



**Action 3.1.4 : Modélisation des habitats du
lagopède alpin (*Lagopus mutus*) et de la perdrix
grise (*Perdix perdix*) et cartographie de l'habitat de
reproduction**



Assu Gil-Tena, Dani Villero, Laura Juárez et Lluís Brotons



Unión Europea

Fondo Europeo de
Desarrollo Regional

Antécédents

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'action 3.1.4 du projet GALLIPYR « Réseau Pyrénéen des Galliformes de Montagne » (qui compte 10 partenaires de France, Espagne et Andorre et dont FORESPIR est le Chef de file), visant à créer un réseau de suivi des galliformes de montagne et à améliorer l'habitat et les populations de ces espèces de manière concertée, entre les différents territoires situés de part et d'autre des Pyrénées. Le principal objectif de cette action consiste à produire des modèles d'habitat de reproduction du lagopède alpin (*Lagopus mutus*) et de la perdrix grise (*Perdix perdix*) dans différentes zones des Pyrénées pour lesquelles des informations de type faunistique et environnemental sont disponibles.

Un diagnostic préalable de la situation a permis de mettre en évidence que la cartographie actuellement disponible concernant ces deux espèces était limitée et disponible à des échelles très grandes et peu adaptées dans le contexte de la conception et de l'application de mesures de gestion des espèces (Atlas des oiseaux reproducteurs de Catalogne, France, Espagne et Andorre). Cependant, des techniques de modélisation de la distribution des espèces basées sur le rapport entre les données spatiales de distribution des espèces et les données environnementales (couches d'informations géographiques, images satellites, etc.) ont été développées ces dernières années, afin de générer des modèles prédictifs d'habitat. Les modèles d'habitat présentent l'avantage de pouvoir être utilisés à des résolutions spatiales adaptées aux exigences de gestion et de planification de la biodiversité, en permettant des extrapolations continues d'un indice de qualité de l'habitat ou de probabilité d'apparition pour l'ensemble du territoire étudié, y compris les zones pour lesquelles peu d'informations sont disponibles concernant l'espèce en question. Dans ce sens, il convient de souligner que de nombreuses observations de nature locale ont été recueillies ces dernières années concernant le lagopède alpin et la perdrix grise, auxquelles viennent s'ajouter les données rassemblées de manière standardisée dans le cadre du projet GALLIPYR. Ces données biologiques, ajoutées au développement progressif de données environnementales par des systèmes d'information géographique toujours plus précis, permettent de développer des modèles prédictifs de distribution des espèces, avec une résolution géographique adaptée au contexte de la conservation de la biodiversité.

Le présent document décrit les processus réalisés dans le cadre de l'action 3.1.3.4, et détaille les modèles d'habitat de reproduction obtenus pour le lagopède alpin et la perdrix grise.

Objectif

L'objectif général du présent travail consiste à produire des modèles potentiels d'habitat de reproduction pour le lagopède alpin et la perdrix grise dans différentes zones des Pyrénées, à partir des informations disponibles en matière de distribution de ces deux espèces et de variables environnementales susceptibles de conditionner ladite distribution. Pour cela, les objectifs spécifiques suivants ont été définis :

- Compilation de données sur la distribution et l'abondance de ces deux espèces, et développement d'une base de données géoréférencée structurant de manière homogène l'ensemble des informations rassemblées.
- Obtention des variables environnementales appropriées concernant la distribution des deux espèces.
- Développement de modèles prédictifs d'habitat de reproduction pour le lagopède alpin et la perdrix grise dans les Pyrénées, en adaptant l'étendue et la résolution de l'analyse aux exigences de gestion applicables dans le cadre du projet GALLIPYR.
- Définition des zones appropriées pour les espèces, à partir des modèles de qualité de l'habitat.

Données de distribution des espèces

Les informations relatives à la distribution et à l'abondance des espèces constituent le principal facteur de limitation au moment de définir des objectifs et des méthodes pour le développement de modèles prédictifs de distribution : en effet, outre le fait de devoir être présentes en quantité suffisante, il est recommandé que ces dernières soient représentatives des territoires géographiques et des processus écologiques objet de l'étude. Par exemple : si nous souhaitons développer des modèles prédictifs des zones de nidification d'un oiseau précis et que nous ne disposons d'aucun échantillon représentatif d'un territoire bien défini de ces zones, nous pourrions difficilement en déduire des relations statistiques nous permettant de prédire les modes de nidification de l'espèce en question.

Ainsi, pour développer des modèles prédictifs de la distribution du *Lagopus mutus* et de la *Perdix perdix*, il est nécessaire de disposer d'informations détaillées concernant la présence et l'abondance de ces deux espèces, de préférence compilées à partir de méthodes standardisées (par exemple, dans le cadre du suivi des populations).

Le tableau 1 contient les champs d'information nécessaires et suffisants pour documenter lesdites informations. Il convient de remarquer que, pour faciliter l'interprétation et l'utilisation des données, en plus de renseigner le plus grand nombre de champs possible, il est recommandé d'indiquer la source de l'information.

Lors d'une première phase du projet, des informations sur les espèces, basées sur ces directives, ont été demandées aux partenaires participant au projet GALLIPYR. Les informations obtenues pour chaque espèce figurent dans les paragraphes relatifs à la modélisation de chacune d'entre elles.

Tableau 1. Types d'informations nécessaires pour documenter la présence et l'abondance des espèces.

Type	Description	Exemple
ESPECE	Nom scientifique de l'espèce	<i>Perdix perdix</i>
LATITUDE	Latitude géographique	377060
LONGITUDE	Longitude géographique	4650750
SYSTEME DE COORDONNEES	Système de référencement utilisé pour la prise de coordonnées géographiques	ED1950 UTM31N
LOCALITE	Toponyme de la localité où il y a eu observation	Solsona
DATE	Date d'observation (jj/mm/aaaa)	15/08/2008
AUTEUR	Auteur de l'observation	Dani Villero
METHODE	Méthode utilisée pour l'observation	Itinéraire
TYPE DE DONNEES	Unité de mesure utilisée par cette méthode (présence, individus/ha, IQA, etc...)	Présence
VALEUR	Nombre d'exemplaires observés. En cas de données de présences : présence = 1; absence = 0.	0

Type	Description	Exemple
ETAT	Stade développement ou sexe des exemplaires observées (mâle, femelle, adulte, jeune, etc...)	
COMMENTAIRE	Information complémentaire de l'observation	
SOURCE	Référence bibliographique du projet	Villero, D. 2008 Etude de la perdrix grise à Solsona. CTFC. Informe Inédito
ETABLISSEMENT	Etablissement qui a fourni l'information	CTFC

Variables environnementales

Afin de générer des modèles prédictifs de distribution des espèces, il est nécessaire de disposer d'informations environnementales au format SIG, permettant d'analyser les patrons géographiques des informations faunistiques disponibles depuis une perspective écologique. Par conséquent, la sélection des variables environnementales constitue un autre aspect crucial au moment d'envisager des exercices de modélisation. Le processus d'identification des variables environnementales a inclus une révision bibliographique, ainsi que la consultation et la discussion avec des experts.

Afin d'obtenir des variables environnementales homogènes pour l'ensemble des Pyrénées, deux sources principales d'informations ont été sélectionnées :

- WorldClim (Hijmans et al. 2005), qui comprend des données climatiques et topographiques (accès aux données sur www.worldclim.org)
- *Corine Land Cover* 2000 (ETC/LUSI 2007), qui comprend des données de catégorisation des différentes utilisations du sol (accès aux données à l'adresse www.eea.europa.eu)

Ces deux sources proposent des données au format de cartes Raster, mais avec des résolutions géographiques différentes : WorldClim utilise une résolution de 1 x 1 km et *Corine Land Cover* (CLC) de 100 x 100 m. Afin d'homogénéiser la résolution à 1 x 1 km, la carte CLC a été transformée en autant de cartes Raster que d'unités comprises dans la légende Corine, avec des informations quantitatives concernant le recouvrement de chaque utilisation du sol par chaque pixel de 1 x 1 km.

