



MODELISATION MULTI-AGENTS DES INTERACTIONS ENTRE AGROPASTORALISME ET RAPACES NECROPHAGES

MULTI AGENT MODELING OF INTERACTIONS BETWEEN LIVESTOCK FARMING AND SCAVENGERS

Programme DIVA 2
Rapport de fin de contrat

Coordination
CERSP UMR 7204 MNHN-CNRS-UPMC
François Sarrazin
Pr UPMC
61 rue Buffon
75005 Paris
sarrazin@mnhn.fr

Date : Décembre 2010

N° de contrat : 070036
Date du contrat : 27/11/2007

TABLE DES MATIERES

Remarques concernant ce document	Erreur ! Signet non défini.
Synthèse « Huit pages »	3
Résumés	5
Rapport scientifique	7
Annexe : Publications.....	29
Annexe : partie confidentielle	Erreur ! Signet non défini.

SYNTHESE « HUIT PAGES »

(destinée aux utilisateurs et gestionnaires publics)

(Document « huit pages » pour diffusion large auprès des acteurs et utilisateurs potentiels)

Merci de rédiger l'ensemble de cette partie de manière à ce qu'elle soit aisément compréhensible par un utilisateur non spécialiste.

MODELISATION MULTI-AGENTS DES INTERACTIONS ENTRE AGROPASTORALISME ET RAPACES NECROPHAGES

DIVA 2

Coordination : François Sarrazin

Partenaires : Sophie Bobbé

Carmen Bessa Gomes

Florence Burronfosse Roque

En français

- Un titre court et explicite.
- Un paragraphe d'introduction : objectifs, question centrale du projet et éléments de contexte en rapport avec cette question.
- Quelques éléments de méthodes (succinct).
- Présentation des principaux résultats (l'essentiel).
- Un paragraphe de conclusion : principales leçons à retenir, perspectives, intérêt de ces résultats pour les acteurs du développement régional.
- 4 références bibliographiques de l'équipe pour approfondir la compréhension des résultats.

RESUMES

- Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et nécrophage

- Responsables scientifiques

François Sarrazin, Professeur UPMC, UMR 7204, MNHN-CNRS-UPMC. CERSP 1 rue Buffon, 75005 Paris. sarrazin@mnhn.fr, 01 40 79 57 61

- Organismes scientifiques et personnes ayant participé au projet

CNRS, délégations paris ile de France Est, et Paris B ; INRA, CNITV

Carmen Bessa Gomes, MC AgroParisTech, Sophie Bobbé. CETSAN, Florence Buronfosse Roque
CNITV, Chloé Deygout Thèse ABIES, Helene Dupont, Thèse Frontière du Vivant

- Collaborations professionnelles mises en œuvre avec les acteurs de la région
Ligue pour la Protection des Oiseaux, Antenne Causses, Parc National des Cévennes.

- Résumé :

Les relations entre agriculture et biodiversité sont complexes et rares sont les exemples de situations où des bénéfices réciproques peuvent être identifiés dans ces interactions. Lors du précédent programme Agriculture et Biodiversité, une étude pluridisciplinaire avait concerné le rôle des rapaces nécrophages dans la gestion de l'équarrissage. Un des enjeux de cette étude était d'analyser le fonctionnement de divers modes d'équarrissages faisant ou non appel aux vautours dans des zones où ces espèces faisant l'objet de mesures de conservation. La situation générée par la réintroduction du Vautour fauve dans les Grands Causses avait particulièrement été étudiée. Tous les éléments récoltés sur le fonctionnement des différents compartiments de ce système ont été formellement intégrés dans des modèles multi-agents pour mieux comprendre leurs interactions, et générer des scénarios de gestion permettant de mieux anticiper l'évolution de cet « équarrissage naturel ».

Deux types de modèles ont été particulièrement développés. D'une part la prospection alimentaire et l'exploitation des ressources par les vautours ont été formalisés à l'échelle de la journée pour mieux comprendre les conséquences de différentes stratégies comportementales en fonction de différents types de distribution spatiale et temporelle des ressources. D'autre part des modèles à long terme ont été développés pour comprendre l'impact de différentes pratiques d'équarrissage (équarrissage industriel, charniers lourd mis en œuvre par les gestionnaires, placette d'alimentation gérées par les éleveurs). Ces scénarios génériques ou plus locaux ont permis de mieux comprendre ce système et notamment le rôle de la distribution spatiale et temporelle des ressources sur les populations de vautours et sur l'efficacité du service écologique qu'ils fournissent aux éleveurs. Des indicateurs socio économiques et environnementaux ont permis de comparer les conséquences de ces scénarios.

- Mots clefs

Elevage, agropastoralisme, équarrissage, vautours, nécrophages, comportement, démographie; modélisation multi –agents,

- Références bibliographiques pour en savoir plus (4 références au maximum)

Bobbé S. 2009 - Du bon usage de l'animal sauvage. Exemple d'un mode d'équarrissage écologique, *L'animal sauvage entre nuisance et patrimoine, France, XVIe-XXIe siècle*, in Stéphane Frioux, Emilie-Anne Pépy (eds), Paris, Ecole Normale Supérieure: 22-31.

Deygout, C., Gault, A., Sarrazin, F., & Bessa-Gomes, C. 2009 - Modeling the impact of feeding stations on vulture scavenging service efficiency. *Ecological Modelling*. 220 : 1826-1835.

Deygout, C., Gault, A., Duriez, O., Sarrazin, F., & Bessa-Gomes, C. 2010 - Impact of food predictability on social facilitation by foraging scavengers. *Behavioral Ecology*. 21 : 1131-1139.

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

Dupont, H., Mihoub, J.B., Becu, N., & Sarrazin, F. (sous presse) Modelling interactions between scavenger behaviour and farming practices: Impacts on scavenger population and ecosystem service efficiency. *Ecological Modelling*.

In English

ABSTRACT

1 page

RAPPORT SCIENTIFIQUE

MODELISATION MULTI-AGENTS DES INTERACTIONS ENTRE AGROPASTORALISME ET RAPACES NECROPHAGES

DIVA 2

**Coordination : François Sarrazin
Partenaires : Sophie Bobbé
Carmen Bessa Gomes
Florence Burronfosse Roque**

• Objectifs du projet

Les relations entre agriculture et biodiversité sont complexes, et rares sont les exemples de situations où des bénéfiques réciproques peuvent être identifiés dans ces interactions (Perrings et al. 2006). Lors du précédent programme agriculture et biodiversité (DIVA 1), une étude pluridisciplinaire avait concerné le rôle des rapaces nécrophages dans la gestion de l'équarrissage. Les nécrophages fournissent en effet un des services écosystémique de régulation (MEA. 2005, Carpenter et al. 2009) les plus menacés du fait du déclin de ces espèces à l'échelle mondiale (Tella 2001, Şekerciöglu et al. 2004). Un des enjeux de cette étude était d'analyser le fonctionnement de divers modes d'équarrissages faisant ou non appel aux vautours dans des zones où ces espèces font l'objet de mesures de conservation. La situation générée par la réintroduction du vautour fauve (*Gyps fulvus*) dans les Grands Causses avait été particulièrement étudiée. Dans un contexte de fortes contraintes réglementaires, les principaux résultats avaient mis en évidence l'intérêt d'un système de placettes gérées directement par les éleveurs à l'échelle de leur exploitation. Ceci s'avérait être un facteur de lien entre éleveurs et vautours, tout en représentant une alternative économique à une gestion par l'équarrissage industriel. Les risques écotoxicologiques associés aux traitements des cheptels apparaissaient limités. Enfin, les études comportementales montraient que les vautours gardaient de bonnes capacités de prospection même dans un contexte où les ressources sont en partie prédictibles dans l'espace et le temps. Des analyses démographiques (estimations de paramètres et modélisation) permirent de montrer les potentialités de régulation de telles populations par ces ressources trophiques. Dans le même temps, l'évolution des réglementations nationales et européennes, liées notamment aux politiques d'éradication des maladies à prions, continuaient de faire planer des interrogations sur la durabilité de ce système original. Enfin, au delà du cas du vautour fauve, la restauration de populations de vautours moines dans les Grands Causses et les Alpes du sud et la conservation et le redressement des populations relictuelles de vautour percnoptère passaient au moins en partie par l'aménagement et l'utilisation de placettes d'alimentation.

Tous les éléments récoltés sur le fonctionnement des différents compartiments de ce système devaient donc être formellement intégrés pour 1) mieux comprendre leurs interactions, 2) générer des scénarios de gestion permettant de mieux anticiper l'évolution de cet « équarrissage naturel » et 3) fournir une aide à la décision pour favoriser sa résilience aux changements futurs des contextes socioéconomiques, réglementaires et écologiques associés à ces pratiques.

Dans ce but nous avons proposé un travail de modélisation s'appuyant sur la poursuite des investigations sur les motivations et décisions des acteurs impliqués et la formalisation des réponses des populations animales concernées, aux changements de ces pratiques. Cette approche pluridisciplinaire a donc visé, dans la continuité directe du programme précédent, la création et l'utilisation en gestion réelle d'un outil de simulation et d'aide à la décision, en l'occurrence un modèle multi-agents, formalisant les dynamiques possibles de ce système d'équarrissage par les rapaces nécrophages. Ceci a permis de mieux identifier et valoriser le service écologique fourni par les nécrophages, d'appréhender ses évolutions possibles, et de fournir des éléments pour la définition des politiques publiques d'équarrissage. Dans un souci d'efficacité nous avons structuré notre étude en deux types d'approches complémentaires.

La première approche, pluridisciplinaire, a consisté à approfondir nos réflexions dans les champs ethnologiques et écologiques. Un travail de terrain d'ordre ethnologique a principalement visé à recueillir des données permettant de mieux comprendre les représentations des acteurs impliqués dans la gestion de l'équarrissage susceptible de faire appel de manière directe ou indirecte aux vautours et d'actualiser les données collectées lors du précédent contrat de recherche (DIVA1). Cela devait nous permettre de saisir l'évolution des pratiques dans une perspective historique. Parallèlement, un travail de modélisation a permis d'explorer les conséquences potentielles de la gestion de sites d'alimentation sur l'efficacité de recherche alimentaire des vautours suivant différents scénarios comportementaux susceptibles d'exister chez ce type d'espèces. Pour information, une étude fine des comportements alimentaires des vautours a également été menée sur le terrain par suivi GPS mais ceci a été réalisé dans le cadre d'un programme ANR (SOFTPOP) et n'entre donc pas dans le cadre strict de ce programme DIVA2.

Dans une deuxième approche, interdisciplinaire, nous avons visé l'intégration de ces informations dans un modèle multi-agents (Ferber 1995) afin de simuler les interactions entre les

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

pratiques d'équarrissage et les dynamiques de populations de vautours et d'évaluer les évolutions possibles de ces interactions et leur durabilité. Cette durabilité dépend d'abord des pratiques d'équarrissage des éleveurs. Rappelons que deux systèmes assurent la disponibilité de ressources pour les vautours : la création d'une placette (officieuse et officielle) et l'alimentation de ladite placette ou le recours à la collecte organisée par les gestionnaires du territoire (*e.g.* Parc National des Cévennes, PNC) et associations (*e.g.* Ligue pour la Protection des Oiseaux, LPO). En revanche, l'intervention de l'équarrisseur industriel constitue un troisième système qui prive le vautour d'une éventuelle ressource alimentaire.

- **Présentation des méthodes et du dispositif de recherche.**

Approche pluridisciplinaire

Recueil des données de terrain ethnologiques

En 2008 et 2009, quatre missions dans les Grands Causses ont permis de réaliser une cinquantaine d'entretiens semi-directifs auprès d'éleveurs (des Causses Méjean, Noir, Larzac), des deux directions départementales des services vétérinaires (DDSV Lozère et Aveyron, devenues DDCSPP depuis le 1^{er} janvier 2010), d'élus locaux, de gestionnaires des espaces protégés (Parc national des Cévennes et Parc naturel régional des Grands Causses), et des 2 entreprises d'équarrissage qui ont la charge de collecter dans les Grands Causses, la LPO. Ces missions ont permis d'approfondir les données recueillies au cours des travaux de DIVA1, de repérer les évolutions quant aux pratiques d'équarrissage, d'examiner l'incidence de la nouvelle réglementation en matière de contrôle de carcasses par les DDSV.

Modélisation de l'efficacité du service écologique rendu par les vautours

Afin d'étudier l'impact de différentes stratégies de prospection et de différents types de gestion des ressources alimentaires sur le succès d'approvisionnement des vautours, un modèle générique individu-centré spatialement explicite a été construit. Celui-ci permet de simuler des individus (à savoir les vautours) en train de rechercher et d'exploiter des ressources alimentaires à l'échelle d'une journée. Le modèle est discret dans le temps et dans l'espace, autrement dit l'environnement est un ensemble de cellules carrées sur lesquelles les ressources sont disposées et les vautours se déplacent d'une cellule à l'autre. Il permet d'étudier l'efficacité de différentes stratégies de prospection dans différents scénarios de gestion des ressources alimentaires. Le modèle est codé dans le langage orienté-objet Java à l'aide de la trousse à outils RePast (North et al. 2006).

Afin d'explorer les modes de gestion des ressources, deux types de ressources ont été envisagés : des ressources prévisibles, qui ne peuvent apparaître que dans un nombre très limité de cellules appelées « sites d'alimentation », et des ressources non prévisibles, qui peuvent apparaître n'importe où ailleurs sur le territoire. Les sites d'alimentation sont répartis sur les cellules de façon équiprobable à chaque simulation. Ils ne contiennent pas nécessairement des ressources. Les ressources sont ensuite réparties sur les cellules de façon équiprobable à chaque simulation : une proportion est placée sur les sites d'alimentation et constitue les ressources prévisibles, et le reste est placé sur les autres cellules et constitue les ressources non prévisibles. Chaque ressource est initialisée avec une quantité de nourriture exploitable.

