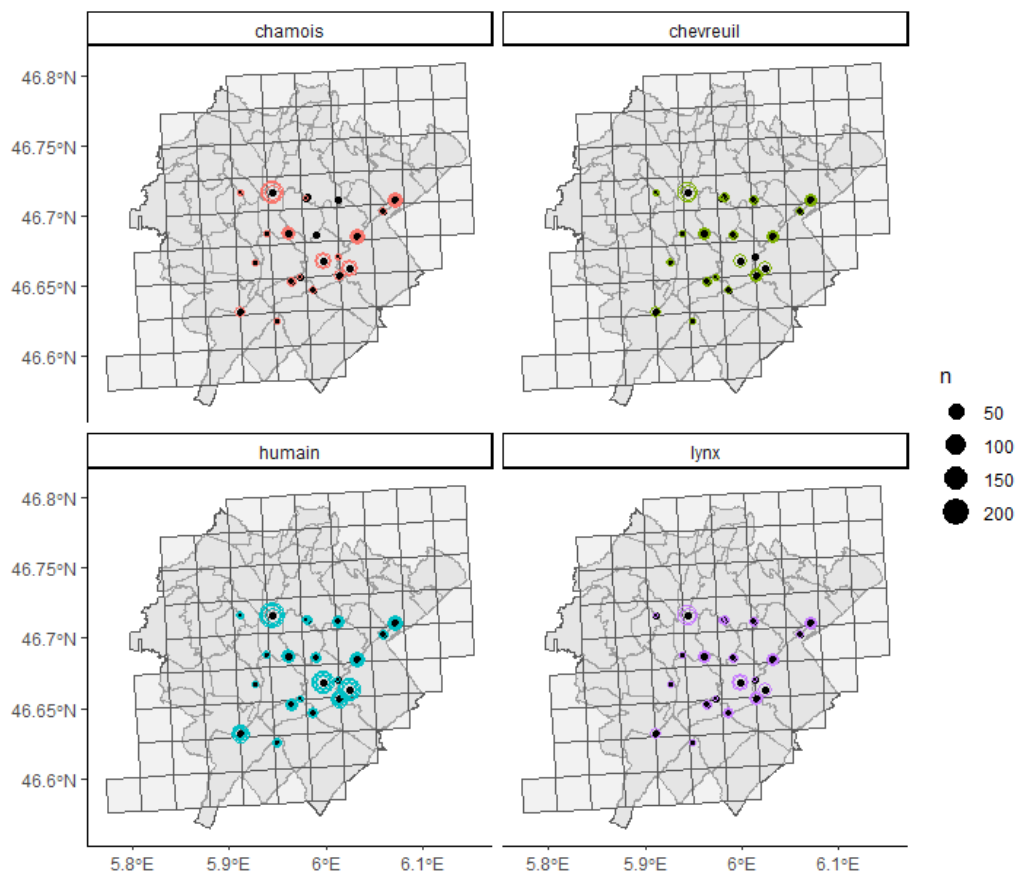


Figure 6: Représentation cartographique de la répartition des captures par pièges photographiques des 4 espèces emblématiques du PPP lynx.

3. Quantifier les interactions à l'aide d'un modèle linéaire

3.1 Nombre d'intervalles par type et par saison

Pour mettre en place cette analyse sur tous les pièges, espèces et dates avec effet aléatoire nous avons dans un premier temps évalué les intervalles de temps entre chaque espèce. Pour les 55269 photos nous avons obtenu 341 intervalles que nous avons réparti par type selon les espèces mises en jeu et par saison. Nous obtenons ainsi les résultats suivants :

Type d'intervalles		Lynx- Chamois (LC)	Chamois- Lynx (CL)	Lynx- Chevreuil (LV)	Chevreuil- Lynx (VL)
Nombre d' l'intervalles	Période hivernale (octobre-janvier)	24	23	5	8
Nombre d'intervalles	Période printanière (février – mai)	38	38	28	26
	Période estivale (juin-septembre)	48	44	20	27
	Toutes périodes confondues	110	105	53	61

Tableau 1: Nombre d'intervalles calculés par type d'intervalles et par saison

Ce tableau nous permet, dans un premier temps, d’observer une prédominance générale des intervalles mettant en jeu le chamois. Ceci est dû, principalement, à une capture plus importante de chamois que de chevreuils au cours de notre étude.

On observe, de plus, une répartition plutôt homogène au cours de l’année des intervalles impliquant le lynx et le chamois sur notre période d’étude. Les intervalles impliquant le lynx et le chevreuil dont nous disposons semblent, quant à eux, être majoritairement répartis sur les période printanière et estivale.

3.2 Estimations par le modèle

Nous avons, après test de plusieurs modèles par une ANOVA choisi un modèle mixte prenant en compte la variable saisonnalité comme une variable explicative à part entière. Nous avons ainsi pu observer les interactions possibles entre la variable saison et le type d’intervalle. Après mise en place du modèle, nous obtenons une estimation des temps d’intervalle moyens entre le passage des deux espèces pour chacun des couples étudiés.

Type d’intervalles		Lynx- Chamois (LC)	Chamois- Lynx (CL)	Lynx- Chevreuil (LV)	Chevreuil- Lynx (VL)
Nombre d’ l’intervalles Durée moyenne des intervalles (jours)	Période hivernale (octobre-janvier)	17.34	12.14	51.83	38.92
	Période printanière (février – mai)	15.53	12.15	12.46	5.27
	Période estivale (juin-septembre)	12.86	10.93	13.63	14.12
	Toutes périodes confondues	15.24	11.74	25.97	19.43

Tableau 2: Durée moyenne des intervalles (jours) par type d'intervalles et par saisons