Il convient également de souligner que la carte CLC ne contient aucune information concernant l'Andorre, dans la mesure où cette dernière ne fait pas partie de l'UE. Afin de combler cette carence, la Carte digitale des habitats d'Andorre (*Mapa Digital dels Habitats d'Andorra*) (IEA 2001) reclassifiée selon la légende CLC (Tableau 3. Correspondance entre la légende de la *Carte Digitale des Habitats d'Andorre* (42 catégories) et la légende *Corine Land Cover*.) a été utilisée. Une fois reclassifiée, la carte a été utilisée pour compléter le territoire andorran, avant l'homogénéisation de la résolution de la carte CLC à 1 x 1 km.

Le processus de sélection des variables environnementales pour le développement de modèles d'habitat pour le lagopède alpin et la perdrix grise est détaillé dans les paragraphes consacrés à la modélisation de chaque espèce.

Tableau 2. Catégories d'utilisation du sol selon la légende *Corine Land Cover*.

CODE CORINE	USAGE DU SOL
1	<i>Continuous urban fabric</i>
2	<i>Discontinuous urban fabric</i>
3	<i>Industrial or commercial units</i>
4	<i>Road and rail networks and associated land</i>
5	<i>Port areas</i>
6	<i>Airports</i>
7	<i>Mineral extraction sites</i>
8	<i>Dump sites</i>
9	<i>Construction sites</i>
10	<i>Green urban areas</i>
11	<i>Sport and leisure facilities</i>
12	<i>Non-irrigated arable land</i>
13	<i>Permanently irrigated land</i>
14	<i>Rice fields</i>
15	<i>Vineyards</i>
16	<i>Fruit trees and berry plantations</i>
17	<i>Olive groves</i>
18	<i>Pastures</i>
19	<i>Annual crops associated with permanent crops</i>
20	<i>Complex cultivation patterns</i>
21	<i>Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation</i>
22	<i>Agro-forestry areas</i>
23	<i>Broad-leaved forest</i>
24	<i>Coniferous forest</i>
25	<i>Mixed forest</i>
26	<i>Natural grasslands</i>
27	<i>Moors and heathland</i>
28	<i>Sclerophyllous vegetation</i>
29	<i>Transitional woodland-shrub</i>
30	<i>Beaches, dunes, sands</i>
31	<i>Bare rocks</i>
32	<i>Sparse vegetated areas</i>
33	<i>Burnt areas</i>
34	<i>Glaciers and perpetual snow</i>
35	<i>Inland marshes</i>
36	<i>Peat bogs</i>
37	<i>Salt marshes</i>
38	<i>Salines</i>
39	<i>Intertidal flats</i>
40	<i>Water courses</i>
41	<i>Water bodies</i>
42	<i>Coastal lagoons</i>
43	<i>Estuaries</i>
44	<i>Sea and ocean</i>

Tableau 3. Correspondance entre la légende de la *Carte Digitale des Habitats d'Andorre* (42 catégories) et la légende *Corine Land Cover*.

CODE LLHA	HABITATS	CODE CORINE
01	<i>Aigües estagnants</i>	41
02	<i>Aigües corrents</i>	40
03	<i>Abarsetars o neretars</i>	27
04	<i>Landes i matollars baixos de l'alta muntanya</i>	27
05	<i>Boixedes i bardisses</i>	27
06	<i>Balegars</i>	27
07	<i>Vegetació de clarianes i bosquines d'arbres caducifolis joves</i>	29
08	<i>Ginebreds montanes</i>	27
09	<i>Avellanoses</i>	27
10	<i>Savinoses</i>	28
11	<i>Argelaguers</i>	29
12	<i>Pastures montanes calcícoles</i>	18
13	<i>Pastures montanes acidòfiles</i>	18
14	<i>Congesteres</i>	34
15	<i>Pastures de pel caní</i>	18
16	<i>Pastures de gesp (Festuca eskia)</i>	18
17	<i>Pastures de sudorn (Festuca paniculata s.l.)</i>	18
18	<i>Pastures de l'alta muntanya acidòfiles, amb Festuca airoides, Festuca yvesii o Carex curvula</i>	18
19	<i>Pastures de l'alta muntanya, calcícoles</i>	18
20	<i>Prats de dall</i>	26
21	<i>Herbassars higròfils</i>	26
22	<i>Herbassars ruderals de l'alta muntanya</i>	26
23	<i>Molleres o potamolls</i>	36
24	<i>Rouredes de roure martinenc</i>	23
25	<i>Rouredes de roure de fulla grossa</i>	23
26	<i>Boscós mixts, freixenedes, bedollars i tremoledes</i>	23
27	<i>Avetoses i pinedes amb avets</i>	24
28	<i>Pinedes de pi negre mesòfiles</i>	24
29	<i>Pinedes de pi negre xeròfiles, i repoblacions.</i>	24
30	<i>Pinedes de pi roig mesòfiles</i>	24
31	<i>Pinedes de pi roig xeròfiles i repoblacions</i>	24
32	<i>Boscós mixts de caducifolis i coníferes</i>	25
33	<i>Àrees desforestades</i>	32
34	<i>Boscós i bosquines de ribera</i>	23
35	<i>Carrascars</i>	23
36	<i>Boscós mixts de carrasca i/o roures i/o pi roig</i>	25
37	<i>Roques calcàries</i>	31
38	<i>Roques silícies i terraprims</i>	31
39	<i>Tarteres calcàries</i>	31
40	<i>Tarteres silícies</i>	31
41	<i>Conreus</i>	22
42	<i>Àrees urbanes i industrials</i>	1

Modélisation de l'habitat du lagopède alpin

Les informations compilées pour ce travail comprenaient un grand nombre de sources de nature différente concernant la zone des Pyrénées située en Catalogne et en Andorre (sources gouvernementales, d'organismes officiels et bases de données disponibles en ligne), représentant différents types d'échantillonnage d'observations fortuites. Par conséquent, les informations recueillies représentent une bonne couverture en matière de distribution réelle de l'espèce dans la zone catalano-andorrane du massif pyrénéen.

Compte tenu du caractère général du modèle et du territoire géographique étudié (Pyrénées), il a été jugé opportun de travailler avec une résolution équivalente à 1 km sur des coordonnées géographiques de longitude et de latitude (0,0083°), cette résolution correspondant à celle des informations environnementales relatives au climat et aux utilisations du sol.

Données de distribution géographique

Afin de représenter les informations compilées à partir des différents types d'échantillonnage, il est nécessaire de réaliser un criblage exhaustif et systématique des informations compilées afin de garantir la représentativité des données et d'éviter des biais dus aux différences d'échantillonnage. Les données compilées ont été intégrées à une base de données contenant, outre les coordonnées géographiques permettant le géoréférencement des observations, d'autres métadonnées relatives à la période et au lieu de réalisation de l'observation, la source des données, leur auteur, le recours ou non à un échantillonnage et si oui, son type, le type de données compilées concernant l'espèce, etc. (voir Tableau 1).

En ce qui concerne la Catalogne, les informations relatives aux recensements ont été fournies par le Gouvernement (2009-2010) et l'Institut Català d'Ornitologia (Institut catalan d'ornithologie) (données de l'Atlas d'Ocells Nidificants de Catalunya (Atlas des oiseaux nidificateurs de Catalogne) 1999-2002) et complétées par l'équipe technique du CTFC à partir des données disponibles sur le site ornitho.cat (relevés d'observations d'oiseaux à l'échelle de la Catalogne sur la période 2002-2010). Ces informations ont été complétées à l'aide des informations fournies par le Gouvernement d'Andorre pour les recensements réalisés sur la période 2007-2009.

Le nombre total d'observations recueilli a été de 86, 32 correspondant au suivi réalisé par le Gouvernement de Catalogne, 23 à des recensements réalisés par le Gouvernement d'Andorre, et le reste à l'Atlas d'Ocells nidificants de Catalunya (Atlas des oiseaux nidificateurs de Catalogne) 1999-2002 (n=7) ainsi qu'au site Internet ornitho.cat (n=24). Afin de compenser les biais géographiques des données dus à des différences d'intensité d'échantillonnage liées à l'origine des données, les observations séparées d'un dixième de degré de longitude ont été sélectionnées au hasard, permettant ainsi de configurer un sous-échantillon de 20 relevés afin de calibrer le modèle de distribution potentielle du lagopède alpin (Figure 1).