Approche interdisciplinaire

Modélisation multi agents du système éleveurs-populations de vautours

L'objectif était de modéliser les interactions entre les activités humaines et une population de vautours à une échelle pluri-annuelle en intégrant donc l'aspect démographique pour la population de vautours, pour améliorer la compréhension des mécanismes impliqués dans l'équarrissage par les vautours et

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

tenter d'évaluer leurs conséquences potentielles. Nous avons utilisé la plateforme de modélisation multi-agents CORMAS (Bousquet et al., 1998, Bousquet & Le Page 2004), qui est un logiciel open-source, basé sur le langage orienté-objet Smalltalk, initialement centré sur la gestion des ressources naturelles, avec des applications en développement durable comme support de discussion ou d'aide à la décision.

Ce modèle est basé en partie sur les données et les résultats des études de DIVA1. La compétition intra spécifique lors de la prise de nourriture, entre les juvéniles et les adultes (Bosé & Sarrazin 2007), a été intégrée. Les estimations de paramètres démographiques (Sarrazin et al. 1994, Sarrazin et al 1996, Gault A. 2006, Le Gouar et al. 2008) ont permis de calibrer les relations entre nourriture ingérée et survie par classe d'âge. Cependant la modélisation fine des comportements journaliers d'alimentation des vautours réalisée dans le modèle décrit précédemment a montré la complexité des processus envisagés. L'intégration de comportements fins journaliers à l'échelle de modèles simulant la dynamique de populations sur plusieurs décennies s'est avérée extrêmement complexe conceptuellement et particulièrement lourde en termes de temps de calcul. Cette intégration se poursuit actuellement au-delà du programme DIVA2. Aussi, les résultats décrits ci-après ont été obtenus par le modèle socio-écologique dans lequel le comportement alimentaire des vautours est simplifié. Intégrant une première représentation en populations structurées et non de type individus centré des vautours (classe d'âge et de comportement, structure démographique), il permet à la fois d'apprécier l'efficacité du service rendu par les vautours et l'évolution de la population de vautours en fonction des pratiques des éleveurs. D'autres données (Morio, 2006) ont permis de modéliser la dynamique saisonnière de mortalité dans les troupeaux. Un parti a été pris de conserver un niveau de simplicité pour la structure du modèle qui lui confère un caractère générique avec une possibilité d'adaptation à différents contextes locaux. Les paramètres ont été choisis de manière à ce que des valeurs locales à leur attribuer soient facilement accessibles.

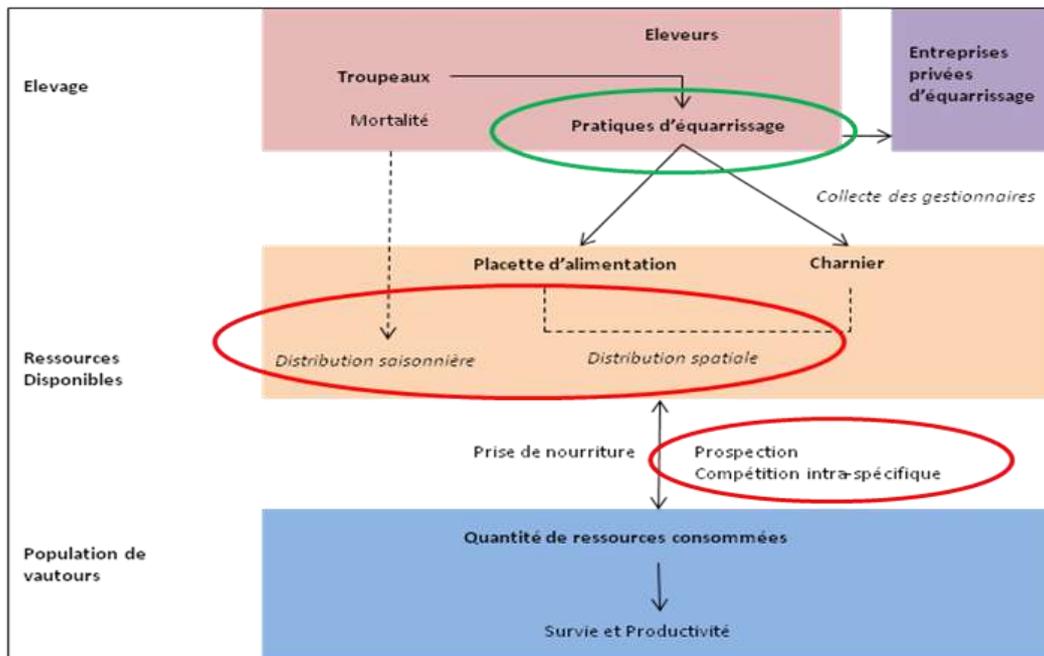


Figure 1. Schéma conceptuel du modèle. Les pratiques d'équarrissage déterminent les ressources mises à disposition des vautours. Les comportements d'alimentation des vautours déterminent leur dynamique de population et l'efficacité du service qu'ils rendent.

Les scénarios concernent à la fois les comportements de rapaces charognards et les pratiques humaines (fig. 1). Les simulations ont été regroupées selon trois axes. Le premier concerne en

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

particulier la gestion de l'apport des ressources aux vautours en termes temporel et spatial et les comportements d'alimentation des vautours. Le second concerne plus particulièrement les décisions des acteurs en matière d'équarrissage. Le troisième regroupe les simulations réalisées à partir du modèle appliqué à la situation des Grands Causses.

Les résultats sur les différents indicateurs ont été considérés lorsque la population de vautours a atteint la capacité de charge du milieu (i.e. l'effectif qui peut être supporté par le milieu). Les paramètres démographiques de la population étant affectés par les ressources qu'elle consomme, la capacité de charge du milieu dépend des pratiques d'équarrissage. Cet état particulier du système fait office d'état de référence afin de comparer les résultats de différents scénarios.

Plusieurs indicateurs écologique, sociologique et économique de l'état du système ont été considérés. Ces indicateurs incluent, l'effectif et la structure de la population de vautours, les différentes appréciations que les éleveurs ont de l'efficacité de l'équarrissage naturel, des indicateurs sanitaires décrivant l'élimination des carcasses, les coûts des collectes, les émissions de carbone des collectes.

- **Principaux résultats obtenus.**

Modélisation des stratégies de prospection alimentaire des nécrophages.

Pour des raisons de concision nous ne présentons que quelques résultats introductifs sur l'exploration des effets potentiels de différents comportements des vautours sur l'exploitation des ressources alimentaires. Des résultats complets sont détaillés dans Deygout (2009), Deygout et al. (2009), Deygout et al. (2010). Considérant les connaissances disponibles sur les nécrophages (Mundy et al. 1992, Jackson et al. 2008, Gault, 2006) les stratégies suivantes ont été plus particulièrement étudiées (fig. 2). Dans la stratégie « *Hasard* », toutes les directions ont la même probabilité d'être choisie et les individus prospectent au hasard. Dans la stratégie « *Réseau* », les individus prennent en compte la direction d'un congénère et ont ainsi tendance à former des petits groupes de prospection. Dans la stratégie « *Traplining* », les individus prennent en compte la position des sites d'alimentation et ont ainsi tendance à aller d'un site à l'autre, on distingue un *Traplining* fort et un *Traplining* intermédiaire qui traduisent deux intensités de lien avec les sites d'alimentation. Toutes ces stratégies intègrent du recrutement local (« *local enhancement* »), c'est-à-dire, la détection à distance moyenne d'individus ayant déjà trouvé une ressource.

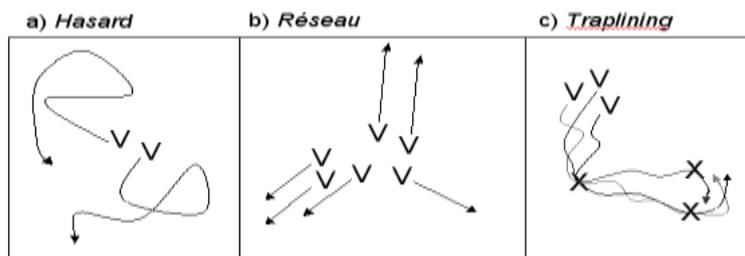


Figure 2: Schéma des différents types de déplacements obtenus par les différentes stratégies. V vautour, X sites d'alimentation.

L'effet de la prévisibilité des ressources a été particulièrement exploré. Les mesures pour les stratégies *Réseau* et *Hasard* ne sont pas affectées par les paramètres de gestion, comme la proportion de ressources prévisibles sur la figure 3. Tant que la quantité totale de ressources reste fixe, la gestion des ressources à travers la proportion de ressources prévisibles et le nombre de sites n'influence pas la réussite de ces deux stratégies. Par contre, l'efficacité du service rendu et celle de l'approvisionnement pour les individus qui font du *Traplining* sont fortement affectés par cette répartition. Ainsi, la

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

stratégie qui présente le meilleur service d'équarrissage risque de dépendre des conditions de gestion des ressources. Pour les paramètres proposés sur la figure 3, le *Traplining* fort rend toujours le plus faible service, la proportion de ressources trouvées par cette stratégie reste inférieure à celle des autres stratégies. Le *Traplining* intermédiaire rend un service de niveau similaire au *Hasard* et au *Réseau*, qui reste inférieur pour de faibles valeurs de la proportion de ressources prévisibles. Néanmoins, il est intéressant de noter qu'alors que le service d'équarrissage rendu est inférieur, le gain énergétique moyen par individu pour la stratégie *Traplining* fort peut être supérieur à celui des autres stratégies : c'est le cas quand la proportion de ressources prévisibles est forte (fig. 3.b). Les figures 3.c et 3.d montrent que *Hasard* et *Réseau* trouvent aussi bien les ressources prévisibles et les ressources non prévisibles, cela n'est pas le cas du *Traplining* qui trouve plus des ressources prévisibles. De plus, le *Traplining* trouve les ressources prévisibles seulement aussi bien que *Hasard* et *Réseau*.

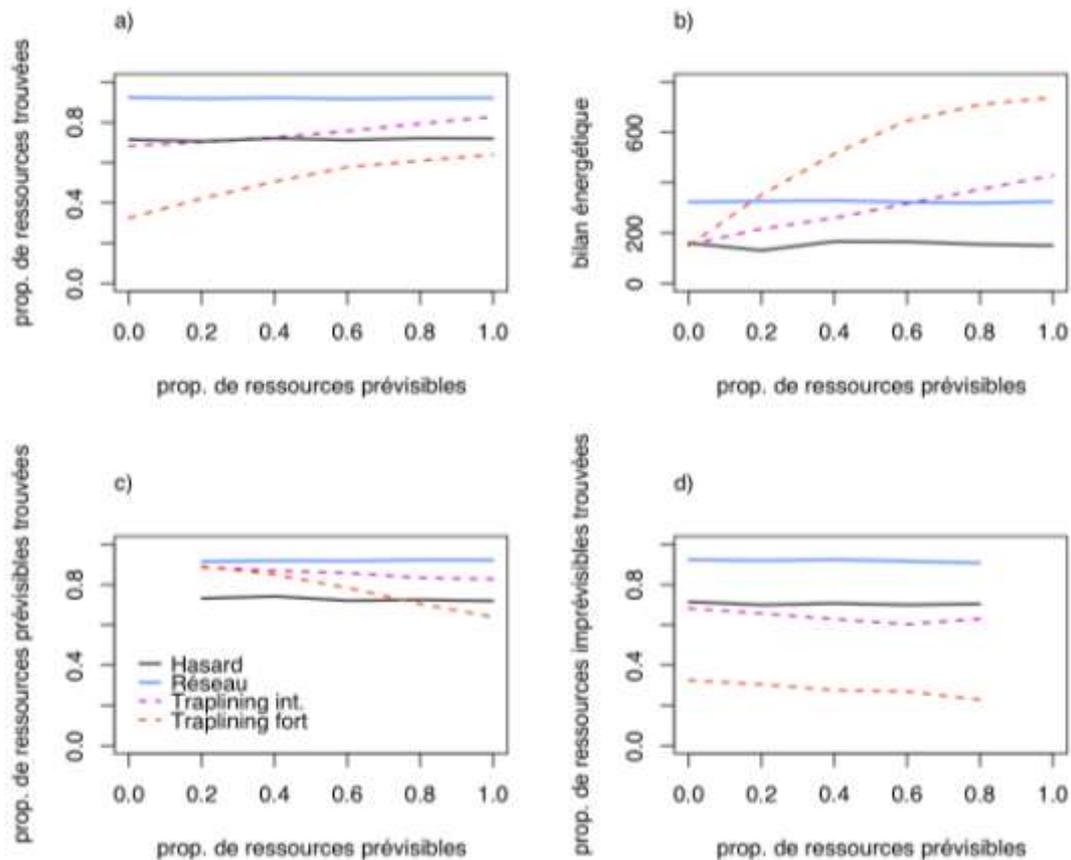


Figure 3: Effet de la proportion de ressources prévisibles sur l'efficacité du service d'équarrissage pour les différentes stratégies : (a) sur la proportion de ressources trouvées, (b) sur le bilan énergétique, (c) sur la proportion de ressources prévisibles trouvées et (d) sur la proportion de ressources non prévisibles trouvées. On considère ici 200 individus, 10 cellules contenant des ressources alimentaires, 10 sites d'alimentation.

Ces résultats ont été pris en compte dans des modèles intégrant la compétition pour l'exploitation des ressources et considérant différentes classes d'individus dominants ou dominés pouvant mettre en œuvre les stratégies de prospection alimentaires précédemment décrites. Il est ainsi apparu que quelle que soit la combinaison de stratégies dans la population, les ressources exploitées exclusivement par les dominants sont en moyenne plus proches de la colonie et celles exploitées exclusivement par les subordonnés sont en moyenne plus éloignées. Les ressources étant exploitées à la fois par les 2 classes, ce qui reste par ailleurs le cas le plus fréquent, se trouvent par conséquent en moyenne dans une zone intermédiaire. Il est intéressant de noter que cette ségrégation partielle dans

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

L'espace de l'alimentation des classes semble assez stable sur les différentes associations de stratégies testées, elle résulte donc plus de la compétition directe sur les ressources que par le choix de la stratégie de prospection (Deygout 2009).