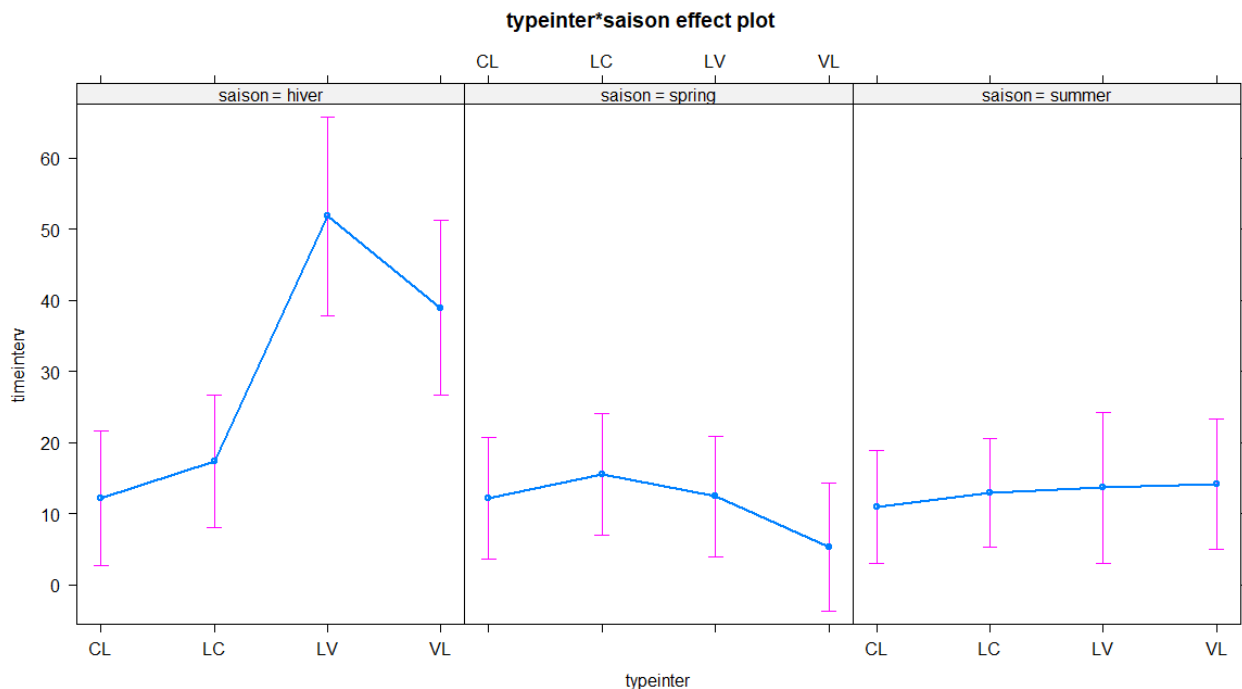


Figure 7: Evolution des intervalles de temps en fonction des types d'intervalles au cours de l'année

3.2.1 Description et interprétation des résultats

Afin d'évaluer la présence d'un potentiel évitement entre ongulé et lynx, on réalise les différences entre intervalles lynx-ongulés et ongulés-lynx. Sur l'année, on observe des tendances similaires pour les deux ongulés. En effet, dans les deux cas, les différences de temps d'intervalles moyens sont positives et donc en faveur d'un potentiel évitement. Avec une différence moyenne de 3.50132 jours entre les intervalles lynx-chamois et chamois-lynx, cet évitement potentiel semble moins marqué qu'entre chevreuil et lynx (6.53942 jours). Ainsi, du fait notamment des intervalles de confiance, on peut voir que le chamois répond faiblement à la pression du lynx. L'évitement potentiel est quant à lui plus marqué dans le cas du chevreuil.

On peut cependant évaluer plus finement nos résultats en observant les estimations par saisons. En effet, on relève de réelles différences, comme prédit dans nos hypothèses, entre les périodes de l'année. Ainsi, une certaine stabilité au cours de l'année se dessine pour les intervalles mettant en jeu le chamois et le lynx. Malgré une au fur et à mesure que la saison

estivale approche, ceux-ci restent plutôt similaires et relativement faible. Ceci serait ainsi synonyme de stabilité dans la course spatiale, tout de même dominée par le lynx avec un faible évitement de la part des proies.

Au contraire, la saison semble nettement influencer les intervalles de temps mettant en jeu le chevreuil. En effet, la saison hivernale se démarque nettement. Les intervalles de temps, quel que soit l'ordre d'apparition des deux espèces, sont en moyenne bien plus élevés que pour les deux autres périodes. Ainsi, ces résultats laissent penser à une rencontre plus rare entre le lynx et cet ongulé durant la période hivernale. A partir du printemps, les chiffres diminuent très nettement et suggèrent, quant à eux, une rencontre globalement beaucoup plus importante entre lynx et chevreuil. Les différences sont ainsi faibles et associées à des temps d'intervalles courts durant cette période. Cependant, l'évitement potentiel entre le lynx et sa proie, mis en évidence par la différence entre les intervalles lynx-chevreuil et chevreuil-lynx, semble présent tout au long de l'année. Ceci suggérerait un impact comportemental et démographique du lynx sur ce type de proies.

3.2.2 Réponse aux hypothèses

Nous avons pu observer un effet, à la fois de la période de l'année et de la proie étudiée, confirmant nos deux hypothèses faites en ce sens. De plus, un comportement d'évitement spatio-temporel est observé pour les deux espèces de proies comme nous le supposions. Cette évitement, en tenant compte des intervalles de confiance, reste cependant faible notamment dans le cas du chamois.

Bien que plus vulnérable durant la saison hivernale, le chevreuil ne semble pas être plus prédaté par le lynx durant cette période. En effet, les intervalles de temps quel que soit l'ordre d'apparition de chacune des espèces semblent au contraire bien plus longs. L'hypothèse qui avait été formulée dans ce sens ne peut donc pas être validée. Notre dernière hypothèse mettait en évidence la descente des chamois dans les vallées en hiver et donc une potentielle diversification du régime alimentaire du lynx durant cette période. Bien que notre étude ne puisse confirmer totalement cette hypothèse, celle-ci reste plausible au regard des résultats obtenus.

IV- Discussion

Notre étude, ayant pour objectif d'identifier les interactions possibles entre le lynx boréal et ses proies principales, le chevreuil et le chamois, a permis de soulever de nombreux points. Au regard des hypothèses que nous avons posé, plusieurs résultats ont été mis en évidence. En effet, nous supposons l'existence d'un évitement spatio-temporel des proies face au prédateur. Les résultats que nous avons obtenus ont, en ce sens, mis en évidence un comportement d'évitement potentiel pour chacune des deux espèces d'ongulés étudiées. Cet évitement reste cependant assez faible. Il semblerait donc que le lynx exerce une certaine pression sur ses proies, mais que celles-ci maintiennent une avancée dans la course spatiale via cet évitement. En revanche, comme nous le supposons également, l'ampleur de ce phénomène semble différer selon l'espèce mais aussi suivant la période de l'année. En effet, on observe, pour notre jeu de données, un évitement potentiel plus marqué dans le cas du chevreuil que dans celui du chamois. De plus, notre étude a permis de mettre en évidence l'impact de la saisonnalité sur ces interactions. Ainsi dans le cas du chevreuil, les rencontres entre la proie et le prédateur sont, pour notre jeu de données, plus faibles durant la période hivernale. Ceci pourrait notamment s'expliquer par un comportement de changement de proies du félin en fonction des saisons.

L'étude des interactions trophiques prédateur-proies en lien avec les dimensions spatiales et temporelles est d'un intérêt fondamental en écologie. De ce fait, plusieurs études, en lien avec ce sujet, ont été menées.

Les méthodes développées pour l'étude empirique des interactions écologiques sont souvent considérées soit trop complexes soit trop vagues (Thurman et al., 2019). Une première famille de modèles, dits de distribution jointe d'espèces, consiste à établir des corrélations entre les données de présence-absence d'une espèce et celle d'une autre espèce avec qui elle interagit. Celle-ci tient, de plus, compte des effets de variables environnementales. Cependant, ces modèles supposent que l'ensemble des sites occupés par les espèces proies et prédateurs soit détecté. Il existe également des modèles multi-espèces dits d'occupation de sites qui tiennent compte du risque de ne pas échantillonner des indices de présence d'une espèce alors que celle-ci était présente. Ces modèles s'ajustent sur des séries temporelles de détection/non détection de plusieurs espèces au sein de sites. Ils permettent ainsi d'estimer la probabilité qu'un site soit occupé par la proie seulement, le prédateur seulement ou les deux individus.