Variables environnementales

Le lagopède alpin fréquente des altitudes moyennes non inférieures à 2 000 m, peuplant les pâturages de haute montagne, les névés et les pierriers, ainsi que les formations broussailleuses des zones supraforestières. En raison des restrictions de disponibilité des variables environnementales d'habitat pour l'ensemble de la zone des Pyrénées (territoire

espagnol et français), les facteurs environnementaux conditionnant la nidification identifiés comme appropriés dans la bibliographie relative à l'espèce, dans les Pyrénées, ont été réduits à ceux indiqués dans le Tableau 4.

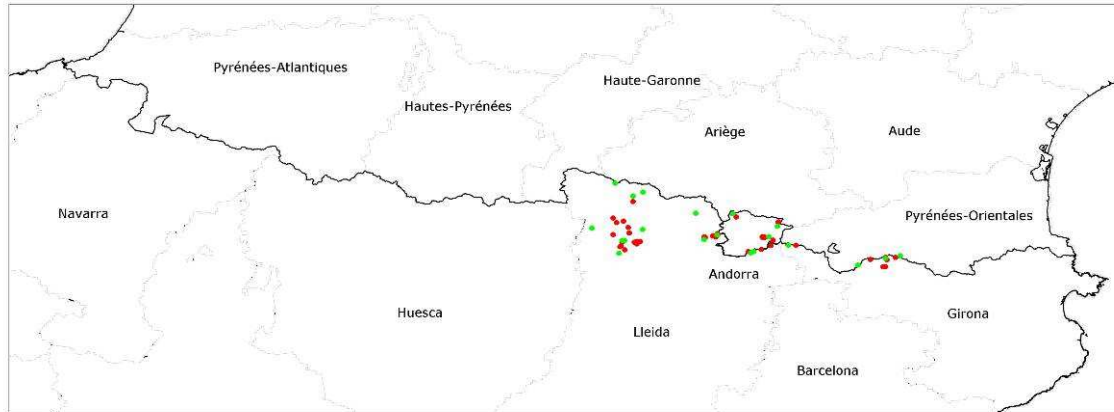


Figure 1. Données relatives au lagopède alpin (*Lagopus mutus*). Les données compilées figurent en rouge, et les données utilisées pour calibrer le modèle de qualité de l'habitat figurent en vert.

Tableau 4. Variables environnementales utilisées pour le modèle d'habitat potentiel du lagopède alpin dans les Pyrénées.

VARIABLE	DESCRIPTION	SOURCE
Pâturages naturels	Recubrimiento de pastos naturales <i>Natural Grasslands</i>	
Landes mesophiles	Recouvrement de landes mésophiles <i>Moors and heathland</i>	
Landes	Recouvrement de landes <i>Transitional woodland-shrub</i>	Corine Land Cover 2000 (CLC2000) 100m v9 (EEA)
Rochers	Recouvrements de rochers <i>Bare Rocks</i>	
Zones ouvertes	Recouvrement de zones ouvertes <i>Sparse Vegetated Areas</i>	
Glaciers	Recouvrement de neige <i>Perpetual snow</i>	
Pluie annuelle	Cumul de pluie annuel	WorldClim - <i>Global Climate Data</i> (http://www.worldclim.org)
Temp Min janvier	Temperature minimale de janvier	
Temp Max juillet	Temperature maximale de juillet	
Altitude	Altitude	

Développement de modèles d'habitat

Le modèle généré pour les données sur le lagopède alpin dans les Pyrénées a été calibré à l'aide des données disponibles et a été ultérieurement projeté pour l'ensemble des Pyrénées, afin d'examiner la possible distribution de l'espèce sur l'ensemble du massif. La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel Maxent, qui permet de modéliser la distribution des espèces à partir de données de présence uniquement ; cet outil est particulièrement recommandé lorsque la taille de l'échantillon de l'espèce objet de l'étude est réduite, comme c'est ici le cas (Phillips et al. 2006). Afin d'évaluer le modèle obtenu, un processus d'évaluation croisée a été appliqué, selon lequel 30 % des données ont été mises de côté afin d'évaluer le modèle généré par rapport aux 70 % restants. Ce processus d'évaluation a été réalisé 10 fois et a été complété par une évaluation experte de la représentativité de la cartographie obtenue. La valeur statistique utilisée a été l'aire sous la courbe (AUC en anglais) d'un graphique ROC (Receiver Operating Characteristic). Cette valeur varie entre 0,5 (le modèle n'est pas capable de différencier les zones caractérisées par une présence de l'espèce d'une meilleure manière qu'un processus aléatoire) et 1 (qui indiquerait un modèle d'une capacité de discrimination parfaite).

Qualité de l'habitat potentiel du lagopède alpin dans les Pyrénées

Le résultat obtenu lors de l'évaluation a été de **AUC=0,942**. Cette valeur nous indique que le modèle dispose d'une capacité excellente pour prédire les données mises de côté pour évaluer le modèle. De plus, les zones prédites par le modèle comme étant adaptées pour l'espèce coïncident également avec celles dans lesquelles cette dernière a été recensée dans les échantillonnages de l'Atlas des oiseaux reproducteurs d'Espagne (voir Figure 2).

En ce qui concerne la réponse aux variables environnementales, il convient d'indiquer que les variables de climat et d'altitude ont été celles ayant le plus pesé sur le modèle, tandis que les variables d'habitat ont contribué très faiblement à l'ajustement de ce dernier, en raison probablement de leur basse résolution (Figure 3).

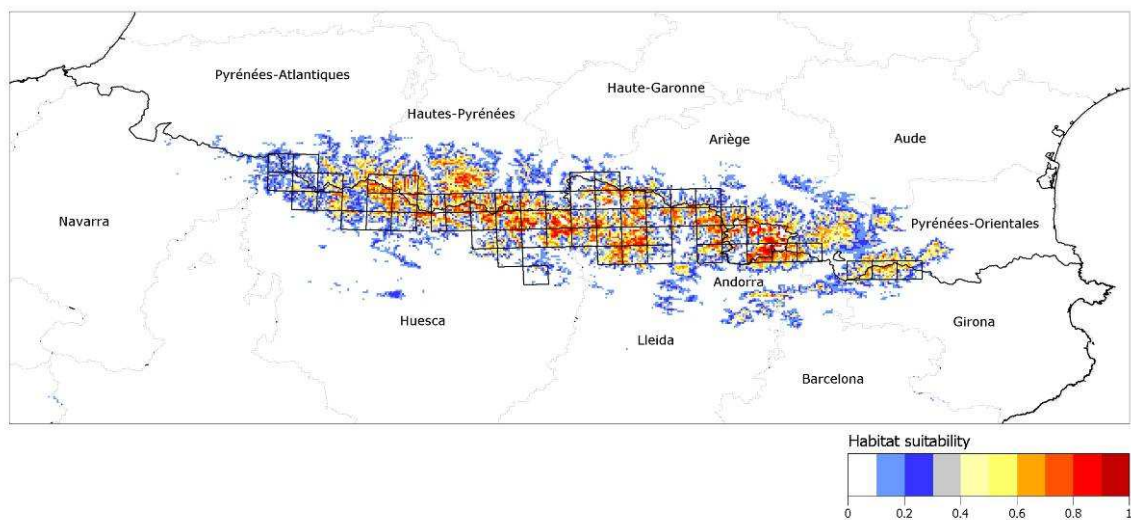


Figure 2. Modèle de qualité de l'habitat du lagopède alpin (*Lagopus mutus*) dans les Pyrénées. Les quadrillages représentent la présence de l'espèce (quadrillages UTM de 10 x 10 km) selon l'Atlas des oiseaux reproducteurs d'Espagne (Martí and Moral 2003).