Modèle « socio-écologique ».

L'utilisation de placettes individuelles d'alimentation.

Dans un premier temps, nous avons examiné l'incidence du « choix des pratiques d'équarrissage » des éleveurs sur la population de vautours et sur le service, que nous appellerons « gestion locale des pratiques ». Cette « gestion locale des pratiques » implique deux catégories d'acteurs locaux : les DDSV d'une part, les associations et les gestionnaires d'espaces protégés concernés par la problématique vautour d'autre part. Les DDSV délivrent les autorisations individuelles de création de placette d'alimentation aux éleveurs. Par leurs actions d'information et de communication, les associations et les gestionnaires d'espaces protégés ont une incidence sur le nombre d'éleveurs nourrissant les vautours mais aussi sur les modalités d'utilisation des placettes d'alimentation comme sur celles de la collecte par leurs services vers les charniers lourds. Les scénarios de simulations ont donc porté sur la variation de ces deux paramètres.

En effet, si l'investissement initial des gestionnaires des espaces protégés (PNC) et de la LPO dans l'incitation à la création de collectes et des charniers lourds est nécessaire pour la réintroduction, dans une perspective à long terme, ce choix peut être remis en question dans une logique de développement durable par ceux qui l'avaient initié. Le système de placettes individuelles d'alimentation paraît intuitivement être une alternative positive (un bilan carbone, un coût financier moindres). Pour les gestionnaires d'espaces protégés (PNC) et les associations investies dans la conservation des vautours (LPO), l'arrêt de la collecte peut permettre un réinvestissement du temps de travail libéré au profit du suivi de la population de vautours et des activités d'éducation à l'environnement, de sensibilisation de la population locale, de discussion avec les acteurs locaux. Pour les éleveurs, dans les régions montagneuses occupées par les vautours, ces derniers peuvent intervenir plus rapidement que les gestionnaires ou les entreprises d'équarrissage (témoignages des éleveurs).

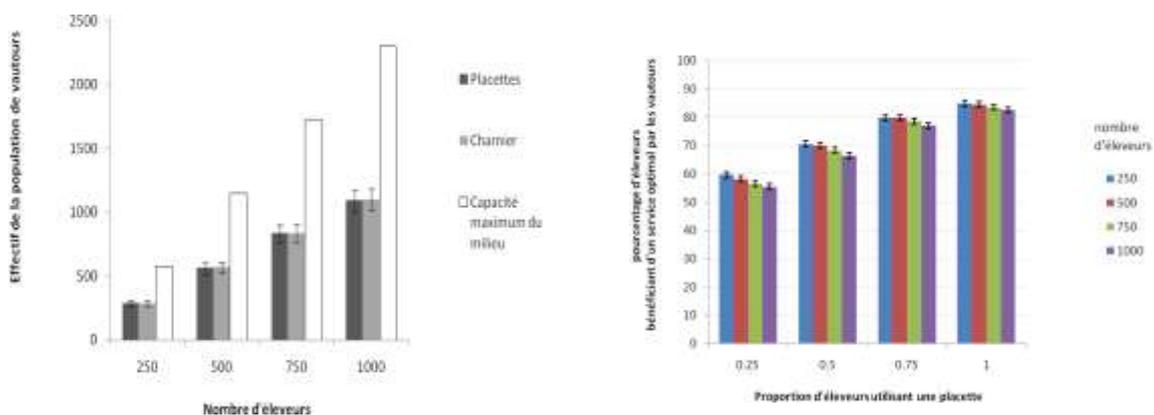


Figure 4. a) Effectif de la population de vautours (capacité de charge) en fonction du nombre d'éleveurs utilisant l'équarrissage naturel. En gris foncé : tous les éleveurs utilisent leur placette, en gris clair : tous les éleveurs utilisent la collecte par les gestionnaires, en blanc : capacité maximum du milieu selon le modèle utilisé par les gestionnaires. b) Pourcentages d'utilisateurs de placette bénéficiant d'un équarrissage naturel optimal en fonction de l'utilisation relative des placettes et de la collecte par les gestionnaires. Ces pourcentages ont été obtenus en calculant la moyenne annuelle des éleveurs bénéficiant d'un équarrissage optimal à partir des efficacités saisonnières.

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

D'autre part, c'est bien le dispositif de placettes, qu'elles soient utilisées officiellement ou officiellement, qui permet de recréer un lien direct entre les éleveurs et les rapaces (Bobbé, 2009). Par ailleurs, d'un point de vue écologique et évolutif, l'apport de nourriture par les placettes devrait éviter un attachement à long terme des vautours à un site de nourrissage particulier, et leur permettre de maintenir leurs capacités naturelles de prospection (Gault, 2006).

Le nombre d'éleveurs qui privilégient le nourrissage des vautours plutôt que l'intervention d'une entreprise d'équarrissage influence directement l'effectif potentiel de la population de rapaces à l'équilibre à travers l'augmentation de la capacité de charge du milieu, sans affecter l'efficacité de l'équarrissage naturel pour les éleveurs utilisant des placettes. Quant aux dispositifs de nourrissage des vautours, bien que les probabilités de détection ne soient pas les mêmes dans les deux cas, l'utilisation préférentielle de l'un ou l'autre n'affecte pas l'effectif de la population (fig 4a). Dans la situation intermédiaire de l'utilisation simultanée des placettes et des charniers, les résultats du modèle indiquent que favoriser l'utilisation de placettes d'alimentation devrait accroître l'effectif d'éleveurs pour lesquels l'équarrissage naturel est optimal (fig 4b).

Distribution temporelle des ressources

Dans un second temps nous nous sommes intéressés à la question de la distribution temporelle des carcasses à éliminer. Ces distributions dépendent en partie des contraintes économiques. La répartition saisonnière de la mortalité des ovins dans la région des Grands Causses (Morio, 2006), et notamment le pic de mortalité hivernal, peut être expliquée par le fait que la majorité des éleveurs ont une pratique d'élevage ovin lait participant ainsi à la production de Roquefort. La période de reproduction a lieu en juillet et l'agnelage en janvier-février, c'est-à-dire au moment de l'ouverture de la campagne laitière, qui dans cette région et depuis le début du siècle débute en hiver (Puech, 1929). Cette dessaisonnalisation permet aux producteurs et aux entreprises d'équilibrer la demande et l'offre sur les marchés.

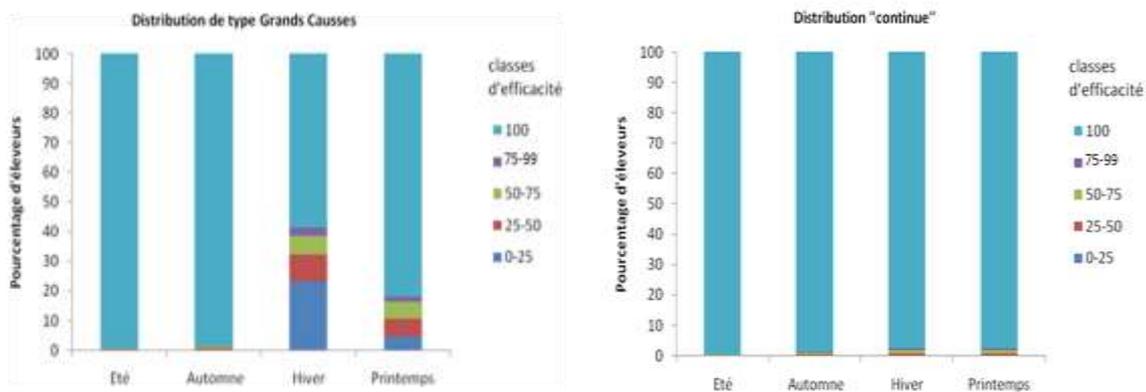


Figure 5. Efficacité saisonnière du service d'équarrissage naturel par le dispositif « placette » selon les répartitions saisonnières de mortalité des ovins.: pourcentage d'éleveurs pour lesquels le service d'équarrissage est optimal (bleu clair), 75% à 99% des carcasses éliminées (violet), 50% à 75% des carcasses éliminées (vert), 25% à 50% des carcasses éliminées (rouge), 0% à 25% des carcasses éliminées (bleu foncé). a) Distribution de la mortalité des ovins déterminée dans les Grands Causses. b) Distribution de la mortalité des ovins théorique continue.

Avec le scénario de distribution de la mortalité typique des Grands Causses, l'efficacité diminue pendant la période d'agnelage (fig 5.a) et la population à l'équilibre est inférieure à celles résultant des autres scénarios. Dans le cas théorique d'une mortalité constante (distribution « continue »), l'efficacité d'équarrissage par les vautours est optimale pour plus de 97% des éleveurs toute l'année (fig 5.b) et l'effectif de la population est le plus élevé. Avec une telle distribution, l'exploitation des carcasses par les vautours est optimisée, bénéficiant à la fois aux rapaces et améliorant l'efficacité de

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

l'équarrissage naturel. Ces effets doivent résulter en grande partie d'une meilleure adéquation entre les besoins alimentaires des nécrophages et les besoins des éleveurs alors que dans les autres cas, l'effectif de la population à l'équilibre est limité par un défaut saisonnier de ressources.

Pour une situation équivalente à celle des Grands Causses, on notera également que les services d'équarrissage des entreprises d'équarrissage sont nécessaires car ils complètent l'équarrissage naturel en hiver et assurent une collecte effective des carcasses. Si l'équarrissage naturel est moins efficace durant ces périodes, cette distribution des ressources a d'autres conséquences pour les rapaces. Le défaut saisonnier des ressources, en été et en automne, augmente la compétition pour les juvéniles, et peut entraîner de la mortalité pour les plus faibles, ou encore forcer les rapaces à trouver d'autres ressources. Rappelons que ces oiseaux peuvent faire des voyages de 100 km entre les sites de nidification et les zones de ressources chaque jour (Mundy et al., 1992; Ruxton and Houston, 2004). Ainsi des mouvements journaliers permettant l'extension de leur zone de prospection sont probables.

Une autre conséquence à souligner est celle de la dispersion de juvéniles vers des zones plus favorables. Pour les vautours fauves, les mouvements observés concernent majoritairement les individus d'un an, qui reviennent ou non à leur colonie d'origine (Donázar, 1993; Camiña, 2004). Du point de vue de la conservation, la dispersion peut être intéressante puisqu'elle peut engendrer la colonisation d'autres lieux ou le renforcement naturel de petite population mais le manque saisonnier de ressources peut être à l'origine d'un autre comportement plus problématique pour les humains. Selon l'état de leur faim, les vautours adoptent un comportement plus ou moins téméraire (Zuberogoitia et al., 2010). En Espagne, des plaintes sont déposées à leur encontre par des éleveurs pour attaques sur du bétail vivant (Margalida and Campión, 2009) et le nombre de plaintes a fortement augmenté suite à la fermeture des charniers gérés par les éleveurs (Margalida and Campión, 2009). En France, la responsabilité des oiseaux dans la mort d'animaux vivants est reconnue même si leur quantification reste discutée (Arthur and Zenoni, 2010), la perte d'une bête pour un éleveur de montagne a un impact notoire en terme psychologique comme en terme économique. Or, dans les Grands Causses, on constate l'apparition récente de plaintes pour attaques en période estivale sur des animaux vivants.

Enfin, à une plus grande échelle temporelle, la disponibilité des ressources alimentaires constitue certainement une pression évolutive et un déterminant ultime de la saison de reproduction chez le vautour fauve (Mundy et al., 1992). Une distribution de ces ressources telle qu'observée dans les Grands Causses crée des conditions qui diffèrent des pressions évolutives qui ont généré la phénologie actuelle des vautours. Elles accentuent de fait les pressions de sélection sur les jeunes après l'envol ce qui devrait être considéré pour mieux comprendre le devenir possible de ces populations.

Importance des comportements alimentaires des vautours dans les mécanismes d'équarrissage naturel.

Les comportements alimentaires modélisés sont le comportement de prospection et la compétition pour les ressources. Des scénarios ont été élaborés afin d'apprécier l'effet de ces mécanismes écologiques sur l'efficacité du service rendu et la population de vautours. Le comportement de prospection modélisé est celui dit « au plus proche ». En tant que « *central place foragers* », les vautours reviennent aux sites de nidification chaque jour et donc il est moins coûteux énergétiquement de consommer les ressources les plus proches. A titre de référence, un comportement de recherche « aléatoire » de la nourriture a été testé. La compétition modélisée est la compétition de type « *contest* » pour les juvéniles qui n'ont accès à la nourriture qu'après les individus plus âgés (Bosé & Sarrazin 2007). Une compétition de type « *scramble* » simulant un accès des juvéniles aux ressources similaire à celui des adultes a été testée.

Dans le cas de la prospection aléatoire, moins réaliste, la prise de nourriture sur le charnier est moins fréquente et un plus grand nombre de placettes sont visitées qu'avec la prospection « au plus proche ». Cette propriété entraîne le fait que plus le nombre de placettes augmente, plus l'effort d'équarrissage est disséminé entre elles, réduisant le nombre d'éleveurs pour lesquels le service d'équarrissage est optimal. Cet effet n'est pas observé lorsque le comportement de prospection est de type « au plus proche » qui conserve une certaine régularité de fréquentation pour les mêmes placettes, maintenant le nombre d'éleveurs pour lesquels le service est optimal quelque soit le nombre d'éleveurs

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

qui nourrissent les vautours. La constance de la fréquentation d'une même placette peut apporter un élément de confiance en l'efficacité du système de placette aux yeux des éleveurs.