Au regard de la littérature, notre approche apporte une réelle nouveauté autant pour l'étude des interactions trophiques en général que celle du lynx boréal en particulier.

Premièrement, l'utilisation de données issues de pièges photographique, protocole mis en place récemment, se révèle très intéressante et confère aux résultats obtenus une précision supplémentaire. L'étude de la faune sauvage et notamment des espèces difficilement observables comme le lynx est ainsi facilitée. Le protocole mis en place et plus particulièrement le découpage sous forme d'une grille d'échantillonnage permet de couvrir l'ensemble du territoire et apporte de la fiabilité aux résultats. De plus, la forme des données obtenues, datées et géo-référencées, a permis le calcul des intervalles de temps et ainsi l'obtention de résultats bien plus précis.

Un autre point concerne la durée de pose des pièges. Celle-ci a permis dans notre cas l'obtention d'un jeu de données incluant chacune des saisons, un réel avantage pour analyser la variation des interactions suivant différentes périodes. Ainsi, l'ajout de la variable « saison » au modèle est une particularité de notre approche et a permis de mettre en évidence de nouveaux résultats concernant les interactions entre le lynx et ses proies.

De plus, notre étude se distingue de certaines approches du fait de la multiplicité d'espèces et d'interactions considérées mais surtout du nombre de pièges photographiques utilisés. Certaines méthodes, comme celle développée par Niedballa et al., permettaient d'étudier les interactions trophiques pour un seul piège et un couple d'espèces. Nous avons donc généralisé cette approche à la multiplicité des pièges de notre jeu de données en incluant un effet aléatoire à notre modèle.

Concernant, en particulier, l'étude du lynx boréal en France, cette étude a également apporté une réelle plus-value. En effet, alors que les données récentes issues de pièges photographiques avaient déjà été utilisées pour l'identification individuelle des lynx par patron de pelage, aucune autre étude n'avait encore été menée. De plus, les approches multi-spécifiques pour l'étude et la conservation des espèces est une voie encore peu explorée et au fort potentiel. Les résultats obtenus sont donc une réelle avancée pour le PPP lynx et ouvrent de nouvelles perspectives.

Un certain nombre de limites à notre étude sont cependant à notifier. Dans un premier temps, on observe plusieurs limites liées à l'acquisition de données par piégeage photographique. En effet, cette méthode, bien que particulièrement intéressante pour l'étude de

la faune sauvage, et en particulier des félinés, peut être à l'origine de certains biais notamment dans le cas d'études multi-spécifiques comme la nôtre. En effet, la pose des appareils est modulée dans l'objectif de capturer un animal précis, dans notre cas le lynx. Ainsi, les chemins larges et de randonnées, lieu de passage du félin mais aussi des hommes, sont privilégiés. Le lieu de pose des appareils peut, dans ce cas, favoriser la capture d'une ou de plusieurs espèces en dépit de certaines. Les ongulés sauvages privilégient dans leurs déplacements, les couverts forestiers ou les milieux prairiaux. Le nombre de capture de ces animaux par les pièges sera ainsi probablement moins révélateur de l'état de ces populations. Ainsi la probabilité de rencontre entre ces deux espèces s'en trouve certainement diminuée.

L'approche mise en place dans le cadre de l'analyse de données présente également certaines limites. En effet, les résultats, basés sur des comparaisons d'intervalles de temps, ne peuvent à eux seuls permettre de confirmer la présence d'un évitement ou non mais seulement le supposer. En effet, d'autres phénomènes entrent en jeu et peuvent augmenter ou diminuer ces intervalles. On peut par exemple citer des changements de comportements alimentaires ou d'accessibilité aux proies selon les saisons. De plus, la durée des intervalles moyens obtenues pour chaque type étant de plusieurs jours, certains comportements ne correspondent pas forcément à de l'évitement.

Enfin, on peut citer le faible nombre d'intervalles pour certaines catégories diminuant la fiabilité des résultats. Ainsi, nous ne disposons que de 5 intervalles lynx-chevreuil et 8 intervalles chevreuil-lynx pour la période hivernale qui mettait en évidence un évitement potentiel plus prégnant et une augmentation des intervalles.

Notre étude laisse donc entrevoir de nombreuses perspectives mais les analyses nécessitent d'être complétées et liées à d'autres études pour obtenir de meilleurs résultats et affiner les conclusions.

Une première perspective pourrait être l'augmentation de la taille du jeu de données afin d'obtenir un plus grand nombre d'intervalles par période et type d'intervalles et ainsi améliorer la significativité des résultats. De plus, étudier plusieurs années permettrait d'éviter la présence d'une année « exceptionnelle » et donc une meilleure précision des résultats.

Afin d'augmenter la taille du jeu de données d'autres sites comme celui de l'Ain peuvent être ajoutés à l'analyse. En effet, la durée de ce stage ne l'a ici pas permis malgré la présence d'un jeu de données conséquent.

De plus, pour améliorer l'efficacité du traitement des données (étiquetage des espèces) et donc permettre l'augmentation de leur disponibilité, de nouvelles méthodes sont plus que

prometteuses. Ainsi, des algorithmes, basés sur des méthodes de deep learning, se développent de manière exponentielle. Ceux-ci pourraient permettre de traiter très rapidement de grand jeux de données. Ils doivent cependant au préalable être adaptés aux données traitées, en terme de qualité d'images et d'espèces à identifier. Pour obtenir une identification rapide et précise à l'aide d'algorithmes, un entraînement sur de nombreuses photos similaires à celles du jeu de données est nécessaire. De ce fait, ceci pourrait être envisagé dans l'avenir en utilisant des données déjà traitées comme entraînement.

Conclusion

Pour conclure, on note que notre étude a permis d'enrichir la connaissance au sujet des interactions entre le lynx boréal et ses proies notamment en France. Notre approche (Cf. Schéma général de la démarche suivie) a ainsi permis d'apporter une première réponse à une grande partie des hypothèses posées. Elle présente, de plus, de réelles nouveautés, de par le type de modèle utilisé et de part les directions prises, au regard des études déjà menées sur des sujets similaires. Elle ouvre ainsi de nombreuses perspectives pour le Programme Prédateur Proies Lynx.

L'étude des interactions entre le lynx et ses proies a permis de mettre en évidence à la fois un effet de l'espèce et un effet de la saison. Ainsi, on observe pour les deux proies un comportement d'évitement potentiel. Celui-ci est cependant bien moins marqué dans le cas du chamois. Un effet de la saison est lui aussi mis en évidence. La saison hivernale est notamment particulière pour le chevreuil avec une rencontre bien plus faible entre le prédateur et la proie bien que l'ongulé soit plus vulnérable dans les milieux neigeux. On peut rapprocher ce résultat de la descente de femelles chamois dans les plaines en hiver et d'un éventuel changement de proies du félin. Cependant, poursuivre cette étude sur un plus grand jeu de données et y ajouter d'autres tests semble nécessaire pour confirmer ou non cette interprétation.