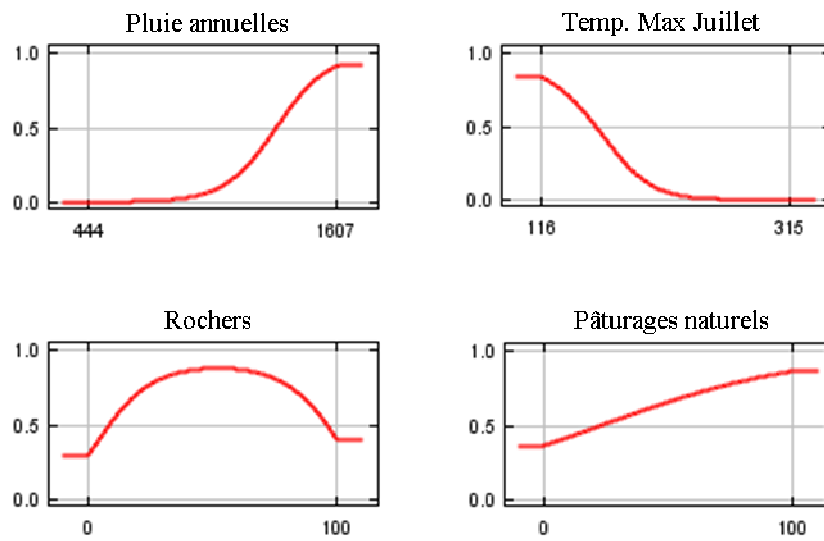


Figure 3. Courbes de réponse des variables environnementales ayant contribué de la manière la plus significative au modèle du lagopède alpin (*Lagopus mutus*).

Modélisation de l'habitat de la perdrix grise

Les informations compilées pour ce travail comprennent un grand nombre de sources de nature différente (sources gouvernementales, organismes officiels, révisions bibliographiques, bases de données disponibles en ligne, etc.), représentant différents types d'échantillonnage, ainsi que des observations fortuites. Cependant, il est fait état qu'il existe réellement une plus grande couverture effective en ce qui concerne la surveillance de l'espèce dans le massif pyrénéen. Face à l'absence de réponse aux demandes réitérées de données formulées auprès des agents directement impliqués dans le suivi et la surveillance de l'espèce, des analyses exploratoires préalables ont été menées afin de déterminer la capacité des données compilées jusqu'à présent à prédire la distribution potentielle de l'espèce dans les Pyrénées.

Compte tenu du caractère général du modèle et du territoire géographique étudié (Pyrénées), il a été jugé opportun de travailler avec une résolution équivalente à 1 km sur des coordonnées géographiques de longitude et de latitude (0,0083°), cette résolution correspondant à celle des informations environnementales relatives au climat et aux utilisations du sol.

Données de distribution géographique

Comme cela déjà été montré, les informations compilées comprennent différentes sources de nature différente, représentant différents types d'échantillonnages, y compris des observations fortuites. Par conséquent, afin de garantir la représentativité des données et d'éviter des biais dus à l'échantillonnage, un criblage exhaustif systématique des informations compilées a été réalisé. Les données compilées ont été intégrées à une base de données contenant, outre les coordonnées géographiques permettant le géoréférencement des observations, d'autres métadonnées relatives à la période et au lieu de réalisation de l'observation, la source des données, leur auteur, le recours ou non à un échantillonnage et si oui, son type, le type de données compilées concernant l'espèce, etc. (voir Tableau 1).

Ainsi, en ce qui concerne la Catalogne (Lérida, Barcelone et Gérone), les informations relatives aux recensements ont été fournies par l'*Institut Català d'Ornitologia* (Institut catalan d'ornithologie) (Estrada et al. 2004) et complétées par l'équipe technique du CTFC, à partir des données disponibles sur le site *ornitho.cat* (relevés d'observations d'oiseaux à l'échelle de la Catalogne sur la période 2002-2010). En ce qui concerne les informations fournies pour les autres régions, les informations qu'il convient de souligner sont les données de *radiotracking* fournies par l'ONCFS pour le massif pyrénéen du Carlit (*Pyrénées-Orientales*) sur la période 1992-1998, celles fournies par le Gouvernement d'Andorre pour les recensements réalisés sur la période 2007-2009 et celles fournies par IKT S.A. pour les relevés historiques réalisés dans la province d'Alava pour la perdrix grise (1930-1940). De plus, grâce à IKT S.A., il a été possible d'accéder aux données relatives à la cordillère cantabrique (Asturies et León), obtenues à partir des observations réalisées par les agents ruraux de la région (Acevedo et al. 2007).

Le nombre total d'observations compilées a été de 2 227, dont 2 051 correspondaient au suivi réalisé par *radiotracking* dans le Carlit, 95 aux données de la zone cantabrique et 6 aux données historiques de la province d'Alava. Afin de compenser les biais géographiques des données dus à des différences d'intensité d'échantillonnage liées à l'origine des données, les observations séparées d'un dixième de degré de longitude ont été sélectionnées au hasard,

permettant ainsi de configurer un sous-échantillon de 37 relevés afin de calibrer le modèle pour le territoire des Pyrénées (Figure 4). De plus, les données disponibles pour les Asturies et León ($n=95$; Figure 4), qui obéissent à un échantillonnage homogène, ont été utilisées pour calibrer un modèle spécifique pour la cordillère cantabrique, ultérieurement projeté à l'échelle des Pyrénées, afin d'analyser les aires potentielles de distribution au Pays basque et en Navarre, où il est actuellement absent.

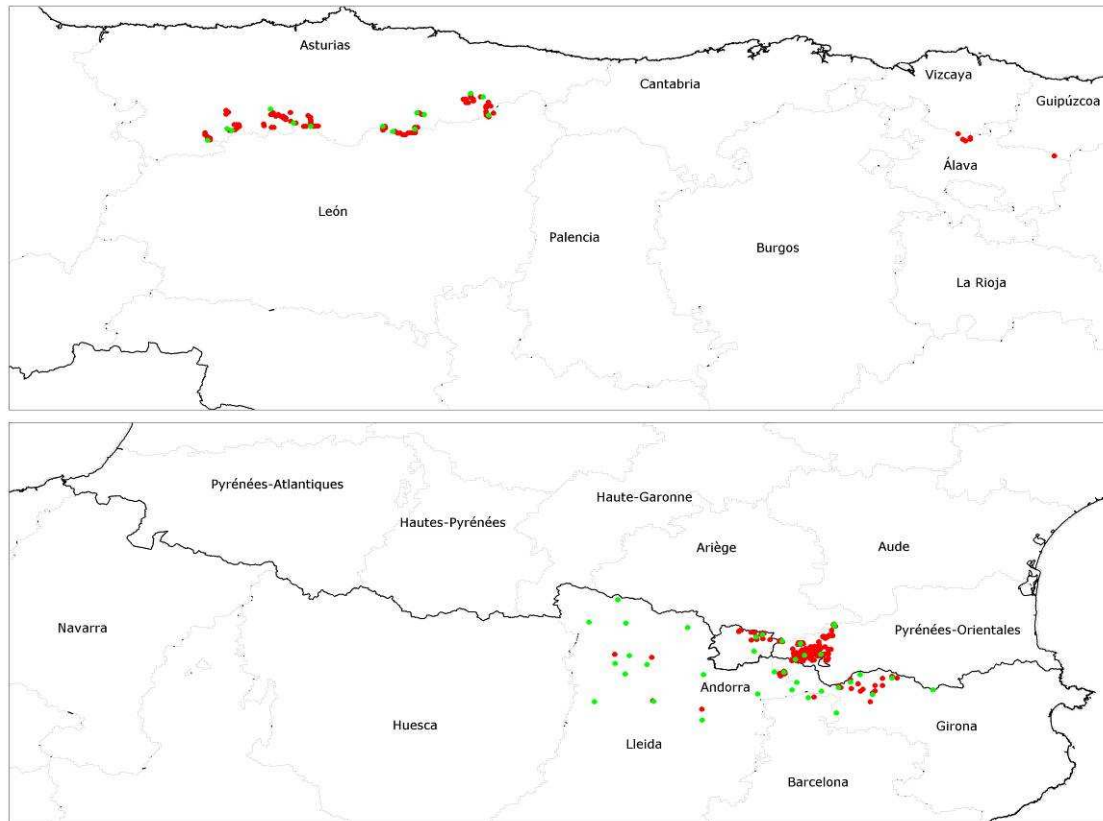


Figure 4. Données relatives à la perdrix grise (*Perdix perdix*). Les données compilées figurent en rouge, et les données utilisées pour calibrer le modèle de qualité de l'habitat figurent en vert. Les données compilées pour la cordillère cantabrique figurent dans la partie supérieure, et les données concernant les Pyrénées figurent dans la partie inférieure.