La capacité des vautours à éliminer les carcasses dépend fortement de l'effectif de la population, puisque la quantité de carcasses éliminées est fonction des besoins alimentaires de la population. Avec une compétition moins intense pour les juvéniles, soit de type « *scramble* », la population compte plus d'individus. En moyenne 1,1 vautour est nourri par un éleveur avec la compétition de type « *contest* » contre 1,56 avec la compétition de type « *scramble* ». Cette augmentation équivaut à une population plus importante d'un tiers, quelque soit le nombre d'éleveurs utilisant l'équarrissage « naturel », avec une augmentation conséquente de l'efficacité d'équarrissage (84% à 95% de dépôts éliminés à chaque fois). Ceci s'explique par une quantité de carcasses consommées plus importantes durant les saisons où la mortalité est plus forte dans les élevages.

Décisions autour de la gestion des systèmes d'équarrissage.

Evaluer la durabilité de la présence des vautours et par conséquent du service d'équarrissage naturel qu'ils rendent aux éleveurs impose de mieux comprendre les conséquences des choix des pratiques d'équarrissage des éleveurs (placette, collecte vers les charniers lourds, équarrissage industriel).

En fonction des systèmes d'équarrissage utilisés, à savoir les collectes réalisées par les humains ou encore la consommation des cadavres d'animaux par les vautours, les conséquences des pratiques d'équarrissage pour la société peuvent être diverses. Elles peuvent ainsi jouer un rôle dans la conservation de biodiversité, notamment la pérennité des populations de vautours fauves mais aussi d'autres espèces (Cortés-Avizanda et al., 2010). Elles peuvent affecter la qualité de l'environnement, en termes sanitaire, selon l'efficacité de retrait des carcasses, et de qualité de l'air, par rapport aux émissions de carbone qu'elles génèrent. Enfin, elles peuvent engendrer des coûts significatifs.

D'abord, les choix des éleveurs se font parmi les dispositifs d'équarrissage auxquels ils peuvent avoir recours. Dans une première partie, nous nous sommes intéressés aux effets de contraintes émergeant de choix d'acteurs à propos de réglementations et de mesures environnementales, qui imposent un dispositif d'équarrissage ou déterminent les alternatives auxquelles les éleveurs peuvent avoir recours. Ensuite, dans une seconde partie, les effets des choix des éleveurs sont examinés plus précisément dans le contexte où les alternatives sont représentées par une collecte par une entreprise et par les vautours (sur les placettes). Ce contexte permet d'évaluer comment les critères de préférences des éleveurs en matière d'équarrissage peuvent influencer la durabilité et l'efficacité de l'équarrissage naturel alors qu'il n'y aurait plus de collecte par les associations et le PNC.

Nous avons souhaité évaluer l'effet des prescriptions et des interdictions de pratiques d'équarrissage qui s'imposent aux éleveurs suivant divers scénarios de législation. Pour ce faire, une typologie a été développée basée sur les critères suivants. La préférence peut porter : i) sur le destinataire des carcasses (*i.e.* les vautours ou l'entreprise d'équarrissage), ii) sur le moyen (*i.e.* carcasses débarrassées par les vautours ou par des humains), iii) sur les deux critères.

Pour chaque critère, l'application de différents degrés d'attachement à la préférence a résulté en la création de 17 profils-types d'éleveurs, les profils incohérents ayant été écartés. L'examen de ces profils-types d'éleveurs, à la lumière des données de terrain, nous a permis de les valider qualitativement. Ils ont permis de constituer une ou plusieurs populations d'éleveurs. Les systèmes d'équarrissage potentiellement utilisés par chacun d'entre eux, à partir de leur logique d'action, leur modalité de gestion de la mort animal, ont été identifiés. L'usage de la placette officielle (celle que l'éleveur n'a pas choisi d'officialiser) fait partie des possibilités envisagées. Par ailleurs, les éleveurs qui sont en contradiction avec les systèmes d'équarrissage proposés/imposés éliminent les carcasses par leurs propres moyens. Ces systèmes ont ensuite été ordonnés, suivant l'ordre de préférence d'utilisation le cas échéant, ou par équivalence (sans préférence).

Deux types de populations d'éleveurs ont été créés. La population testée en « composition standard » (en noir sur la figure 6) comporte 10% d'éleveurs n'ayant qu'une unique pratique d'équarrissage acceptable selon leur logique d'action, 40% ayant deux pratiques acceptables et 50% qui consentent à utiliser les trois pratiques possibles. Au sein de ces catégories, les profils ont une équiprobabilité d'être représentés. Pour chaque scénario de contexte, la population d'éleveurs composée de 500 individus reste la même en condition initiale. Les résultats obtenus illustrent donc les

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

réponses d'une même population de vautours dans les différents contextes. Afin d'évaluer l'influence de la composition de la population d'éleveurs sur les résultats, des simulations ont été réalisées avec des compositions aléatoires (en blanc sur la figure 6), c'est-à-dire qu'à chaque initialisation les profils sont tirés aléatoirement pour constituer la population d'éleveurs.

Pour les scénarios de simulation, les législations (c'est-à-dire prescription/interdit) ont été simplifiées, déterminant simplement, parmi les trois systèmes existants actuellement, quel(s) système(s) l'éleveur peut utiliser : la placette, la collecte par les protecteurs de vautours, la collecte par les entreprises d'équarrissage. Cette simplification a abouti à 6 scénarios :

- *Entreprise privée d'équarrissage (E)*: c'est le cas de la situation actuelle des Pyrénées. Cette situation pourrait aussi advenir (en Vercors, Verdon, Baronnies, Grands Causses en cas de crise sanitaire aigue).
- *Entreprise privée d'équarrissage/Collecte par les gestionnaires (GE)*: ceci pourrait advenir en cas de risque de crise sanitaire ou dans une moindre mesure si des cas d'empoisonnement de vautours par des carcasses déposées sur les placettes était constaté.
- *Collecte par les gestionnaires (G)*: ceci pourrait advenir en cas de prise en charge du coût de la collecte par des gestionnaires, en cas de réduction du coût financier de la collecte et pour réduire le coût carbone hors politique de promotion de la placette, et en cas de refus des équarrissages industriels de continuer à collecter.
- *Entreprise privée d'équarrissage/Collecte par les gestionnaires/Placette individuelle d'alimentation (PGE)*: c'est la situation actuelle dans les Grands Causses.
- *Collecte par les gestionnaires/Placette individuelle d'alimentation (PG)*: événement qui pourrait advenir en cas de politique de sensibilisation de la population d'éleveurs pour les inciter à créer des placettes.
- *Placette individuelle d'alimentation (P)*: événement qui pourrait advenir si les équarrisseurs industriels, les gestionnaires des espaces protégés et la LPO se retiraient du marché de l'équarrissage.
- *Entreprise privée d'équarrissage/ Placette individuelle d'alimentation (PE)* : Situation qui pourrait advenir si les gestionnaires arrêtent la collecte.

La population de vautours atteint la capacité de charge maximum avec les scénarios où seuls le gestionnaire est présent et celui où la placette est également une alternative à la collecte par les gestionnaires (fig. 6). Elle est moins importante dans les autres cas, dont celui où la placette est le seul dispositif. L'effectif de vautours est inférieur lorsque la placette et la collecte de l'entreprise sont les seuls services proposés. Ces résultats suggèrent que l'activité de collecte du gestionnaire peut être déterminante pour rendre accessible les ressources aux vautours, en tant que dispositif d'équarrissage conciliant un certain nombre de qualités recherchées, plus rapide ou plus écologique que la collecte par une entreprise, ou encore, selon les représentations de l'éleveur, plus « propre » qu'une placette.

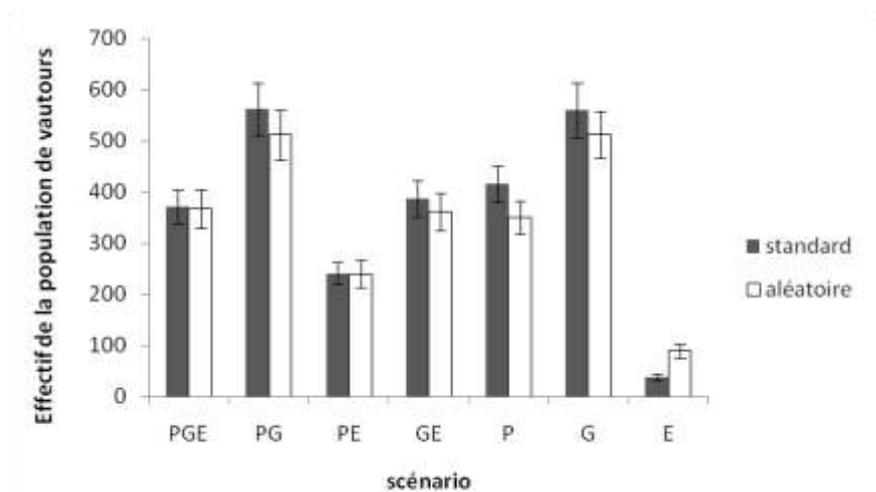


Figure 6. Capacité de charge de la population de vautours.

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

Lorsque les gestionnaires et l'entreprise d'équarrissage proposent le service d'équarrissage, les coûts et les quantités de carbone émises sont plus importants que lorsqu'un seul des types de collecte est associé au système « placette ». Et, lorsque la placette compte parmi ces alternatives, la diminution des coûts et des quantités de carbone est peu importante, le service d'équarrissage naturel étant finalement moins utilisé que dans d'autres contextes. Les contextes favorisant l'équarrissage naturel et ayant le moins d'impact environnemental (scénario PG, PE, P et G) ont des conséquences différentes selon les dispositifs d'équarrissage mis en place (fig. 7). Une association de type collecte par une entreprise et placettes aboutie à des émissions de carbone et des coûts importants mais peu de carcasses restantes ou détruites, tandis que l'utilisation exclusive de placette n'implique pas de coûts et d'émissions de carbone mais par contre un nombre plus important de carcasses restantes et de carcasses détruites. Les scénarios PG et G aboutissent à des effets similaires, occasionnant un certain coût et des carcasses restantes mais moins de carcasses détruites et de carbone émis.

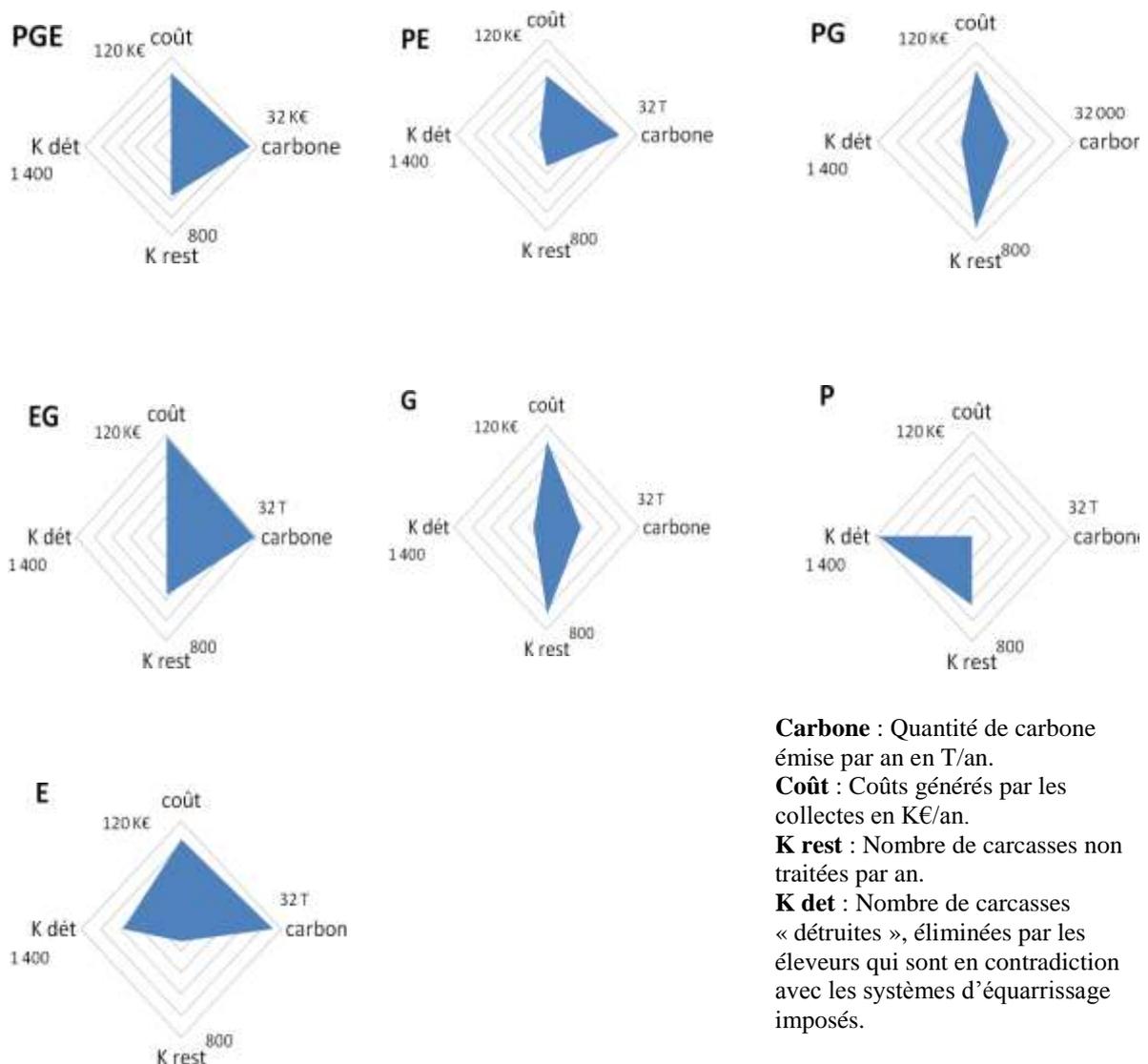


Figure 7. Impacts environnementaux et économiques selon les contextes pour la population « standard ».