En effet, il est important de notifier que cette étude présente des limites et a besoin d'être poursuivie pour affiner les conclusions faites. Ainsi, étudier ces interactions sur un jeu de données plus important permettrait l'obtention de résultats statistiquement plus significatifs. De plus, reconduire cette étude pour plusieurs sites pilotes et plusieurs années d'acquisition augmenterait la fiabilité des résultats et permettrait une meilleure interprétation de ces derniers. La prise en compte d'autres facteurs par l'ajout de variables ou par des tests complémentaires permettrait également d'affiner cette interprétation.

Bibliographie

- BLANC, L., 2015. Dynamique des populations d'espèces rares et élusives : le lynx boréal en Europe.
- BLANC, L., MARBOUTIN, E., GATTI, S. and GIMENEZ, O., 2013. Abundance of rare and elusive species: empirical investigation of closed versus spatially explicit capture–recapture models with lynx as a case study. *The Journal of Wildlife Management*, 77(2), pp.372-378
- BREITENMOSER, U. et HALLER, H., 1993. Patterns of predation by reintroduced European lynx in the Swiss Alps. *Journal of Wildlife Management* 57: 135-144.
- BREITENMOSER, U., 2000. Action plan for the conservation of the Eurasian lynx in Europe (Lynx lynx) (No. 18-112). Council of Europe.
- BREITENMOSER-WURSTEN, C., VANDEL, J.M., ZIMMERMAN, F. and BREITENMOSER, U., 2007. Demography of lynx Lynx lynx in the Jura Mountains. *Wildlife Biology*, 13(4), pp.381-393.
- BURTON, A. C. et al., 2015. Wildlife camera trapping: a review and recommendation for linking surveys to ecological processes. *Journal of Applied Ecology*. Vol. 52, pp. 675-685. DOI: 10.1111/1365-2664.12432
- CARAVAGGI, A. et al., 2017. A review of camera trapping for conservation behaviour research. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. Pp. 109-122. DOI: 10.1002/rse2.48.
- CARROLL, G., et al., 2019. A review of methods for quantifying spatial predator–prey overlap. *Global Ecology and Biogeography*.
- CENCI, S. and SAAVEDRA, S., 2018. Uncertainty quantification of the effects of biotic interactions on community dynamics from nonlinear time-series data. *Journal of The Royal Society Interface*, 15(147), p.20180695.
- CUSACK, J. et al., 2015. Random versus Game Trail-Based Camera Trap Placement Strategy for Monitoring Terrestrial Mammal Communities. *Plos one*. DOI: 10.1371/journal.pone.0126373.

- DEHARTE, A., 2018. Bilan démographique et cartographie des lynx boréal, *Lynx lynx*, présents sur les sites pilotes de l'Ain et du Jura par piégeage photographique.
- FEDERATION DEPARTEMENTALE DES CHASSEURS DU JURA, 2019. Programme Prédateur Proies Lynx. <https://www.chasseurdujura.com>.
- FERUS, Ours-Loup-Lynx conservation, 2019. Le lynx en France.
- HARRISSON, X. et al., 2018. A brief introduction to mixed effects modelling and multi-model inference in ecology. *PeerJ*. DOI 10.7717/peerj.4794.
- HERRENSCHMIDT, T. et LEGER, F., 1987. Le Lynx dans le Nord-Est de la France. La colonisation du Massif jurassien français et la réintroduction de l'espèce dans le Massif vosgien. Premiers résultats. *Ciconia*, II (2) : 131-151.
- KARANTH, K.U., 1995. Estimating tiger *Panthera tigris* populations from camera-trap data using capture—recapture models. *Biological conservation*, 71(3), pp.333-338.
- KLEIN F., ROCQUENCOURT A. et BALLON P., 2008. Pour un meilleur équilibre sylvo-cynégétique, des pratiques favorables aux cervidés. *ONCFS*. 54 pages.
- LINNELL, J.D. et al., 2009. Recovery of Eurasian lynx in Europe: what part has reintroduction played. *Reintroduction of top-order predators*, pp.72-91.
- UICN France, MNHN, SFEPM & ONCFS (2009). La Liste rouge des espèces menacées en France - Chapitre Mammifères de France métropolitaine. Paris, France. ISBN : 978-2-918105-02-2. Dépôt légal : Août 2009. Imprimé par CARACTERE sur papier PEFC/10-31-945. Conception & création : TRAIT DE CA
- JOST, J.P. et JOST-TSE, Y.C., 2012. Le lynx, chasseur discret et solitaire. Regard et connaissance. *Cabedita*. 146p.
- KEIM, J.L. et al., 2019. Estimating the intensity of use by interacting predators and prey using camera traps. *Journal of Animal Ecology*. Pp.1-12. DOI: 10.1111/1365-2656.12960.
- KOLOWSKI, J. et FORRESTER, T., 2017. Camera trap placement and the potential for bias due to trails and other features. *Plos one*. 12(10): e0186679.
- MARK ELBROCH, L. et al., 2018. Multiple anthropogenic interventions drive puma survival following wolf recovery in the Greater Yellowstone Ecosystem. *Ecology and Evolution*.

- NIEBALLA, J. et al., 2019. Assessing analytical methods for detecting spatiotemporal interactions between species from camera trapping data. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. DOI: 10.1002/rse2.107.
- ODEN J. et al., 2006. Diet of Eurasian lynx, *Lynx lynx*, in the boreal forest of southeastern Norway: the relative importance of livestock and hares at low roe deer density. *Eur J Wildl Res* 52: 237–244.
- ONCFS, Equipe d’animation du réseau Loup-Lynx. 2018. Bilan national de l’évolution de l’aire de présence détectée du lynx en 2017. *Bulletin d’information du réseau lynx*.
- ONCFS, FDC du Jura, FDC de l’Ain, FDC de la haute savoie, CNRS, KORA, FNC, 2018. Rapport d’activité 2018 : Programme Prédateur Proie Lynx dans le massif du Jura : Influence de la chasse et de la prédation par le lynx sur les populations de chevreuils et de chamois et sur l’équilibre ongulés-environnement.
- STAHL P. & VANDEL J.-M. 1998. Le Lynx boréal (*Lynx lynx* Linné 1758). Société française d’Etude et de Protection des Mammifères (SFEPM). *Encyclopédie des carnivores de France*, n°19. 65p.
- THURMAN, L. et al., 2019. Testing the link between species interactions and co-occurrence in a trophic network. doi: [10.1111/ecog.04360]
- UNTERTHINER, S. et al, 2012. Sexual and seasonal differences of space use in Alpine chamois. *Ethology, Ecology & Evolution* 24: 257–274.
- WECKEL, M. et al., 2005. Jaguar (*Panthera onca*) feeding ecology: distribution of predator and prey through time and space. *Journal of Zoologie*. DOI:10.1111/j.1469-7998.2006.00106.x.
- WWF France, 2019. Le Lynx Boréal, félin rare et méconnu de nos forêts. <https://www.wwf.fr>.