Variabes environnementales

Selon l'Atlas des oiseaux reproducteurs d'Espagne (Martí and Moral 2003), l'on trouve la perdrix grise à des altitudes supérieures à 1 100 m, tandis que l'Atlas de Catalogne indique que l'on trouve l'espèce entre 1 800 et 2 600 m (Estrada et al. 2004) ; il est possible que cette dernière donnée puisse être la plus adaptée à la distribution de l'espèce à l'échelle des Pyrénées. Ainsi, l'espèce atteint l'étage sub-alpin et peuple les zones broussailleuses de montagne, avec une préférence pour les zones alternant entre végétation dense et clairières. En raison des restrictions de disponibilité des variables environnementales d'habitat pour l'ensemble de la zone des Pyrénées (territoire espagnol et français), les facteurs environnementaux conditionnant la nidification identifiés comme appropriés dans la bibliographie relative à l'espèce, dans les Pyrénées, ont été réduits à ceux indiqués dans le Tableau 5.

Tableau 5. Variables environnementales utilisées pour le modèle d'habitat potentiel de la perdrix grise dans les Pyrénées.

VARIABLE	DESCRIPTION	SOURCE
Pâturages naturels	Recubrimiento de pastos naturales <i>Natural Grasslands</i>	Corine Land Cover 2000 (CLC2000) 100m v9 (EEA)
Landes mesophiles	Recouvrement de landes mésophiles <i>Moors and heathland</i>	
Landes	Recouvrement de landes <i>Transitional woodland-shrub</i>	
Zones ouvertes	Recouvrement de zones ouvertes <i>Sparsey Vegetated Areas</i>	
Pluie annuelle	Cumul de pluie annuel	WorldClim - <i>Global Climate Data</i> (http://www.worldclim.org)
Temp Min janvier	Temperature minimale de janvier	
Temp Max juillet	Temperature macimale de juillet	
Altitude	Altitude	

Développement de modèles d'habitat

Comme pour le cas du lagopède alpin, la modélisation de la perdrix grise dans les Pyrénées a également été réalisée à l'aide du logiciel Maxent. De plus, afin d'évaluer l'adéquation de la distribution potentielle de l'espèce dans la zone du Pays basque et de la Navarre (lieux dans lesquels l'espèce est actuellement absente), l'adéquation du modèle précédemment développé à partir des données disponibles au niveau du massif pyrénéen a été comparée à un autre modèle développé à partir des données disponibles à l'échelle de la Cantabrique (Asturies et León), pour pouvoir ainsi optimiser l'identification d'éventuelles zones de distribution. Ainsi, le premier modèle peut nous donner une idée de l'adéquation de l'habitat pour l'espèce dans le massif pyrénéen, du moins pour la zone pour laquelle on dispose de données de présence de l'espèce (Pyrénées orientales et centrales), tandis que le deuxième modèle prétend renforcer les résultats du modèle précédent dans la zone du massif pyrénéen dans laquelle l'espèce n'est actuellement pas présente, malgré quelques relevés historiques (zone du Pays basque et de Navarre). La différenciation entre les territoires est due au fait que les conditions selon lesquelles l'espèce est présente dans le massif pyrénéen et dans la cordillère cantabrique sont significativement différentes en raison de caractéristiques intrinsèques aux deux territoires. Dans chaque cas, les modèles générés pour la perdrix grise ont été uniquement calibrés à l'aide des données disponibles et ont été ultérieurement projetés pour l'ensemble des Pyrénées, afin d'examiner la possible distribution de l'espèce sur l'ensemble du massif. Ainsi, un processus d'évaluation croisée a été appliqué, selon lequel 30 % des données ont été mises de côté afin d'évaluer le modèle généré avec les 70 % restants. Ce processus d'évaluation a été réalisé 10 fois et a été complété par une évaluation experte de la représentativité de la cartographie obtenue.

Comme avec la modélisation précédente, la valeur statistique d'évaluation utilisée a été l'aire sous la courbe (« AUC », en anglais) d'un graphique ROC (Receiver Operating Characteristic). Cette valeur varie entre 0,5 (le modèle n'est pas capable de différencier les zones caractérisées par une présence de l'espèce d'une meilleure manière qu'un processus aléatoire) et 1 (qui indiquerait un modèle d'une capacité de discrimination parfaite).

Qualité de l'habitat potentiel de la perdrix grise dans les Pyrénées

Le résultat obtenu lors de l'évaluation a été de **AUC=0,844** pour le modèle correspondant aux données des Pyrénées. Cette valeur nous indique que le modèle dispose d'une bonne capacité prédictive sur la base des observations de l'espèce mises de côté pour évaluer le modèle. Ainsi, en ce qui concerne le territoire des Pyrénées, dans lequel la perdrix grise est présente, il existe également une coïncidence optimale entre les zones prédites par le modèle comme étant adaptées pour l'espèce et celles dans lesquelles cette dernière a été recensée lors d'échantillonnages précédents (voir Figure 5).

De même que pour le lagopède alpin, les variables environnementales déterminant l'adéquation de l'habitat de la perdrix grise dans les Pyrénées sont principalement les variables climatiques et d'altitude et, dans un moindre degré, les variables d'habitat. Parmi ces dernières, il convient de souligner l'effet favorable des pâturages naturels, tandis que le reste des variables d'habitat révèle une association inverse de faible pertinence (Figure 6).

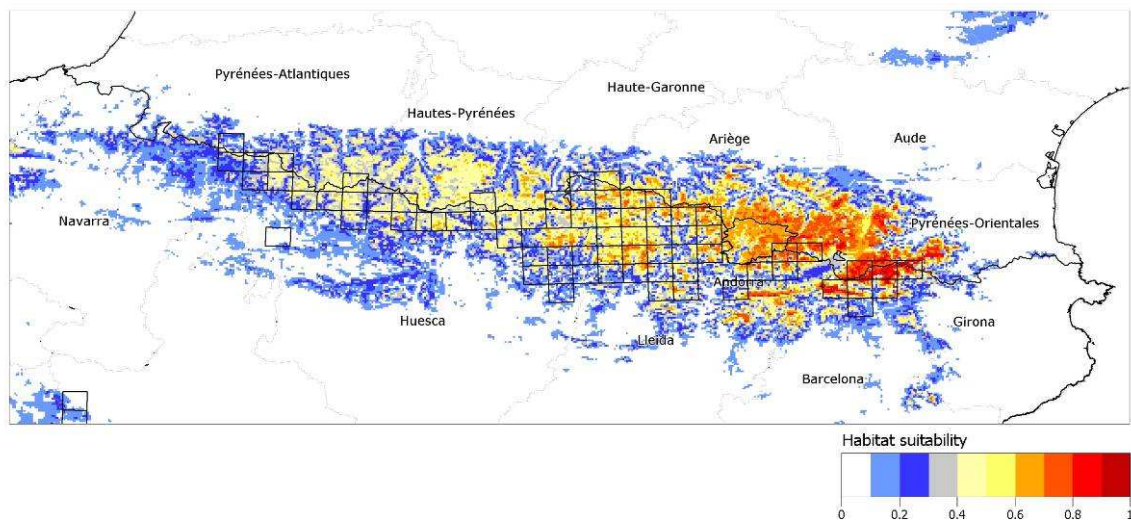


Figure 5. Modèle de qualité de l'habitat de la perdrix grise (*Perdix perdix*) dans les Pyrénées. Les quadrillages représentent la présence de l'espèce (quadrillages UTM de 10 x 10 km) selon l'Atlas des oiseaux reproducteurs d'Espagne (Martí and Moral 2003).