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

Conséquences des critères de préférence des éleveurs.

La collecte par les gestionnaires étant un système nécessaire à la réintroduction des vautours mais moins adapté à long terme que le système de placette, la situation dans laquelle les éleveurs ont le choix entre la collecte par une entreprise et la placette mérite d'être plus amplement examinée. Les scénarios de la partie précédente mettaient en jeu des populations d'éleveurs comportant une diversité de représentations. D'autre part, les logiques d'action identifiées ont été utilisées afin de prévoir les pratiques correspondantes probablement utilisées en réponse à différents contextes. Les logiques d'action des éleveurs mobilisaient leurs représentations des dispositifs d'équarrissage, justifiant leurs préférences pour tel ou tel dispositif et leurs propensions à en utiliser d'autres.

Dans un contexte où les alternatives possibles sont la collecte par une entreprise ou la placette, l'évolution du système étudié peut être appréhendé en considérant les critères de préférences évoqués le plus fréquemment lors des entretiens menés avec des éleveurs. Les critères retenus comme étant les plus importants sont l'efficacité, au sens de l'élimination effective des carcasses, et la rapidité de leur élimination. Dans la mesure où le rapport aux vautours est prépondérant dans les choix des éleveurs, cet élément a également été prédominant dans la détermination des stratégies visant à satisfaire les critères de préférence. Ainsi, à partir des résultats issus des entretiens réalisés, nous avons décidé d'élaborer une typologie de stratégies d'éleveurs basée sur le degré d'attachement à leur système préféré (tableau 1), cet attachement pouvant être plus ou moins plastique.

	Préférence	Stratégie d'équarrissage
« Placette »	Préférence affirmée pour nourrir les vautours	Dépose toujours les carcasses sur une placette.
« Entreprise »	Préférence affirmée pour ne pas nourrir les vautours	Fait toujours appel à la collecte de l'entreprise d'équarrissage.
« Compromis »	Préférence pour nourrir les vautours, tout en plaçant l'efficacité comme primordiale	Dépose en général les carcasses sur une placette. Si une carcasse n'est pas débarrassée, fait appel à la collecte de l'entreprise d'équarrissage la fois suivante exclusivement.
« Certain »	Préférence pour l'efficacité de l'équarrissage, sans préférence affirmée pour nourrir les rapaces nécrophages	Dépose initialement les carcasses sur une placette. Si une carcasse n'est pas débarrassée, fait définitivement appel à la collecte de l'entreprise d'équarrissage.
« Pragmatique »	Pas de préférence pour nourrir ou non les vautours, utilise la placette de manière pragmatique, les jours où il n'y a pas de collecte	Fait appel à la collecte de l'entreprise d'équarrissage les jours ouvrables (semaine) et dépose les carcasses sur une placette les jours non ouvrables (week-end).
« Neutre »	Hypothèse nulle pour évaluer l'effet des autres stratégies	Fait appel à la collecte de l'entreprise d'équarrissage ou dépose les carcasses sur une placette de manière aléatoire.

Tableau 1 : typologie des préférences et des stratégies d'équarrissages des éleveurs modélisées d'après les observations de terrain.

Afin d'évaluer comment le critère de la rapidité pourrait avoir un effet de sélection entre les deux systèmes d'équarrissage, deux profils dits « omniscients » ont été créés : à chaque événement de mortalité ces profils font intervenir l'équarrisseur qui peut débarrasser la carcasse le plus rapidement possible. Si les vautours comme l'entreprise peuvent intervenir le même jour, c'est la préférence sur le système qui détermine le choix. Ainsi les choix d'équarrissage de ces profils tendent vers l'optimisation du délai du service tandis qu'ils sont nuancés par une préférence sur les modalités de ramassage : le profil « V » utilise préférentiellement la placette tandis que le profil « E » utilise préférentiellement la collecte de l'entreprise d'équarrissage.

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

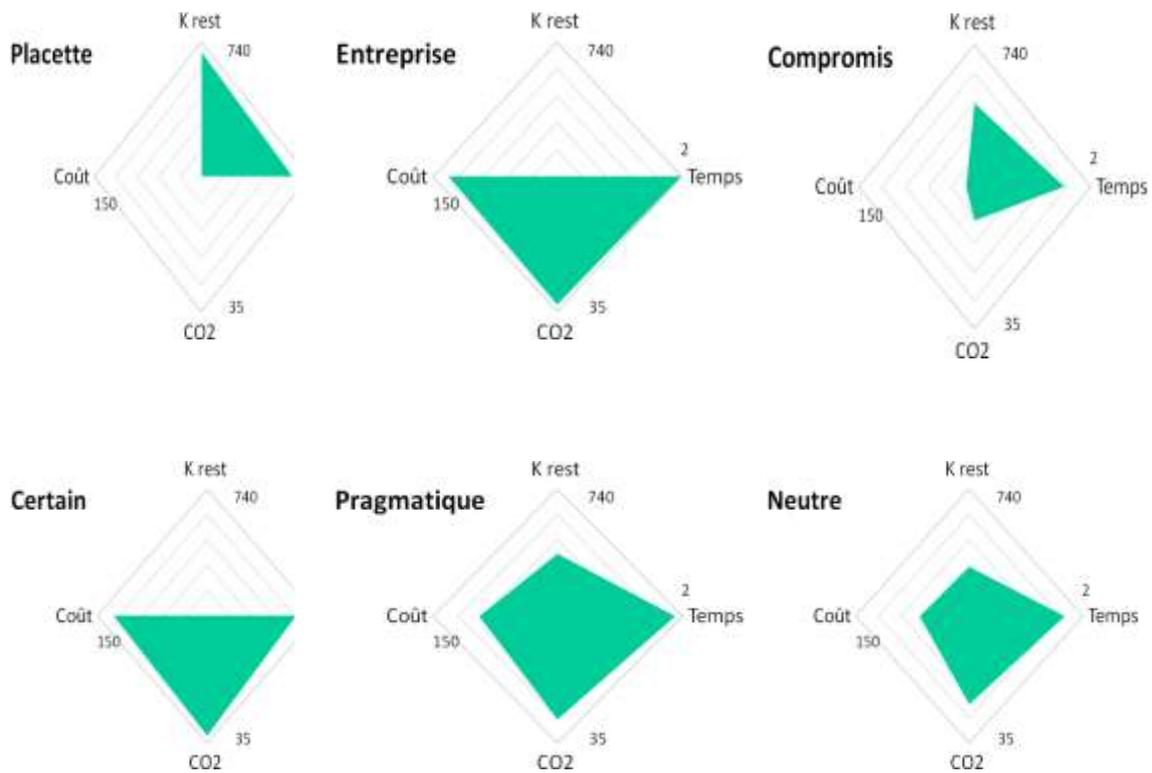


Figure 8. Effet des stratégies d'équarrissage sur les indicateurs économique et environnementaux. CO2 : Quantité de carbone émise par an en T/an. Coût : Coûts générés par les collectes en K€/an. K rest : Nombre de carcasses non traitées par an. Temps : Nombre moyen de jours d'attente avant l'élimination des carcasses.

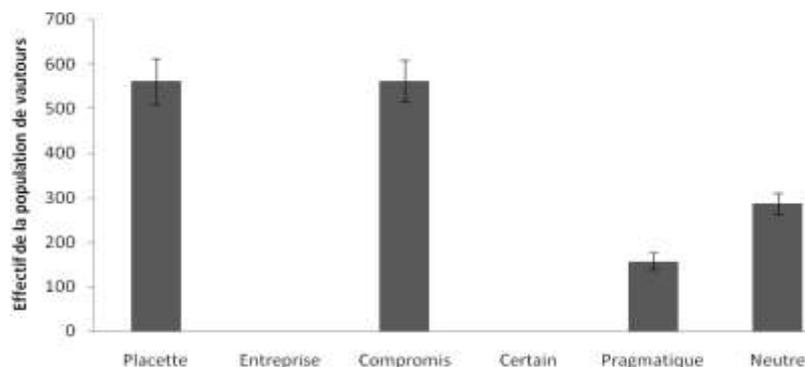


Figure 9. Effectif de la population de vautours selon les stratégies.

Toutes les simulations ont été réalisées en initialisant 500 agents éleveurs utilisant la même stratégie, afin d'obtenir des tendances claires des conséquences des différentes stratégies sur les indicateurs.

La gestion de l'équarrissage par une utilisation systématique des collectes assure aux éleveurs un retrait effectif des carcasses, tout en étant l'organisation de gestion la plus polluante, la plus

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

coûteuse (fig. 8) et celle qui mène à l'extinction de la population de vautours (fig. 9). La gestion de l'équarrissage par une utilisation systématique des placettes permet le maintien de population de vautours à une valeur maximum (fig. 9), de manière gratuite et non polluante (fig. 8). Cependant des carcasses peuvent rester non éliminées, en fait non consommées par les vautours (fig. 8).

Quelques précautions doivent cependant être prises quant à ces résultats et à ceux concernant les scénarios fictions de législation.

Considérer le service humain comme parfaitement efficace est une hypothèse contextuelle très forte. Avant de remplir des missions de service public, en France, les entreprises d'équarrissage n'avaient pas l'obligation d'intervenir. Elles ne se déplaçaient pas partout, des éleveurs en témoignent, et certains considèrent encore que « l'équarrisseur ne viendrait pas ». C'est donc le pouvoir central, par obligation et financement, qui est à l'origine de leur rigueur d'intervention.

Par ailleurs, la rigueur des entreprises dans leurs interventions ne concerne que les demandes des éleveurs. Or, des événements de mortalité peuvent survenir sur les parcours pâturés et dans des zones inaccessibles aux véhicules. Pour ce type d'évènement, les vautours ont en revanche probablement plus de capacités pour détecter et éliminer spontanément les carcasses. Ainsi la moindre efficacité de l'équarrissage par les vautours mise en évidence par le modèle et plus précisément l'indicateur du nombre de carcasses restantes ou non consommées est à nuancer. De plus, elle est due aux décalages saisonniers entre les besoins alimentaires de la colonie et les besoins en termes de carcasses à éliminer. Enfin, dans le modèle, les carcasses dites restantes ou non consommées sont des carcasses non consommées par les vautours. Dans la réalité, d'autres charognards de type opportuniste (qu'il s'agisse d'espèces considérées comme nuisibles, mais aussi d'espèces qui font l'objet de programmes de conservation) peuvent en bénéficier.

Enfin, considérer le service rendu par les nécrophages comme totalement gratuit et non polluant peut être relatif. Si la placette est située dans un endroit éloigné de la bergerie, l'éleveur peut avoir recours à l'utilisation d'un tracteur pour y amener les carcasses et si les carcasses ne sont pas consommées, l'éleveur est dans l'obligation de les incinérer. Cela peut représenter un coût et une certaine quantité de carbone émise. Il serait intéressant d'en estimer les ordres de grandeur. Cependant les événements de mortalité peuvent se produire à des distances très variables de la placette, et d'autre part, le trajet réalisé en tracteur n'est pas toujours exclusivement dédié à cette activité mais peut être l'occasion d'autres tâches agricoles. De la même manière, les coûts et les émissions de carbone dus aux processus d'élimination des carcasses dans les centres de traitement n'ont pas été pris en compte, les carcasses collectées dans la zone d'étude n'étant que partie d'un ensemble plus important.

Si l'objectif est de bénéficier d'un service optimal, le critère étant l'assurance de l'élimination des carcasses lors de chaque événement de mortalité, représenté par la stratégie « Certain », c'est bien la collecte de l'entreprise qui est « sélectionnée » (fig. 8), au détriment de l'équarrissage naturel. Les vautours ont une bonne capacité de détection de carcasses mais leur capacité d'équarrissage varie en fonction des saisons, selon le décalage entre la distribution temporelle des carcasses à éliminer et leurs besoins alimentaires.

Au moment correspondant à une demande d'équarrissage plus importante que les besoins des vautours, les éleveurs dont les carcasses n'ont pas été éliminées par les vautours, optent définitivement pour la collecte de l'entreprise d'équarrissage. Ce faisant, les ressources mises à disposition des vautours diminuent chaque année, réduisant la capacité de charge du milieu. Avec cette exigence d'efficacité, la dynamique du système tend finalement vers une extinction de la population de vautours. Ainsi, la population de vautours peut se maintenir si la logique d'action comporte en plus de la recherche d'efficacité une préférence pour l'équarrissage naturel. Dans le cas de la stratégie « Compromis », traduisant une préférence forte pour le service écologique, l'effectif de la population est équivalent à celui obtenu par une utilisation systématique de placette par tous les éleveurs (stratégie « Placette ») (fig. 9).

En revanche, si c'est le critère de rapidité qui est recherché (profils « omniscients »), la population de vautours se maintient même si la préférence est tournée vers un ramassage par l'entreprise d'équarrissage (fig. 10). Bien que l'omniscience des agents modélisés soit peu réaliste, les éleveurs expérimentent et acquièrent des connaissances sur les capacités d'intervention des équarrisseurs. Ils observent le temps que mettent les vautours à éliminer les carcasses et dans la zone de prospection des vautours, les éleveurs affirment qu'en une demi-heure « c'est fait ». D'autres ont

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

pu faire l'expérience d'une intervention spontanée des vautours alors que les carcasses étaient déposées dans la cour à l'intention d'une collecte par les entreprises.