Table des annexes

ANNEXE 1 : Réflexion personnelle sur les métiers de la recherche.

ANNEXE 2 : Régime alimentaire du lynx, évalué à partir de contenu stomacaux.

ANNEXE 3 : Exemple de photographies acquises par piégeage photographique au sein de l'aire d'étude du Jura.

ANNEXE 4 : Traitement des données issues de pièges photographiques à l'aide du logiciel DIGIKAM

ANNEXE 1 : REFLEXION PERSONNELLE SUR LES METIERS DE LA RECHERCHE

Ce stage a été, pour moi, particulièrement riche en découvertes et notamment des métiers de la recherche qui m'étaient encore peu connus. Cette période fut une superbe expérience et un réel plaisir. Travailler au sein de cette équipe sur un sujet passionnant fut, en effet, très épanouissant et riche en apprentissages.

J'ai, au cours de ce stage, pu moduler mon sujet en fonction de mes goûts personnels mais aussi et surtout des besoins concrets du terrain, en lien avec mes maîtres de stage. J'ai ainsi pu appréhender le lien étroit entre la recherche et les acteurs de terrains, aussi bien par l'acquisition de données en amont que par l'utilisation des résultats obtenus en aval. Sentir mon travail utile à l'amélioration de la gestion et de la conservation du lynx et des ongulés sauvages sur le terrain a été une vraie satisfaction pour moi.

J'ai, durant ce stage, dû travailler en autonomie et prendre des initiatives tout en étant, conseillée et soutenue par mes maîtres de stage mais aussi par l'équipe de recherche dont je faisais partie. J'ai ainsi découvert qu'un chercheur ne travaillait pas seul mais au sein d'une équipe et s'appuyait constamment sur les travaux de ses confrères pour alimenter ses études.

J'ai aussi découvert un métier où l'on doit constamment se remettre en question et ne pas hésiter à changer de pistes pour résoudre un problème. C'est un métier, il me semble, où il convient de rester transparents sur ses choix d'analyse et sur les directions prises mais aussi rester humble et apporter un regard critique sur les résultats obtenus. En effet, chaque approche a ses limites et imperfections. En tant que perfectionniste, réaliser cela a été parfois un peu frustrant et inconfortable pour moi.

J'ai adoré découvrir ce métier et échanger avec des scientifiques passionnés. J'ai énormément appris et me suis formée dans plusieurs domaines et notamment en programmation sur le logiciel RStudio.

Pour le moment, je ne pense cependant pas me tourner vers le monde de la recherche, plus attirée par les métiers en lien plus direct avec les acteurs de terrain.

ANNEXE 2 : REGIME ALIMENTAIRE DU LYNX

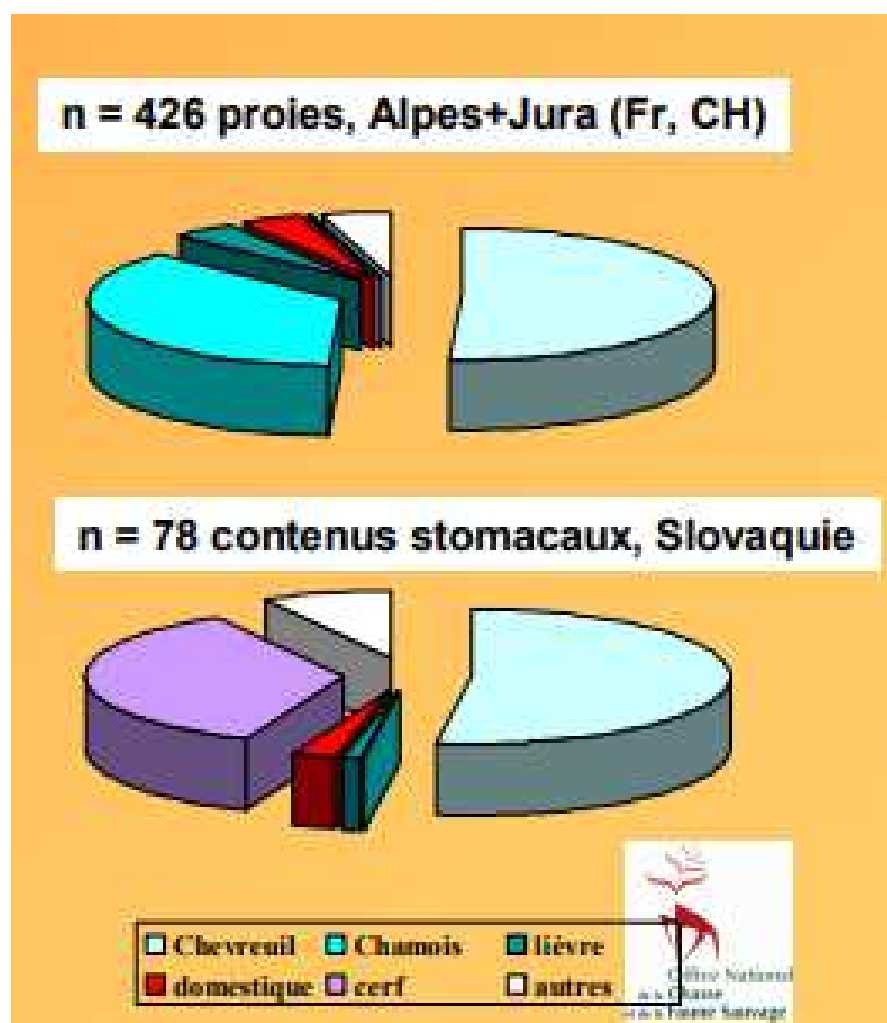


Figure 8: Représentation graphique du régime alimentaire du lynx par étude de contenus stomacaux (Source : ONCFS, 2017)

ANNEXE 3 : EXEMPLE DE PHOTOGRAPHIES ISSUES DES PIEGES
PHOTOGRAPHIQUES



Figure 9: Photographies de lynx prise par un piège photo au sein de l'aire d'étude du Jura



Figure 10: Photographie d'un chevreuil prise par un piège photographique au sein de l'aire d'étude du Jura



Figure 11: Photographie d'un chamois prise par un piège photographique au sein de l'aire d'étude du Jura

Figure 12: Photographie d'un chamois prise par un piège photographique au sein de l'aire d'étude du Jura

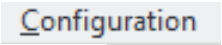
ANNEXE 4 : TRAITEMENT DE DONNEES ISSUES DE PIEGES PHOTOGRAPHIQUES A L'AIDE DU LOGICIEL DIGIKAM