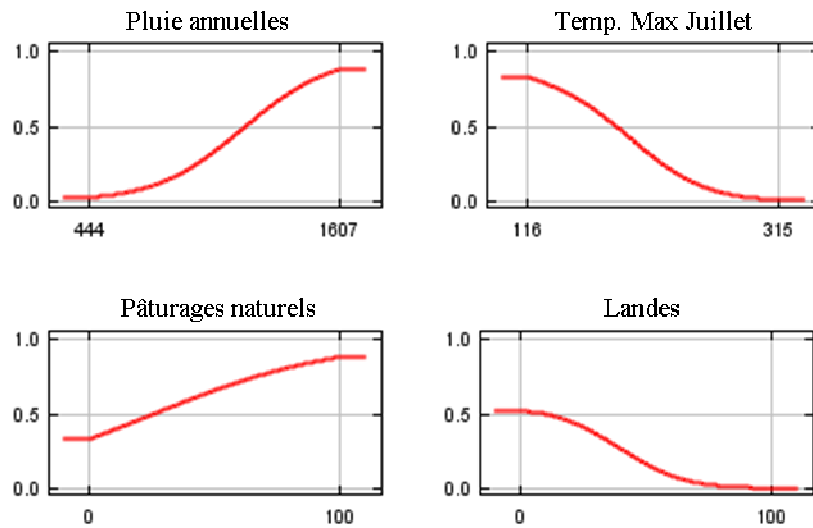


Figure 6. Courbes de réponse des variables environnementales ayant contribué de la manière la plus significative au modèle de la perdrix grise (*Perdix perdix*) dans les Pyrénées.

Qualité de l'habitat potentiel de la perdrix grise au Pays basque et en Navarre

Comme expliqué précédemment, afin d'évaluer la distribution potentielle de la perdrix grise dans la zone du Pays basque et de la Navarre (où elle est actuellement en état d'extinction), un modèle a également été réalisé à partir des données compilées pour la cordillère cantabrique. Ainsi, hormis le résultat du modèle précédemment exposé pour les Pyrénées (AUC=0,844), le résultat obtenu lors de l'évaluation du modèle cantabrique n'a pas amélioré le précédent, et obtenu un résultat de AUC=0,781. De sorte que le modèle développé pour cette zone (territoire cantabrique) dispose d'une capacité prédictive acceptable pour prédire les zones mises de côté pour évaluer le modèle. De même, les variables environnementales déterminant l'adéquation de l'habitat de la perdrix grise dans la cordillère cantabrique sont différentes de celles des Pyrénées, les broussailles mésophiles et les zones ouvertes, ainsi que l'altitude et les températures maximales annuelles, apparaissant comme des variables principales (Figure 8).

Selon la Figure 7, pour la zone d'Alava et notamment pour les zones de localisation des relevés historiques, les deux modèles signalent l'adéquation de l'habitat pour l'espèce. Cependant, la valeur de l'indice d'adéquation de l'habitat varie de manière significative en fonction du modèle utilisé. Ainsi, les valeurs pour le modèle Pyrénées présentent toujours un indice d'adéquation de l'habitat très inférieur à celui du modèle Cantabrique, bien que ces deux modèles coïncident dans les régions caractérisées par des valeurs d'adéquation de l'habitat supérieures (Figure 7). Il convient d'ajouter à cette disparité des résultats la différence de capacité prédictive des modèles, qui est acceptable pour le modèle Cantabrique et bonne pour le modèle Pyrénées, et qui devra être améliorée dans les deux cas, et notamment pour les Pyrénées, région objet de l'étude.

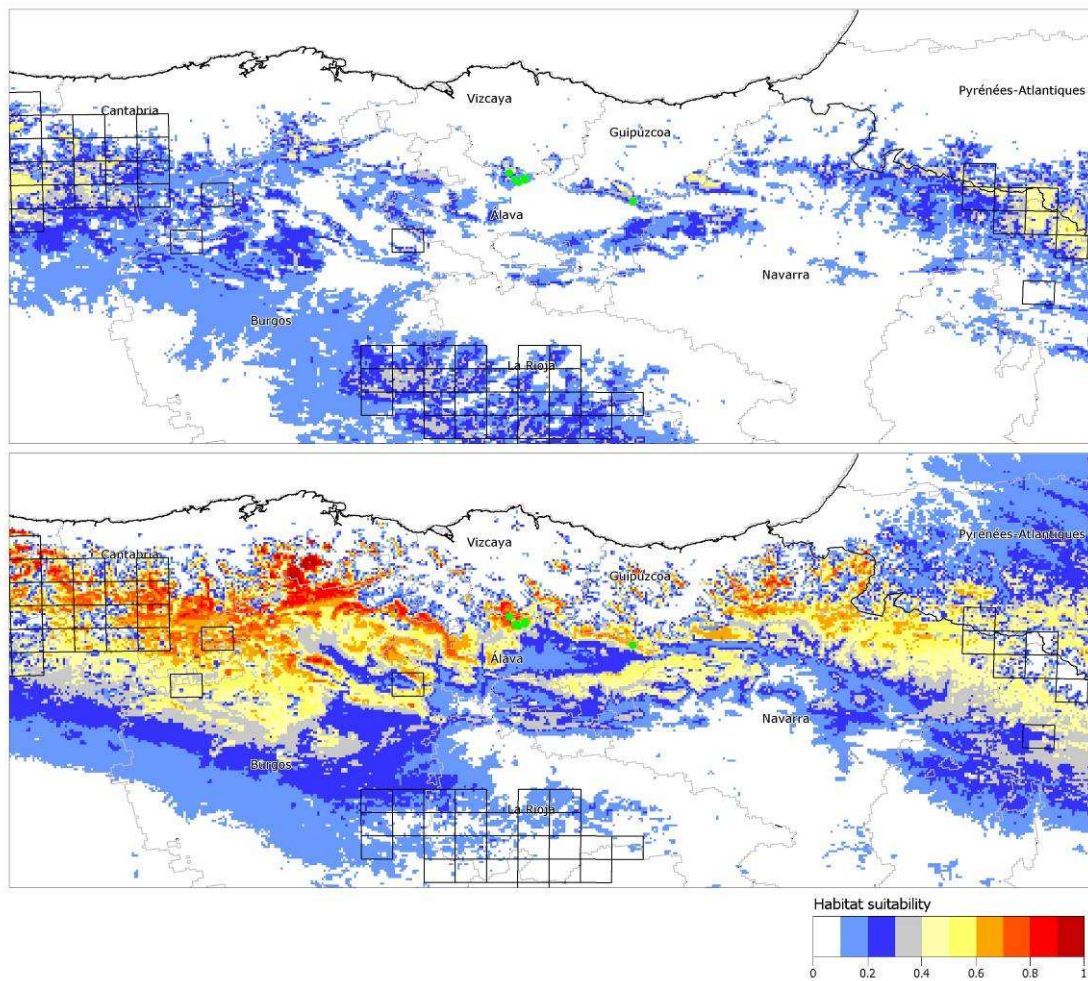


Figure 7. Modèles de qualité de l'habitat de la perdrix grise (*Perdix perdix*) des Pyrénées (en haut) et de Cantabrique (en bas) dans la zone du Pays basque et de la Navarre. Les points verts indiquent les relevés historiques réalisés dans la province d'Alava et les quadrillages représentent la présence de l'espèce dans des quadrillages UTM de 10 x 10 km, selon l'Atlas des oiseaux reproducteurs d'Espagne (Martí and Moral 2003).

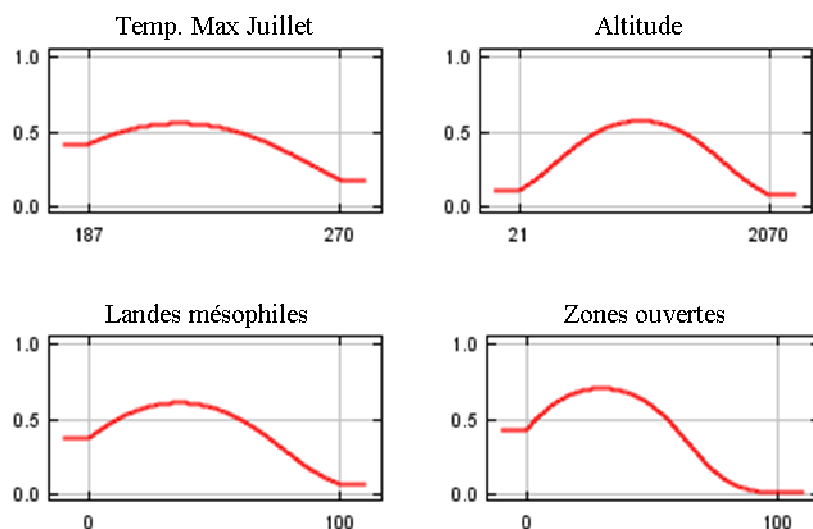


Figure 8. Courbes de réponse des variables environnementales ayant contribué de la manière la plus significative au modèle de la perdrix grise (*Perdix perdix*) en Cantabrique.