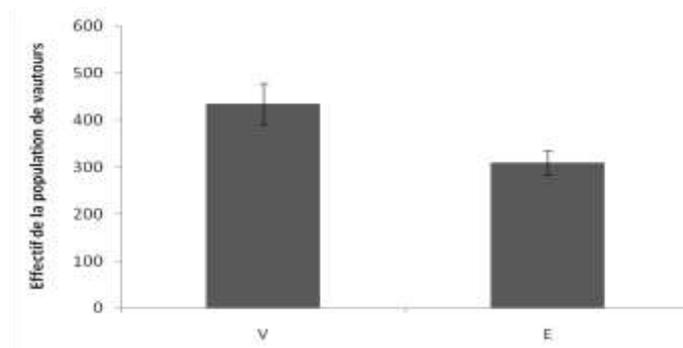


Figure 10. Effectif de la population de vautours en fonction des stratégies V et E. le profil « V » utilise préférentiellement la placette tandis que le profil « E » utilise préférentiellement la collecte de l'entreprise d'équarrissage

La stratégie « Pragmatique » consiste à utiliser la collecte de l'entreprise les jours ouvrables et la placette les autres jours. Elle est intermédiaire entre la recherche d'efficacité, certitude que l'entreprise vienne collecter les carcasses en semaine, et la rapidité, avec la possibilité que les vautours interviennent les jours non ouvrables avant le début de la semaine suivante. Cette stratégie n'apparaît pas comme la plus efficace en termes de traitement des carcasses par les vautours (fig. 8). Bien que la population de vautours puisse se maintenir, elle est moins efficace en termes de carcasses consommées par les vautours, de carbone émis par carcasse, et plus coûteuse que la stratégie « Neutre », qui fait appel à l'entreprise et utilise les vautours de manière aléatoire. Le temps moyen d'élimination des carcasses est aussi le plus élevé. Cependant ces résultats sont valables lorsque cette stratégie est adoptée par tous les éleveurs, et il n'est pas exclu qu'elle permette de maximiser l'efficacité et la rapidité d'élimination des carcasses si elle est pratiquée par un plus petit nombre d'éleveurs parmi d'autres qui utiliseraient d'autres stratégies.

L'efficacité de l'équarrissage naturel et la mobilisation d'information.

L'efficacité de l'équarrissage naturel dépend de l'équilibre entre le service fourni par les vautours, liés aux besoins alimentaires de leur population et la demande d'équarrissage, correspondant aux carcasses déposées à leur intention. Cependant, les éleveurs ne disposent pas d'informations qui puissent leur permettre d'être sûr qu'une carcasse déposée sur une placette sera effectivement consommée. L'information joue un rôle important dans l'organisation des systèmes, par exemple pour coordonner des actions ou aider à la décision

Par rapport aux stratégies qui ne bénéficient pas ou peu d'informations, les capacités des stratégies dites « omniscientes » permettent d'optimiser le service d'équarrissage naturel, toutes les carcasses mises à disposition des vautours étant consommées, et de réduire le délai d'élimination des carcasses ainsi que l'indicateur d'éco-efficience (fig. 11).

Parmi les stratégies plus réalistes, la stratégie « Compromis » utilise l'information de la dernière expérience d'équarrissage par les vautours pour choisir entre le dépôt des carcasses sur la placette ou le recours à l'entreprise d'équarrissage. La mobilisation d'une information personnelle acquise par mémorisation place cette stratégie comme la plus intéressante aux points de vue environnemental et économique (fig. 8). Avec la stratégie « Compromis », la population de vautours atteint le même effectif qu'avec la stratégie « Placette », le nombre de carcasses restantes n'étant pas nul. Mais les coûts de collecte et d'émission de carbone sont divisés d'un facteur 4 et 13 respectivement par rapport à une utilisation systématique de collecte par l'entreprise d'équarrissage. L'éco-efficience est la plus performante. Tandis qu'avec la stratégie « placette », le nombre moyen de carcasses restantes par

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

vautour est de 1,2 (pour 500 éleveurs), il est à 0,8 avec la stratégie « Compromis », ce qui permet de tendre vers une meilleure adéquation entre les besoins des vautours et les carcasses qui leur sont données.

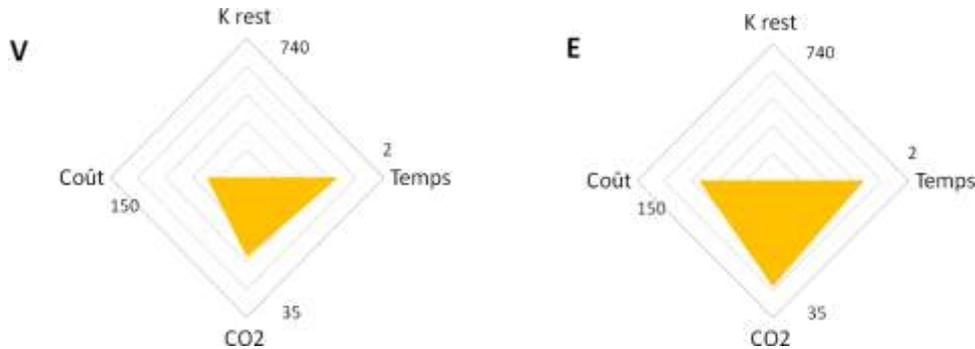


Figure 11. Indicateurs sanitaires et économique en fonction des stratégies V et E

Quelques scénarios pour la situation des Grands Causses

Le modèle a été couplé à un système d'information géographique et complété pour que les agents et leurs méthodes soient plus représentatifs de la situation des Grands Causses. L'effectif d'individus juvéniles à l'envol (à $t=30$) a été ajouté aux indicateurs afin de permettre une comparaison des résultats du modèle concernant la population de vautours avec des données de terrain.

Pour le scénario « standard », les stratégies d'équarrissage des exploitations non identifiées, et qui peuvent soit faire appel à la collecte par une entreprise d'équarrissage soit utiliser une placette, sont attribuées selon des probabilités comme suit : 10% utilisent systématiquement une placette, 10% utilisent systématiquement la collecte par une entreprise d'équarrissage, 10% adoptent la stratégie « Compromis » et 70% la stratégie « Pragmatique ». Cette dernière stratégie, consistant à déposer les carcasses aux vautours de manière ponctuelle en fonction de la disponibilité présumée des équarrisseurs, représente une pratique courante dans les Grands Causses (Bobbé, 2006, 2009). Les trois scénarios suivants concernent les décisions qui peuvent influencer la gestion de l'équarrissage :

- A partir du scénario « standard », l'arrêt des collectes par les gestionnaires : les exploitants qui y faisaient appel utilisent alors une placette s'ils se trouvent dans la zone où elle est utilisable, et la collecte par une des entreprises d'équarrissage dans le cas contraire.
- A partir du scénario « standard », l'arrêt de l'utilisation de placettes officielles : considérant que les DDSV souhaitent stabiliser le nombre de vautours, aucune nouvelle placette n'est officialisée et les dépôts officiels ne sont plus envisageables. Tous les éleveurs n'ayant pas de placette officielle doivent faire appel à une entreprise.
- La promotion de l'utilisation de placettes pour l'équarrissage : dans les zones où la placette est utilisable, 10% d'utilisateurs systématiques des collectes par les entreprises, 10% d'utilisateurs systématiques de placette et 80% de « Compromis ».

L'arrêt des collectes par la LPO et le PNC.

La demande pour le service d'équarrissage naturel, qui concernait 3.278 (± 134) carcasses avec le scénario « standard », en concerne alors 2.996 (± 94). Sur la totalité des carcasses à traiter, cela représente 22,89% des carcasses en moyenne contre 24,98% avec le scénario « standard » (fig. 12.a). Selon les résultats, l'arrêt des collectes par la LPO et le PNC a peu d'effet sur l'effectif de vautours et

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

de carcasses non consommées. L'effectif à l'équilibre est alors de 340 (± 15) individus (fig 13) et le nombre de carcasses restantes de 518 (± 49) (fig.12.b). Le nombre d'individus juvéniles à l'envol est de 114 (± 7). La LPO et le PNC économisent respectivement 7.967,59 (± 417) € et 1.152,33 (± 174) €. Les coûts sont reportés vers les entreprises et le coût total diminue en moyenne de 6.326 €. Si l'on considère la totalité des carcasses traitées, le coût par carcasse diminue en moyenne de 7,96 € (scénario « standard ») à 7,46 € et l'éco-efficience est de 1,9.

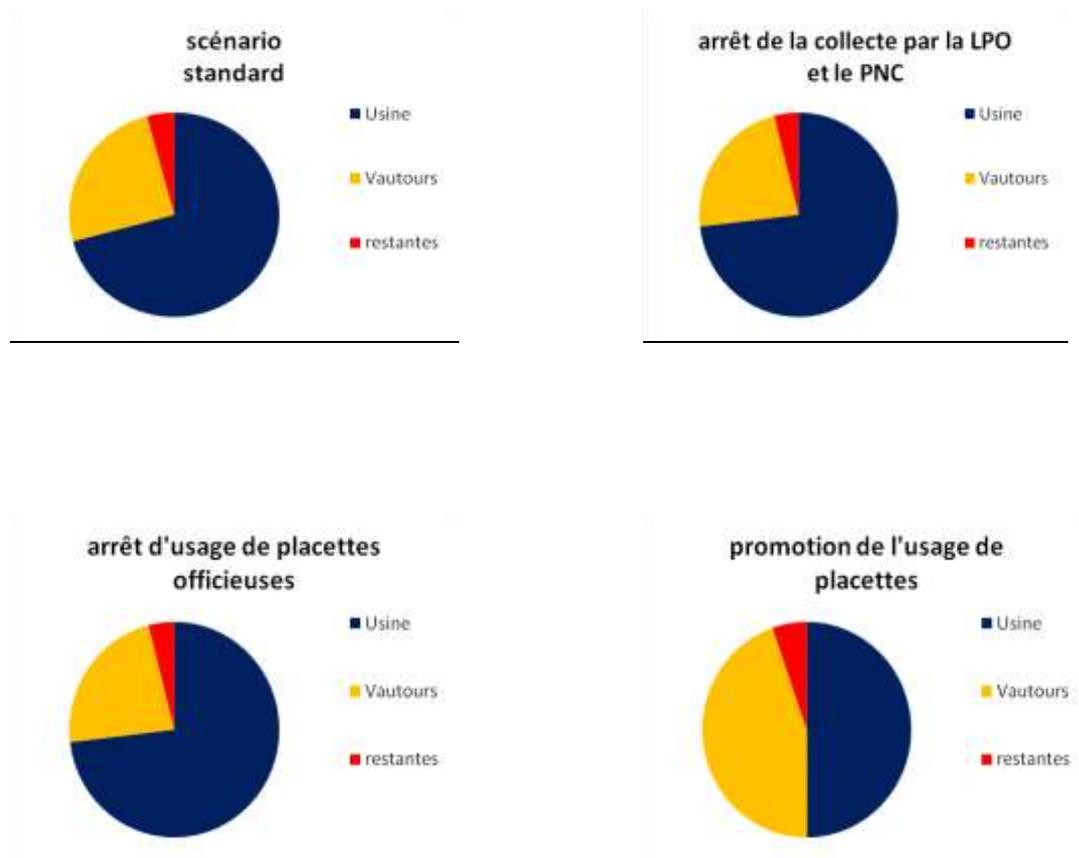


Figure 12. Destination finale des carcasses entre les usines de traitement des carcasses, les vautours et les carcasses restantes.

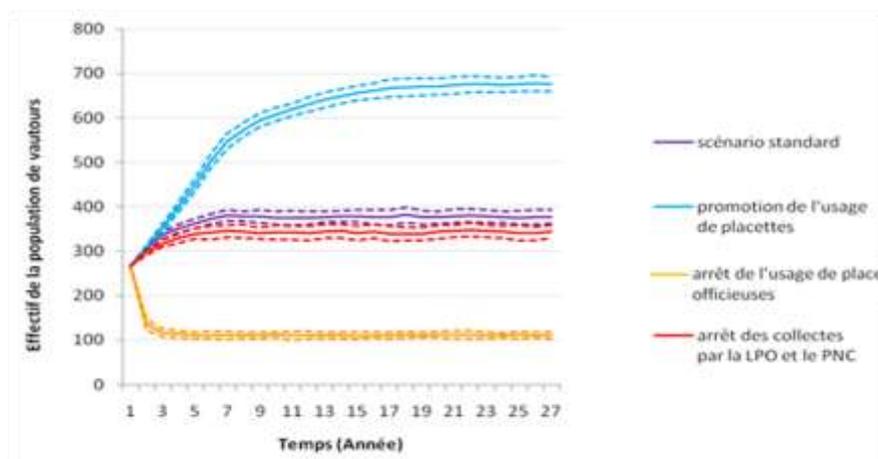


Figure 13. Effectif de population de vautours selon les scénarios. Les moyennes sont représentées par les lignes pleines et les écarts types par les lignes en pointillés.

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

L'arrêt d'usage de placettes officielles.

Dans le scénario où les placettes officielles sont interdites, il reste les 61 placettes officielles répertoriées cette année (2010). Le nombre d'individus juvéniles à l'envol est de 37 (± 17). La population de vautours qui peut se maintenir dans ce contexte avec 110 (± 6) individus (fig. 13) consomme annuellement 925 (± 47) carcasses. La demande pour le service d'équarrissage naturel concerne alors 7,3% des carcasses de la zone prise en compte (fig.12.a). L'efficacité globale est améliorée et atteint les 99,21%, correspondant à un nombre de carcasses restantes de 99 (± 20) par an (fig.12.b). Le succès d'élimination des carcasses par les placettes est toujours optimal en été mais seulement 39,6% des carcasses déposées en hiver sont consommées, alors que la moyenne est supérieure dans les autres scénarios (fig. 14). Par rapport au scénario « standard », les coûts sont supérieurs de 23.077 € en moyenne soit 9,80 € par carcasse. L'indicateur d'éco-efficience est le plus élevé des 3 scénarios avec 2,25 kg de carbone émis par carcasse.