Pour certaines analyses de données issues de pièges photographique, l'identification des espèces présentes peut se révéler nécessaire. Dans ce cas, celle-ci peut être réalisée à l'aide d'algorithmes grâce à des méthodes de deep learning ou directement à la main. Le nom de ou des espèces observées, pour être utilisable par n'importe quel logiciel d'analyse, doit figurer dans les métadonnées de chacune des photos (données EXIF et IPTC) sous forme d'un mot clé par exemple. Dans notre cas, les photos ont été annotées à la main grâce au logiciel **Digikam** qui présente l'avantage :

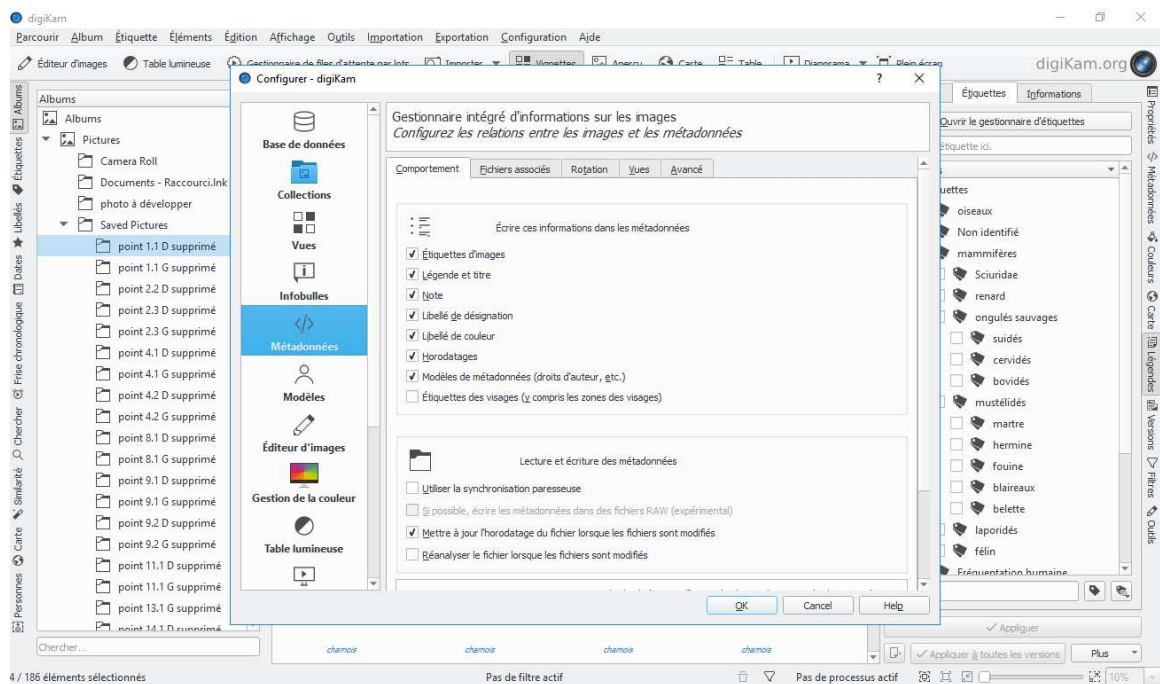
- D'ajouter le mot clé directement dans les métadonnées des photos
- D'être gratuit
- De permettre d'optimiser l'identification par sélection de plusieurs images
- De présenter une interface claire et facile d'utilisation

1. Téléchargement et installation

Digikam peut être téléchargé gratuitement sur de nombreux sites. Une fois installé, il nécessite d'être paramétré. En effet, juste après installation, plusieurs questions sont posées à l'utilisateur. Une de ces questions concerne l'inscription des modifications dans les métadonnées et non uniquement dans le logiciel. **Il est important de paramétrer le logiciel afin que le mot clé soit inscrit dans les métadonnées et ainsi toujours identifiable sur un autre logiciel ou ordinateur.**

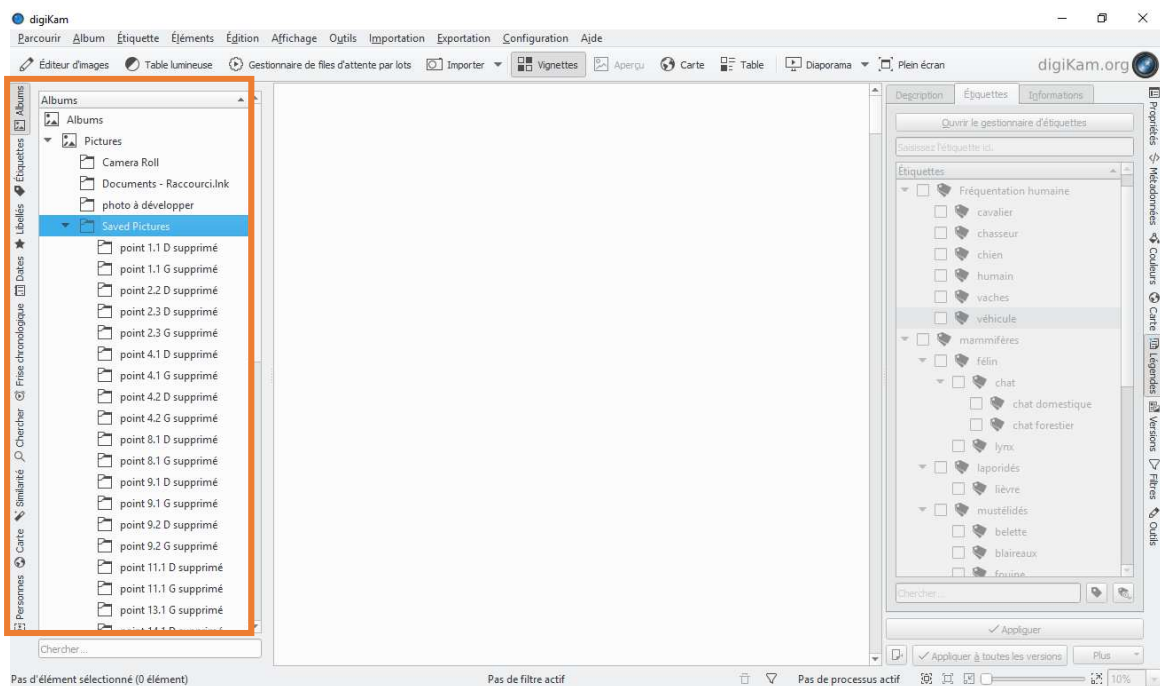
Pour vérifier l'activation de ce paramètre, et l'activer si nécessaire, il suffit de cliquer sur l'onglet  en haut de l'écran. On sélectionne ensuite  **Configurer digiKam...** puis  **Métadonnées**

Il suffit ensuite de sélectionner les différents paramètres (dont « légendes et titres » et « étiquettes d'image »).