Zones appropriées pour le lagopède alpin et la perdrix grise dans les Pyrénées

Les modèles prédictifs révèlent le degré d'adéquation du territoire à l'aide d'un indice de qualité de l'habitat reflétant les rapports entre les espèces et les variables environnementales conditionnant leur distribution géographique. Afin d'améliorer l'utilisation de modèles comme outils de support à la conservation de la biodiversité et à la gestion du territoire, il est important de caractériser la pertinence des différentes zones peuplées par les espèces.

Il existe différentes méthodologies permettant de définir les zones appropriées à partir de modèles de qualité de l'habitat. Aux effets du présent travail, nous utiliserons la méthodologie développée dans le cadre du projet CARTOBIO sur la cartographie des espèces devant faire l'objet d'une conservation prioritaire en Catalogne (Brotons et al. 2008), étant donné qu'il s'agit d'une méthodologie objective basée sur des critères écologiques et contrastée par d'autres applications (ex : l'identification de zones d'habitat adapté pour les différents oiseaux au sein des Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux (IBA, *Important Bird Areas*, en anglais) de Secans de Lleida et de Cogul-Alfés (Bota et al. 2008), ou la définition de ZICO marines en Espagne (Arcos et al. 2009)).

Cette méthodologie propose l'identification de trois niveaux de zones appropriées, en fonction du degré de qualité de l'habitat moyen qu'elles offrent. Ces trois niveaux sont :

- **Zones adaptées** : zones bénéficiant d'une qualité d'habitat très basse, dans lesquelles la présence de l'espèce est résiduelle ou faiblement abondante.
- **Zones de bonne qualité** : zones bénéficiant d'une qualité d'habitat au-dessus de la moyenne des zones adaptées, dans lesquelles la présence de l'espèce est fréquente ou modérément abondante.
- **Zones optimales** : Zones bénéficiant d'une qualité d'habitat au-dessus de la moyenne des zones de bonne qualité, et, par conséquent, dotée de meilleures conditions environnementales sur le territoire étudié, dans lesquelles la présence de l'espèce peut être très abondante.

D'une manière générale, les zones adaptées se définissent comme les zones disposant d'une qualité d'habitat supérieure à la moyenne de 10 % des lieux (connaissant une présence de l'espèce) caractérisés par un habitat de la qualité la plus basse. Les zones de bonne qualité sont les zones dont la qualité de l'habitat se situe au-dessus de la moyenne des zones adaptées ; les zones optimales sont les zones dont la moyenne est supérieure à celle des zones de bonne qualité. La Figure 9 représente les seuils de définition des trois niveaux de zones appropriées.

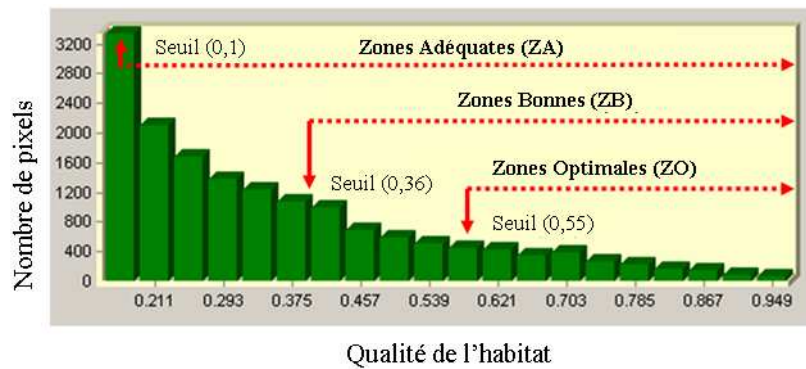


Figure 9. Histogramme du modèle de qualité de l'habitat du lagopède alpin pour les zones adaptées (ZA). La moyenne de ces zones correspond à un indice de qualité de l'habitat égal à 0,36, qui est le seuil délimitant les zones de bonne qualité (ZB), tandis que la moyenne de la qualité de l'habitat des ZB est égale à 0,55, qui est le seuil de définition des zones optimales(ZO).

Zones appropriées pour le lagopède alpin dans les Pyrénées

La définition des zones appropriées du modèle de qualité de l'habitat du lagopède alpin dans les Pyrénées a permis de dégager les seuils suivants : Zones adaptées 0,1, Zones de bonne qualité 0,36 et Zones optimales 0,55. La Figure montre le zonage en découlant et le Tableau 6 résume la superficie des zones appropriées dans différentes régions des Pyrénées.

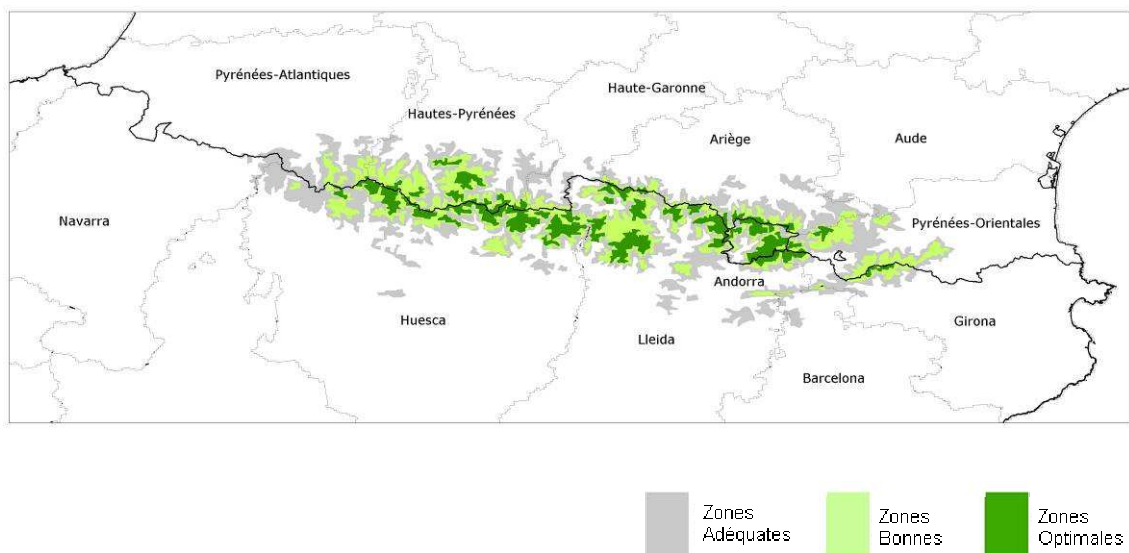


Figure 10. Zones appropriées pour le lagopède alpin (*Lagopus mutus*) dans les Pyrénées

Tableau 6. Superficie des zones appropriées pour le lagopède alpin (*Lagopus mutus*) dans différentes régions des Pyrénées. La superficie est exprimée en hectares, tandis que le pourcentage par rapport au total de chaque type de zone est exprimé entre parenthèses.

REGION	ZONES ADEQUATES	ZONES BONNES	ZONES OPTIMALES
Pyrénées-Orientales	95.770 (9,7%)	43.208 (9,9%)	4.582 (2,9%)
Aude	6.223 (0,6%)	266 (0,1%)	0 (0%)
Hautes-Pyrénées	146.969 (14,9%)	75.978 (17,4%)	20.710 (13,1%)
Haute-Garonne	24.112 (2,4%)	5.824 (1,3%)	115 (0,1%)
Ariège	97.550 (9,9%)	27.460 (6,3%)	7.663 (4,8%)
Pyrénées-Atlantiques	57.046 (5,8%)	12.963 (3%)	664 (0,4%)
Andorra	37.692 (3,8%)	28.717 (6,6%)	18.833 (11,9%)
Lleida	238.697 (24,2%)	121.424 (27,8%)	49.517 (31,3%)
Girona	35.739 (3,6%)	14.181 (3,2%)	4.588 (2,9%)
Barcelona	10.828 (1,1%)	785 (0,2%)	0 (0%)
Huesca	227.102 (23%)	105.815 (24,2%)	51.649 (32,6%)
Navarra	5.732 (0,6%)	0 (0%)	0 (0%)
Superficie totale	985 391 ha	436 621 ha	158 321 ha

Zones appropriées pour la perdrix grise dans les Pyrénées

La définition des zones appropriées du modèle de qualité de l'habitat de la perdrix grise dans les Pyrénées a permis de dégager les seuils suivants : Zones adaptées 0,06, Zones de

bonne qualité 0,33 et Zones optimales 0,53. La Figure 11 montre le zonage en découlant et le Tableau 7 résume la surface des zones appropriées dans différentes régions des Pyrénées.