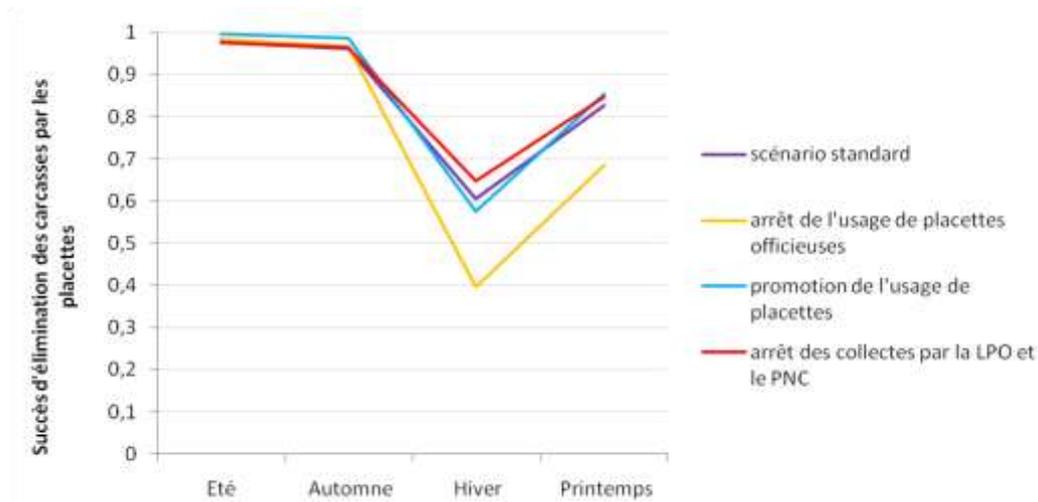


Figure 14. Succès d'élimination des carcasses par les placettes.

La promotion de l'usage de la placette.

Avec la promotion de la placette comme mode d'équarrissage, la demande pour le service d'équarrissage naturel équivaut à 44,73% des carcasses de la zone (fig.12.a). L'efficacité globale est moindre, 94,7% contre 95,78% avec le scénario « standard », avec 708 (± 59) carcasses restantes par an (fig. 12.b). La population de vautours compte 677 (± 17) individus, soit 300 individus de plus en moyenne que dans le scénario « standard ». (fig. 13) Le nombre d'individus juvéniles à l'envol est de 261 (± 8). L'économie réalisée est de 26.030 € avec un coût de 5,89 € en moyenne par carcasse. L'éco-efficience est meilleure, avec 1,59 kg carbone émis par carcasse traitées.

Implication des résultats pour la gestion.

L'arrêt des collectes serait intéressante au point de vue financier pour la LPO et le PNC ; il n'aurait que peu d'impact sur la population de vautours. La première hypothèse utilisée est que tous les éleveurs qui utilisaient la collecte des gestionnaires utilisent alors une placette s'ils le peuvent. Et la condition intégrée dans le modèle pour avoir une placette est un peu réductrice par rapport à la réalité, la contrainte étant portée sur l'altitude de l'exploitation. Il s'agit d'une approximation qui ne tient pas

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

compte des pentes, de la proximité des villes et des chemins, de la possibilité qu'il n'y ait pas de compromis possible entre la LPO ou le PNC et l'éleveur sur la situation de la placette.

Cependant, même si les 66 éleveurs utilisant actuellement la collecte des gestionnaires se tournent vers la collecte d'une entreprise d'équarrissage, l'effet sur l'effectif de la population est faible. En effet, les ressources pour la population de vautours proviennent en majorité des pratiques ponctuelles de dépôts officiels. Et l'effectif de la population de vautours est largement affecté dans le scénario où ces pratiques sont supprimées. L'utilisation de l'équarrissage naturel par les éleveurs, qui laissent les carcasses aux vautours lorsque les événements de mortalité ont lieu en dehors des jours de collecte par les entreprises, est majoritaire par rapport à celle qui est faite de manière officielle. D'autre part, cette stratégie peu intéressante aux points de vue environnemental et économique lorsque tous les éleveurs l'utilisent, a finalement un effet positif sur l'efficacité du service d'équarrissage par les vautours. Lorsque ces dépôts n'ont plus lieu, l'efficacité d'équarrissage naturel est moindre pendant la période hivernale.

L'arrêt d'usage des placettes officielles a peu d'effet sur les indicateurs dans les scénarios de contextes, alors qu'il apparaît primordial dans le système caussenard. Cet élément provient en grande partie de pratiques traditionnelles. Le caractère théorique de la constitution des populations testées dans le premier cas et surtout de leur composition met en évidence la limite du modèle qui ne tient pas compte d'éléments historiques propres aux terrains étudiés.

Le PNC et la LPO ne définissent pas leurs objectifs de gestion en termes d'effectif souhaitable de vautours. Il est difficile de considérer que la promotion de l'usage de placettes soit nécessaire aux enjeux populationnels liés à la conservation de cette espèce. Cependant, favoriser l'usage de placettes pourrait aboutir à des économies non négligeables, de l'ordre de 26 K€ par an et la réduction des émissions de carbone d'environ 5 tonnes de carbone par an selon les résultats du modèle en comparant ce scénario au scénario « standard ». Ces chiffres sont bien évidemment à considérer comme des approximations dans la mesure où la quantification des pratiques actuelles comme celle de pratiques en réponse à des politiques de promotion du service d'équarrissage naturel est quasiment irréalisable. Néanmoins ces chiffres permettent des comparaisons qualitatives de scénarios. Avec le scénario « promotion de l'usage de placette », les carcasses non éliminées sont les plus nombreuses, bien qu'il soit néanmoins probable que ce nombre soit surestimé par le modèle. D'une part, c'est pendant la période hivernale que le service d'équarrissage par les vautours n'a pas les capacités de les éliminer. D'autre part, le service d'équarrissage est optimal pour tous les éleveurs qui utilisent une placette lors de la saison estivale, que la population compte près de 400 individus ou seulement un peu plus d'une centaine. Autrement dit, la quantité de carcasses dont profitent les charognards en été est probablement déficitaire par rapport à leurs besoins puisqu'aujourd'hui il est certain que la population a dépassé le seuil des 400 individus. Augmenter l'utilisation du service offert par les vautours dépend de la quantité de carcasses qui leur sont données. Quant à l'amélioration de l'efficacité de ce service, il pourrait être possible d'adapter les pratiques d'équarrissage aux capacités des vautours, en étendant l'utilisation de placettes plus éloignées en été et en réduisant les dépôts de carcasses à leur intention en hiver. Il semble que les éleveurs tendent vers cette stratégie puisque certains d'entre eux, localisés à la périphérie de la zone de prospection des vautours, utilisent les placettes préférentiellement en été. Néanmoins, ils n'ont aucune certitude quant à l'intervention des vautours ; cette stratégie concerne seulement ceux qui ont une réelle préférence pour le service d'équarrissage écologique et qui placent l'assurance de l'élimination effective des carcasses au second plan.

• Principales conclusions et perspectives

Le système étudié constitue un exemple rare d'intégration d'un agent non humain et non domestiqué dans des pratiques agricoles et dont le bénéfice et les contraintes peuvent être étudiés aussi bien du point de vue des acteurs humains impliqués que de celui des populations naturelles dont la conservation est ainsi visée. Nous nous sommes ici focalisés sur la modélisation de cet équarrissage naturel qui, bien que faisant intervenir une diversité relativement modeste d'agents, s'avère d'une grande complexité étant donné les processus impliqués. Ainsi la prise en compte explicite de processus comportementaux et démographiques d'un côté, de pratiques de gestion et d'indicateurs

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

sociologiques, économiques et environnementaux de l'autre, s'est avéré particulièrement complexe du fait des échelles temporelles très différentes s'appliquant à ces processus. L'intégration des stratégies de prospection alimentaire modélisées finement à l'échelle de la journée dans des simulations considérant les dynamiques de populations sur plusieurs décennies a été singulièrement problématique aussi bien conceptuellement qu'en terme de temps de calculs. A ce stade de présentation des résultats, nous sommes donc restés pour l'instant sur deux approches séparées, l'une détaillant ces comportements et établissant des bilans énergétiques ainsi que des efficacités de services écologiques fournis à cette échelle journalière, l'autre considérant des comportements simplifiés mais modélisables sur de grandes échelles de temps. L'intégration de ces deux échelles reste envisagée et constitue une étape de fin de thèse pour Hélène Dupont. Cette intégration bénéficiera également de la poursuite du programme ANR SOFTPOP coordonné par F Sarrazin dans lequel le comportement de prospection alimentaire des vautours fauves est étudié finement par suivi GPS. Les résultats préliminaires de ces études fines de terrain confirment largement les hypothèses utilisées pour construire nos modèles elle-même issues des travaux de Gault (2006) et Bosè & Sarrazin (2007) lors de DIVA1.

La question de la validation des modèles élaborés au cours du programme a été très présente dans nos réflexions. En effet parallèlement au développement de modèles génériques, l'utilisation de modèles locaux basés sur la situation bien étudiée dans les causses a permis de constater, au delà de scénarios théoriques, la réalité de certaines contraintes pesant sur ce système d'équarrissage. Ainsi, il est apparu que la distribution temporelle des ressources produites par les éleveurs génère un décalage très important entre les prédictions d'un modèle simple, non mécaniste utilisé par les gestionnaires pour prédire les populations de vautour à partir de ressources disponibles annuellement, et un modèle plus réaliste tenant compte des ressources réellement disponibles à chaque saison. Ceci a permis de mieux cerner les conséquences des contraintes essentiellement économiques définissant les dates de mise bas, sur la nécessité de maintenir au moins en hiver un système de service d'équarrissage, les nécrophages ne pouvant consommer toutes les ressources produites artificiellement en cette saison. S'il est clair que l'argument de l'équarrissage ne constitue pas une pression suffisamment forte pour modifier ces pratiques d'élevage, les réglementations sur l'équarrissage, toujours en évolution à l'échelle française et européenne (Margalida et al. 2010) devront prendre en compte cette contrainte mise en lumière par ce travail de modélisation.

L'application de tout ou partie de ces approches à d'autres cas d'études sur la même espèce dans des systèmes proches ou sur d'autres espèces de nécrophages est envisageable aussi bien pour améliorer leur conservation que pour optimiser la gestion de leurs ressources dans un contexte réglementaire changeant mais toujours contraint. Pour des raisons de temps de développement de nos modèles nous n'avons pu mener à bien ces applications larges. Néanmoins une collaboration avec la LPO et le Parc National des Pyrénées est engagée pour mieux comprendre les effets de la gestion de l'habitat et notamment des ressources alimentaires sur la dynamique de la population pyrénéenne de vautours percnoptères (*Neophron percnopterus*). Si à ce stade la modélisation n'est pas directement envisagée, ces travaux bénéficieront des développements conceptuels acquis durant ce programme et orienteront les analyses statistiques qui seront menées à partir des données de terrain et de suivi de population déjà menées.

Enfin, à une autre échelle, ces travaux nous ont amené à questionner la réalité et la perception des argumentaires liés à la gestion et la conservation des services écosystémiques. L'exemple de ce système d'équarrissage peut être perçu dans une approche anthropocentrée ou écocentree des services et des fonctions écosystémiques. Sa modélisation permet d'en explorer les dynamiques sous une grande variété de scénarios, constituant une approche qui pourrait être réinvestie dans de nombreuses autres situations.

• Références citées

- Arthur, C. and Zenoni, V., 2010. Les dommages sur bétail domestique attribués aux vautours fauves.
Bobbé, S., 2009. Du bon usage de l'animal sauvage. Exemple d'un mode d'équarrissage écologique. In: S. Frioux and E.-A. Pépy (Editor), L'animal sauvage entre nuisance et patrimoine. France XVIe-XXIe siècle. E.N.S. .
Bosé, M. and Sarrazin, F., 2007. Competitive behaviour and feeding rate in a reintroduced population of Griffon Vultures *Gyps fulvus*. Ibis, 149:490-501.