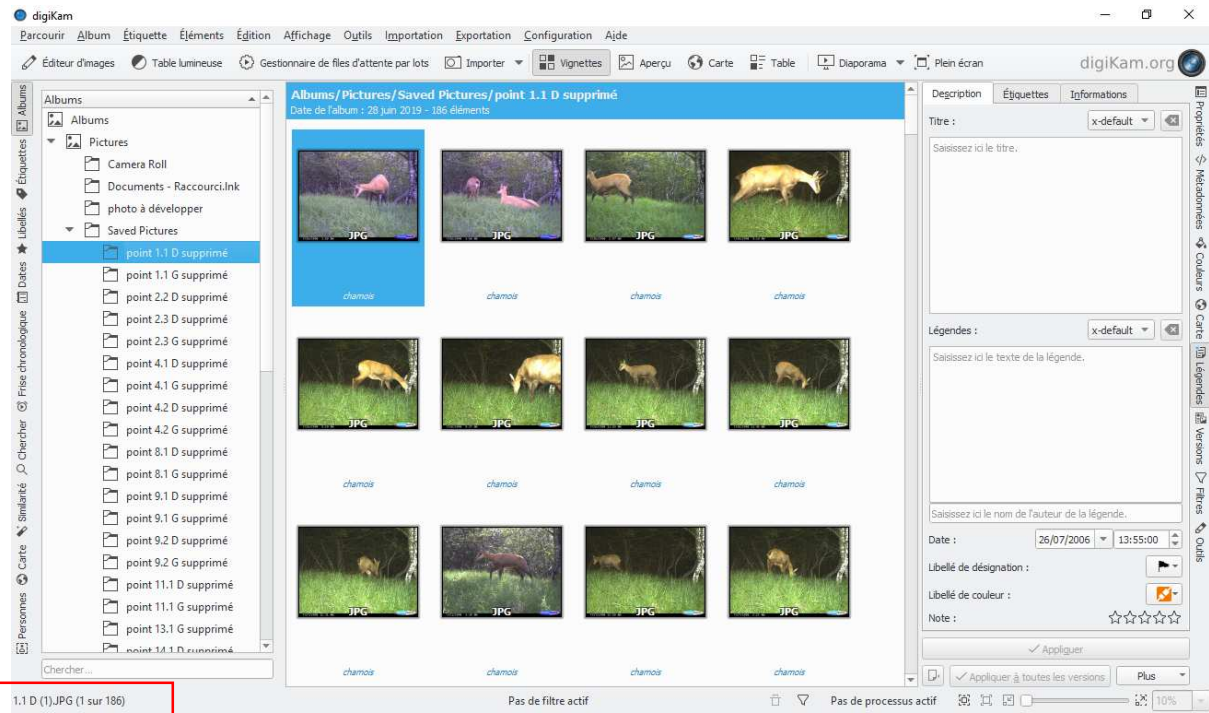


2. Importation des photos

Pour être utilisé sur le logiciel Digikam, les photos doivent être –généralement- importées dans un dossier sur l'ordinateur. Elles apparaissent alors automatiquement sur le logiciel dans la rubrique « Albums ». Le jeu de données étant souvent très lourd, il est conseillé d'importer celui-ci par parties (par piège photo par exemple) et de le stocker sur disque dur une fois modifié.

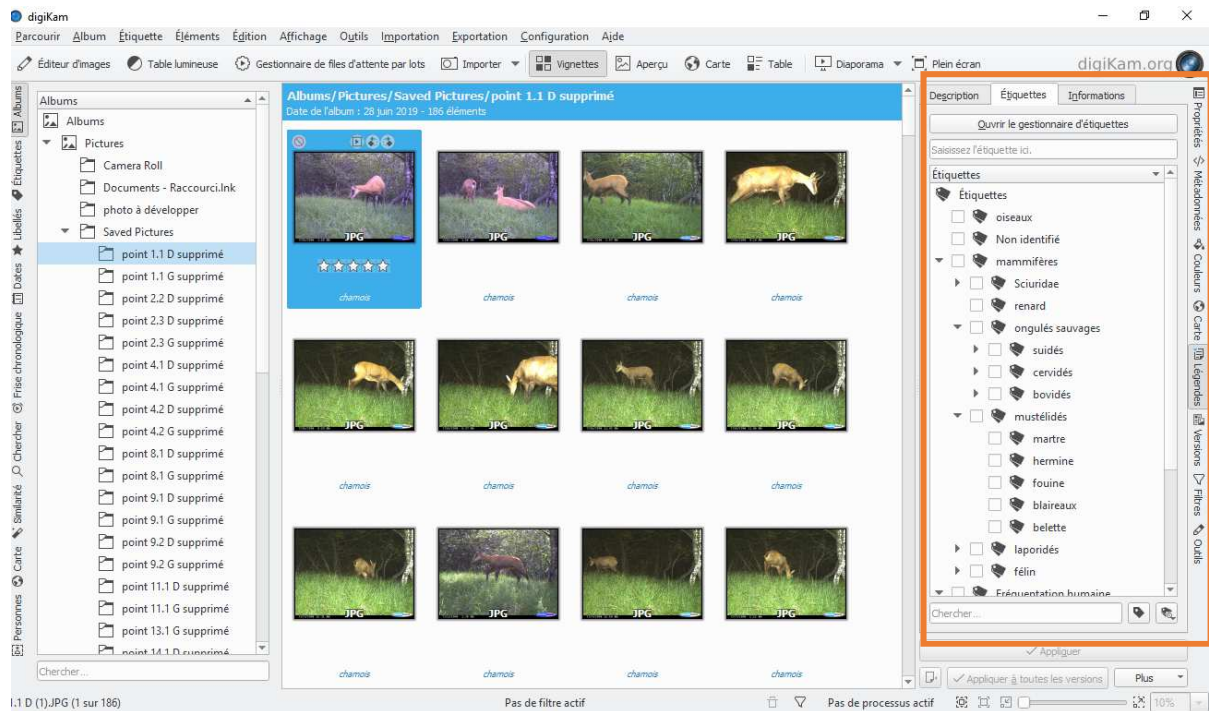


Une fois tout ceci importé, il suffit de double-cliquer sur l'un des albums désirés pour voir apparaître l'ensemble des photos contenues dans celui-ci. Si l'album contient de nombreuses photos, il faudra attendre que l'ensemble des photos soit importé dans le logiciel avant de démarrer (visible en bas à gauche de l'interface).



3. Création d'étiquettes

On crée ensuite des étiquettes qui correspondent aux mots clés désirés. Elles permettront un taguage plus rapide par la suite. Pour cela, on sélectionne l'onglet **Légendes** puis **Étiquettes** à droite de l'écran. Pour créer une nouvelle étiquette, il suffit de faire un clic-droit puis **Nouvelle étiquette...** ou de sélectionner **Ouvrir le gestionnaire d'étiquettes** puis **+**. Si on clique droit sur une étiquette déjà formée, la nouvelle étiquette sera une sous-étiquette de la première, permettant de créer une arborescence. Il n'est cependant pas conseillé de multiplier les étiquettes par photo pour faciliter l'analyse.



4. Étiquetage

Une fois les étiquettes créées, on peut passer à l'étiquetage. Pour cela il suffit de cliquer sur la photo désirée puis de sélectionner la bonne étiquette. Le mot clé apparaîtra automatiquement après un clic sur une autre photo.

Plusieurs étiquettes peuvent être appliquées par photo. En fonction du nombre d'espèces présentes.

De plus, plusieurs photos peuvent être sélectionnées pour un même tag, ceci améliorant fortement la rapidité de l'étiquetage.

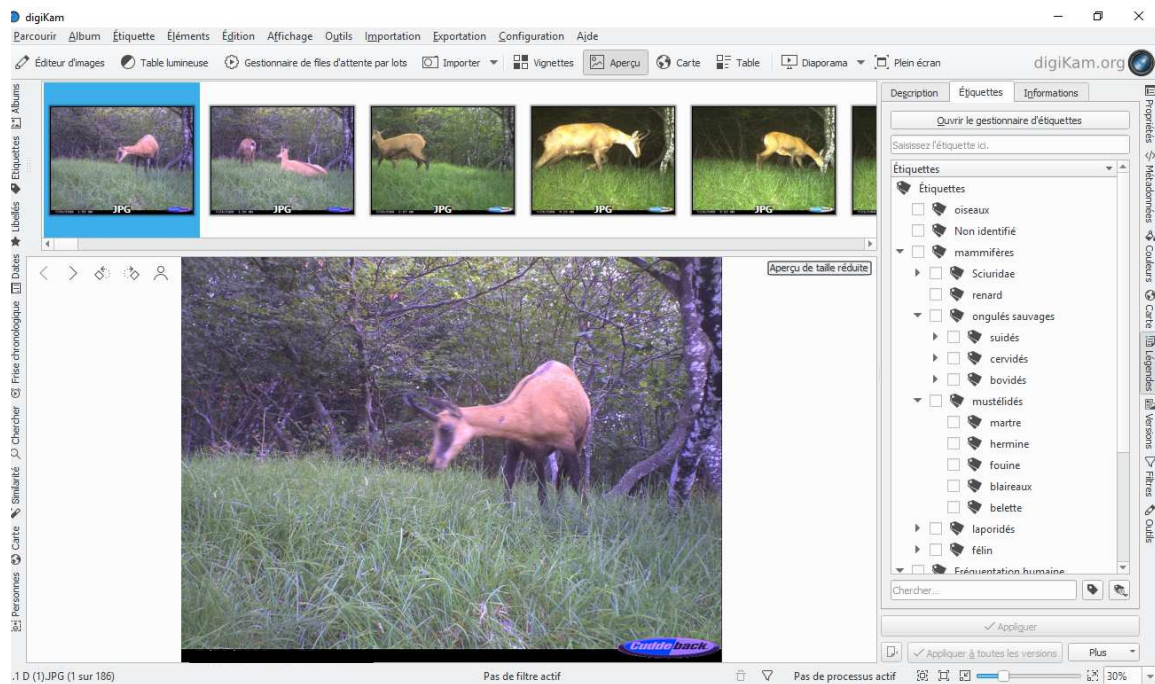
- **Si les photos à sélectionner ensemble sont côte à côte :**

La sélection peut être effectuée en cliquant sur la première photo puis sur la dernière photo tout en maintenant la touche shift gauche enfoncée.

- **Si les photos à sélectionner ne sont pas côte à côte :**

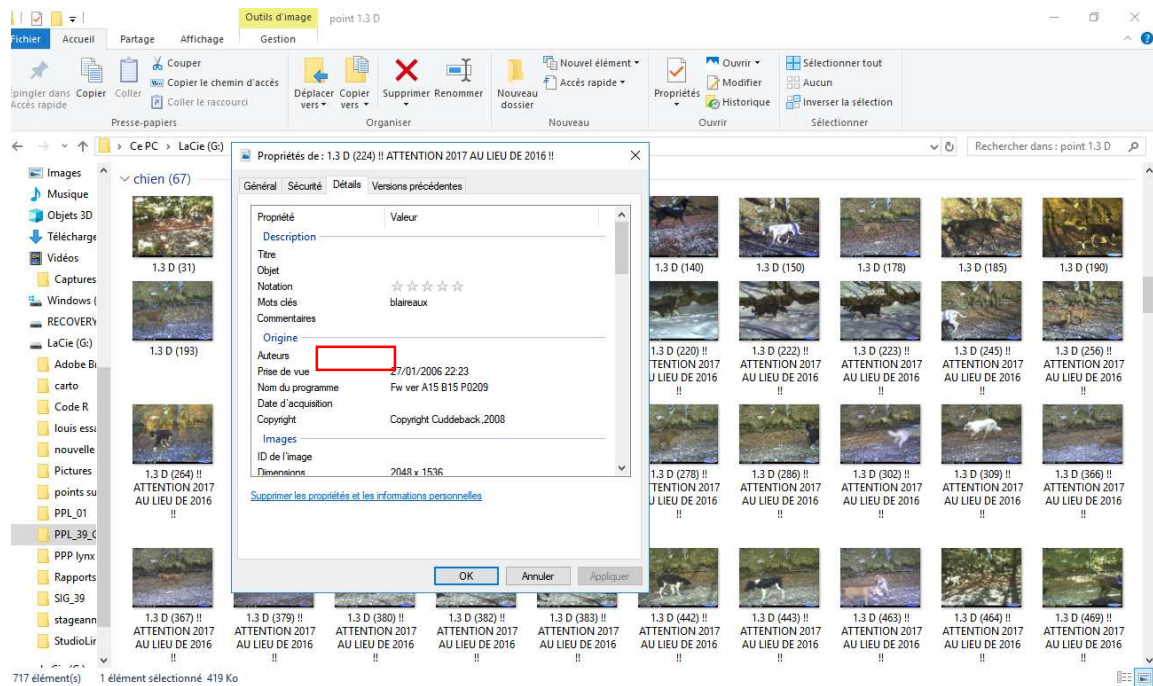
Il suffit de cliquer sur la première photo puis de maintenir la touche ctrl enfoncée tout en sélectionnant les autres photos.

Pour agrandir les photos et permettre une meilleure identification de certaines espèces, l'utilisateur peut double-cliquer sur la photo désirée, l'étiquetage peut se poursuivre de cette façon si nécessaire.



5. Vérifier que les mots clés apparaissent bien dans les métadonnées des photos

Il est important de vérifier que les mots clés aient été exportés dans les métadonnées afin de permettre l'utilisation des photos dans un autre logiciel et sur un autre ordinateur. Pour cela, il suffit d'ouvrir la photo hors du logiciel. Sous Windows, cela peut être l'explorateur de fichier. En effectuant un clic-droit sur la photo et en ouvrant les propriétés de cette dernière, le mot clé tagué doit apparaître. Sur l'explorateur de fichiers Windows, celui-ci apparaît en sélectionnant « propriétés » puis « détails ». Si ce n'est pas le cas, le logiciel digikam n'a sûrement pas été bien paramétré pour permettre l'inscription du tag dans les métadonnées des photos (cf. étape 1).



En vous souhaitant une bonne utilisation.