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

- Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H. and Le Page, C., 1998. Cormas: Common-pool resources and multi-agent systems. *Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence*, pp. 826-837.
- Bousquet, F. and Le Page, C., 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecol Model*, 176:313-332.
- Camiña, A., 2004. Griffon vulture *Gyps fulvus* monitoring in Spain: current research and conservation projects. In: R.W.C.R.D.a.M. B.-U. (Editor), VI World Conference on Birds of Prey and Owls, Budapest, Hungary, pp. 45-67.
- Carpenter, S.R., Mooney, H.A., Agard, J., Capistrano, D., DeFries, R.S., Díaz, S., Dietz, T., Duraiappah, A.K., Oteng-Yeboah, A., Pereira, H.M., Perrings, C., Reid, W.V., Sarukhan, J., Scholes, R.J. and Whyte, A., 2009. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 106:1305-1312.
- Cortés-Avizanda, A., Carrete, M. and Donazar, J.A., 2010. Managing supplementary feeding for avian scavengers: Guidelines for optimal design using ecological criteria. *Biol Conserv*, 143:1707-1715.
- Deygout, C. 2006. Conséquences de l'approvisionnement social pour la conservation des charognards : la gestion des charniers et la conservation du Vautour fauve. Master 2ème année Sciences de l'Univers, Environnement et Ecologie, spécialité Ecologie-Biodiversité-Evolution. INAPG. Resp. C. Bessa-Gomes et F. Sarrazin.
- Deygout, C., Gault, A., Sarrazin, F. and Bessa-Gomes, C., 2009. Modeling the impact of feeding stations on vulture scavenging service efficiency. *Ecol Model*, 220:1826-1835.
- Donazar, J.A. 1993. *Los Buitres Ibericos. Biología y conservación* (ed J.M. Reyero), Madrid.
- Ferber, J. (Editor) 1995. Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective. InterEditions, Paris 522 p.
- Gault, A. 2006. Prospection alimentaire et impact de la distribution spatiale et temporelle des ressources trophiques chez le Vautour fauve (*Gyps fulvus*). Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie. Dir. Pr. D. Couvet, co-Dir. F. Sarrazin
- Jackson, A.L., Ruxton, G.D. and Houston, D.C., 2008. The effect of social facilitation on foraging success in vultures: a modelling study. *Biology Letters*, 4:311-313.
- Le Gouar P, A. Robert, S. Henriquet, P. Lécuyer, C. Tessier, & Sarrazin F. 2008. Roles of survival and dispersal in reintroduction success of Griffon vulture (*Gyps fulvus*). *Ecological applications* 18 : 859-872.
- Margalida, A. and Campión, D., 2009. Aggressive interactions between Eurasian Griffon Vultures *Gyps fulvus* and livestock: ecological and economic aspects of the emerging conflict. In: J.A. Donazar, Margalida, A. & Campión, D. (Editor), In Vultures, feeding stations and sanitary legislation: a conflict and its consequences from the perspective of conservation biology. *Munibe* 29 (Suppl.), Sociedad de Ciencias Aranzadi, Donostia, pp. 476-491.
- Margalida, A., Donazar, J.A., Carrete, M. and Sánchez-Zapata, J.A., 2010. Sanitary versus environmental policies: fitting together two pieces of the puzzle of European vulture conservation. *J Appl Ecol*, 47:931-935.
- Millenium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press, Washington DC. 137p.
- Morio, S. 2006. Evaluation des ressources trophiques disponibles pour la colonie de Vautours fauves des Grands Causses. LPO. Master 2 Professionnel, Gestion de la Biodiversité. Université Paul Sabatier. 64 pp.
- Mundy, P., Butchard, D., Ledger, J. and Piper, S. (Editors), 1992. *The Vultures of Africa*, Academic Press, London, UK.
- North M.J., Collier N.T., and Vos J.R. 2006. Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit *ACM Transactions on modelling and computer simulation*. 16: 1-25
- Perrings, C., Jackson, L., Bawa, K., Brussard, L., Brush, S., Gavin, T., Papa, R., Pascual, U., De Ruiter, P. 2006. Biodiversity in agricultural landscapes : Saving natural capital without losing interest. *Conservation Biology*. 20 : 263-264.
- Ruxton, G.D. and Houston, D.C.D.C., 2004. Obligate vertebrate scavengers must be large soaring fliers. *J Theor Biol*, 228:431-436.
- Sarrazin, F., Bagnolini, C., Pinna, J.-L. and Danchin, E., 1996. Breeding biology during establishment of a reintroduced griffon vulture *Gyps fulvus* population. *Ibis*, 138:315-325.
- Sarrazin, F., Bagnolini, C., Pinna, J.L., Danchin, E. and Clobert, J., 1994. Re-introduction of the Griffon vulture *Gyps fulvus* in the Massif Central, France. In: B.-U. Meyburg, & Chancellor, R.D. (Editor), *Raptor Conservation Today*. WWGBP / The Pica Press, pp. 479-491.
- Şekercioğlu, Ç.H., Daily, G.C. and Ehrlich, P.R., 2004. Ecosystem consequences of bird declines. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 101:18042-18047.
- Tella, J.L., 2001. Action is needed now, or BSE crisis could wipe out endangered birds of prey. *Nature*, 410:408-408.
- Zuberogoitia, I., Martínez, J.E., Margalida, A., Gómez, I., Azkona, A. and Martínez, J.A., 2010. Reduced food availability induces behavioural changes in Griffon Vulture *Gyps fulvus*. *Ornis Fenn*, 87:52-60.

Liste des publications et des communications en rapport direct avec le projet réalisé dans le programme DIVA

Reuves avec comité de lecture

Deygout, C., Gault, A., Sarrazin, F., & Bessa-Gomes, C. 2009 - Modeling the impact of feeding stations on vulture scavenging service efficiency. *Ecological Modelling*. 220 : 1826-1835.

Deygout, C., Gault, A., Duriez, O., Sarrazin, F., & Bessa-Gomes, C. 2010 - Impact of food predictability on social facilitation by foraging scavengers. *Behavioral Ecology*. 21 : 1131-1139.

Dupont, H., Mihoub, J.B., Becu, N., & Sarrazin, F. (sous presse) Modelling interactions between scavenger behaviour and farming practices: Impacts on scavenger population and ecosystem service efficiency. *Ecological Modelling*.

Bobbé S., (en révision) L'agropastoralisme au service de la biodiversité. Exemple d'un mode d'équarrissage écologique, *Nature Science Société*

Sarrazin, F., Dupont, H., Bessa Gomes, C., Bobbé, S., Buronfosse-Roque, F., Deygout, C., Duriez, O., Néouze, R. & Mihoub, J.B. Ecological service is the third piece fixing the puzzle of European vulture conservation: a reply to Margalida et al. En préparation pour *Journal of Applied Ecology*.

Bobbé, S., Dupont, H., Sarrazin, F., Bessa Gomes, C., Buronfosse-Roque, F. Les vautours, des auxiliaires de l'éleveur pour les pratiques d'équarrissage. En préparation pour *Fourrages*.

Ouvrages ou chapitres d'ouvrage

Bobbé S. 2009 - Eleveurs et protecteurs, des intérêts partagés. Autour d'une expérience d'équarrissage naturel, in Capucine Crosnier, Jean-Paul Chassany (eds), *Les grands Causses. Terre d'expériences*, Millau, Ed. Parc national des Cévennes : 209-15.

Bobbé S. 2009 - Du bon usage de l'animal sauvage. Exemple d'un mode d'équarrissage écologique, *L'animal sauvage entre nuisance et patrimoine, France, XVIe-XXIe siècle*, in Stéphane Frioux, Emilie-Anne Pépy (eds), Paris, Ecole Normale Supérieure : 22-31.

Sarrazin, F. 2009 - La réintroduction du vautour fauve, in Capucine Crosnier, Jean-Paul Chassany (eds), *Les grands Causses. Terre d'expériences*, Millau, Ed. Parc national des Cévennes : 89-94.

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

Communications à colloques scientifiques

- Deygout, C. Sarrazin, F. & Bessa-Gomes, C. 2008 – « Conséquences de l'approvisionnement social pour la conservation des nécrophages », Journées de l'école doctorale ABIÉS (Paris, France) 18-19 mars 2008 poster primé.
- Deygout, C., Gault, A., Sarrazin, F., & Bessa-Gomes, C 2008 – “Modelling the impact of feeding stations on the foraging behaviour of endangered avian scavengers”, 4th meeting in Ecology & Behaviour (Toulouse, France) 14-17 avril 2008 Oral.
- Deygout, C. Bessa-Gomes, C., Sarrazin, F. & Gault, A. 2008 – “Modelling the impact of feeding stations on the foraging behaviour of vultures”, 12th ISBE meeting (Cornell U, NY, USA) Aout 2008.
- Bobbé, S. Dupont, H. 2008 - *Du bon usage de l'animal sauvage. Exemple d'un mode d'équarrissage raisonné.* Colloque : Pastoralisme, Biodiversité, Paysages dans les espaces montagnards, les rencontres de Valdeblore, 28, 29, 30 octobre 2008.
- Duriez, O., Deygout, C. & Sarrazin, F. 2008 - *Impact de la gestion de l'équarrissage sur les stratégies de prospection de vautours fauves.* Colloque : Pastoralismes, Biodiversités, Paysages dans les espaces montagnards, Valdeblore (France), 28-30 Octobre 2008. Poster.
- Deygout, C. Duriez, O., Sarrazin, F. & Bessa-Gomes, C. 2009 - *Impact des sites d'alimentation sur l'approvisionnement des vautours.* Colloque Le réveil du Dodo III : 3èmes journées francophones des sciences de la conservation de la biodiversité, Montpellier (France), 17-19 Mars 2009. Poster.
- Dupont, H., Bobbé, S., & Sarrazin, F. 2009 - *Gestion d'une population de vautours fauves dans les Grands Causses: Modélisation multi-agents.* Le Réveil du Dodo III, Journées francophones des Sciences de la Conservation de la Biodiversité, Montpellier, 17-19 mars 2009.
- Deygout, C. Duriez, O., Sarrazin, F. & Bessa-Gomes, C. 2009 – *Modelling the impact of feeding stations on the foraging behaviour of endangered avian scavengers*, 2nd European Congress for Conservation Biology (Prague, Rép. Tchèque) 5-9 septembre 2009. Oral
- Dupont, H. Bobbé, S., Sarrazin, F. 2009 - *Multi-agent modeling of an ecosystem service provided by vultures.* 2nd European Congress of Conservation Biology, Conservation biology and beyond: from science to practice. Czech University of Life Sciences, Prague, September 01 – 05, 2009
- Deygout, C., Duriez, O., Sarrazin, F. & Bessa-Gomes, C. 2009 - *Modelling social foraging and resource predictability in the case of vultures.* Mathematical Models in Ecology and Evolution 2009 (Bristol, UK) 10- 11 septembre 2009. Oral
- Dupont H., Sarrazin F., Bobbe S., Deygout C., Bessa Gomez C., & Levrel H. 2009 - *An ecosystem service provided by vultures.* Griffon vulture Conservation mini-workshop, University of Rome La Sapienza, may 4th.

Modélisation multi-agents des interactions entre agropastoralisme et rapaces nécrophages

Sarrazin, F. 2009 - *Dynamics of restored populations of Griffon vultures in France*. Griffon Vulture Conservation Planning mini-workshop. Università Roma La Sapienza, 4 mai 2009.

H. Dupont, S. Bobbé, F. Sarrazin. 2010. *Multi-agent modelling as an integrative tool for species and ecological service conservation*. The case of scavengers and livestock farmers. *Sustainable Conservation: Bridging the gap between disciplines*, Centre Conservation Biology at the Norwegian University for Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norvège, 15-18 mars 2010

Communications à des réunions ou séminaires de publics professionnels

Deygout, C. Sarrazin, F. & Bessa-Gomes, C. 2008. "Conséquences de l'approvisionnement social pour la conservation des nécrophages" Séminaire inter-équipe du laboratoire. Oral. 4 avril 2008

Sarrazin F., Bobbé, S., Dupont H., Présentations et animations de débats lors des réunions annuelles du Groupe Vautour France (13-14 mars 2008, Die ; 26-28 mars 2009 Agos Vidalos, 1 -3 avril 2010 Rémuzat).

Dupont H., Participation à la réunion Vautours Fauves en France et « tournis ». Journée vétérinaire « formation » SNGTV-Commission Environnement, lundi 29 et mardi 30 novembre 2010, Rodez.

Mémoires d'étudiants

Kergrohen, B. 2010 *Vautours et équarrissage dans les Grands Causses : SIG des pratiques et liaison à un modèle multi-agents*. Rapport de Master 1 Écologie, Biodiversité, Évolution, UPMC 2009-2010. Encadré par H. Dupont, R. Lorrillière, F. Sarrazin.

Thèses

Deygout, C. 2009. *Approvisionnement social et prévisibilité des ressources : modélisation du comportement des vautours ED ABIES*. AgroParisTech. Dir. Roger Arditi, Carmen Bessa Gomes.

Dupont H. (en préparation) *Modélisation multi-agents d'un service écosystémique, scénarios de systèmes d'équarrissage par des rapaces nécrophages*. ED Frontière du Vivant. ENS. Dir. F. Sarrazin, S. Bobbé.

ANNEXE : PUBLICATIONS

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PARUES

- Bobbé S. 2009 - Eleveurs et protecteurs, des intérêts partagés. Autour d'une expérience d'équarrissage naturel, in Capucine Crosnier, Jean-Paul Chassany (eds), *Les grands Causses. Terre d'expériences*, Millau, Ed. Parc national des Cévennes: 209-15.
- Bobbé S. 2009 - Du bon usage de l'animal sauvage. Exemple d'un mode d'équarrissage écologique, *L'animal sauvage entre nuisance et patrimoine, France, XVIe-XXIe siècle*, in Stéphane Frioux, Emilie-Anne Pépy (eds), Paris, Ecole Normale Supérieure: 22-31.
- Deygout, C., Gault, A., Sarrazin, F., & Bessa-Gomes, C. 2009 - Modeling the impact of feeding stations on vulture scavenging service efficiency. *Ecological Modelling*. 220 : 1826-1835.
- Sarrazin, F. 2009 – La réintroduction du vautour fauve. in Capucine Crosnier, Jean-Paul Chassany (eds), *Les grands Causses. Terre d'expériences*, Millau, Ed. Parc national des Cévennes: 89-94.
- Deygout, C., Gault, A., Duriez, O., Sarrazin, F., & Bessa-Gomes, C. 2010 - Impact of food predictability on social facilitation by foraging scavengers. *Behavioral Ecology*. 21 : 1131-1139.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES À PARAÎTRE

- Dupont, H., Mihoub, J.B., Becu, N., & Sarrazin, F. (sous presse) Modelling interactions between scavenger behaviour and farming practices: Impacts on scavenger population and ecosystem service efficiency. *Ecological Modelling*.
- Bobbé S., L'agropastoralisme au service de la biodiversité. Exemple d'un mode d'équarrissage écologique, Nature Science Société (en révision)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PRÉVUES

- Dupont, H., Bobbé, S., Sarrazin F. Assessing benefits of an ecosystem service according to various strategies: the case of vulture scavenging service and farmers carcass disposal practices.
- Sarrazin, F., Dupont, H., Bessa Gomes, C., Bobbé, S., Buronfosse-Roque, F., Deygout, C., Duriez, O., Néouze, R. & Mihoub, J.B. Ecological service is the third piece fixing the puzzle of European vulture conservation: a reply to Margalida et al. En préparation pour *Journal of Applied Ecology*.
- Bobbé, S., Dupont, H., Sarrazin, F., Bessa Gomes, C., Buronfosse-Roque, F. Les vautours, des auxiliaires de l'éleveur pour les pratiques d'équarrissage. En préparation pour *Fourrages*.