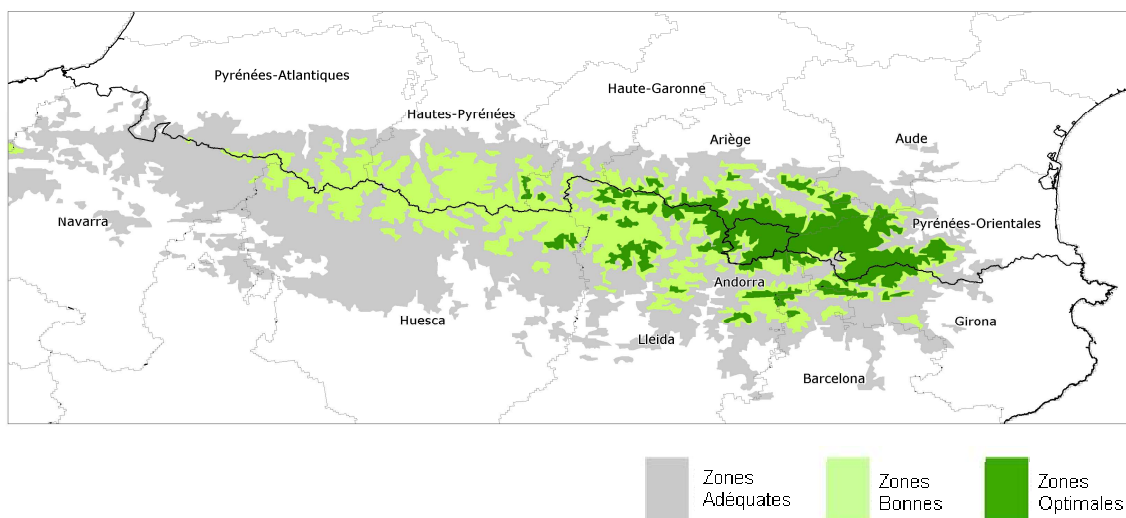


Figure 11. Zones appropriées pour la perdrix grise (*Perdix perdix*) dans les Pyrénées

Tableau 7. Superficie des zones appropriées pour la perdrix grise (*Perdix perdix*) dans différentes régions des Pyrénées. La superficie est exprimée en hectares, tandis que le pourcentage par rapport au total de chaque type de zone est exprimé entre parenthèses.

REGION	ZONES ADEQUATES	ZONES BONNES	ZONES OPTIMALES
Pyrénées-Orientales	185.337 (6,1%)	123.508 (12%)	93.795 (29%)
Aude	66.510 (2,2%)	13.459 (1,3%)	5.240 (1,6%)
Hautes-Pyrénées	249.817 (8,2%)	122.148 (11,9%)	1.518 (0,5%)
Haute-Garonne	66.481 (2,2%)	25.109 (2,4%)	2.155 (0,7%)
Ariège	264.917 (8,7%)	136.259 (13,2%)	66.983 (20,7%)
Pyrénées-Atlantiques	170.331 (5,6%)	44.795 (4,3%)	(0%)
Andorra	45.801 (1,5%)	43.137 (4,2%)	36.125 (11,2%)
Lleida	547.595 (18%)	265.719 (25,8%)	75.466 (23,3%)
Girona	143.030 (4,7%)	59.363 (5,8%)	29.306 (9%)
Barcelona	112.196 (3,7%)	26.252 (2,5%)	7.431 (2,3%)
Burgos	13.466 (0,4%)	0 (0%)	0 (0%)
Zaragoza	37.943 (1,3%)	0 (0%)	0 (0%)
Huesca	660.961 (21,8%)	161.844 (15,7%)	5.928 (1,8%)
La Rioja	808 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Navarra	325.557 (10,7%)	6.419 (0,6%)	0 (0%)
Vizcaya	6.378 (0,2%)	0 (0%)	0 (0%)
Guipúzcoa	20.292 (0,7%)	1.825 (0,2%)	0 (0%)
Álava	117.258 (3,9%)	0 (0%)	0 (0%)
Superficie totale	3 034 678 ha	1 029 837 ha	323 947 ha

Conclusions

Les principaux résultats liés aux différents objectifs de ce travail sont les suivants :

- Un total de 86 observations de lagopède alpin et de 2 128 de perdrix grise a été relevé sur le territoire des Pyrénées, à partir de diverses sources d'information. De plus, les données relatives à la perdrix grise ont été complétées à l'aide de 6 relevés historiques réalisés dans la zone d'Alava et de 95 observations effectuées dans la cordillère cantabrique. Les données compilées ont été intégrées à une base de données géoréférencée structurant l'ensemble des informations compilées de manière homogène.
- Afin d'obtenir des variables environnementales homogènes pour l'ensemble des Pyrénées, deux sources principales d'informations ont été utilisées : WorldClim, pour les variables climatiques et topographiques, et *Corine Land Cover* 2000, pour les variables d'utilisations du sol. Les deux sources d'informations ont été traitées avec une résolution équivalente à 1 km sur des coordonnées géographiques de longitude et de latitude (0,0083°).
- Les modèles développés pour le lagopède alpin et la perdrix grise dans les Pyrénées montrent les zones les plus adaptées pour les deux espèces et permettent d'identifier les zones potentiellement adaptées, situées près des zones de distribution connues.
- Le modèle de la perdrix grise en Cantabrie a permis d'évaluer, parallèlement aux résultats du modèle pyrénéen, la potentialité d'un habitat dans les zones du Pays basque et de la Navarre. Malgré leurs différences, il est possible de déduire de cette analyse que les deux modèles révèlent des valeurs maximales d'adéquation de l'habitat dans certaines zones de la province d'Alava, en raison des relevés historiques de présence de perdrix grises.

Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La rareté et l'hétérogénéité des données compilées en matière de distribution des deux espèces ont finalement conditionné le développement de modèles permettant d'identifier les habitats potentiels de reproduction du lagopède alpin et de la perdrix grise dans les Pyrénées.
- Les zones adaptées pour la reproduction des deux espèces identifiées à partir des modèles obtenus constituent un outil utile dans les processus de définition de priorités et de prise de décisions aux différents niveaux : depuis la conception de programmes de surveillance ou de prospection pour l'amélioration des connaissances sur les deux espèces jusqu'à la planification territoriale (création de réserves, etc.), en passant par l'orientation de directives de conservation et de gestion des espèces.

Perspectives

Dans le cadre de ces exercices de modélisation de l'habitat, deux facteurs clés permettent d'évaluer les limites des résultats obtenus et de proposer des améliorations : la qualité et la représentativité des informations relatives à la distribution des espèces, ainsi que la qualité et l'adéquation des variables utilisées.

Dans le cas du lagopède alpin et de la perdrix grise, les informations relatives à la distribution des espèces sont rares et très hétérogènes (données de suivi, observations fortuites, données de *radiotracking*, données bibliographiques, etc.). De plus, la documentation disponible est limitée, qu'il s'agisse des exemplaires observés ou des lieux objet des échantillonnages. En outre, la représentativité spatio-temporelle des données est restreinte, étant donné que l'étendue géographique des données est très limitée, que l'effort d'échantillonnage est très hétérogène et que le cadre temporel est trop vaste, ce dernier comprenant des données relatives aux Pyrénées concernant la période 1990-2010. Ainsi, pour dépasser ces limites et améliorer la cartographie obtenue, les aspects suivants devraient être pris en compte :

- Amélioration de la qualité des données relatives à la distribution des espèces à partir de données dérivées des programmes officiels de surveillance des deux espèces, qui doivent comprendre, outre des informations sur la présence des espèces, des données d'abondance. Il serait également intéressant de compléter la base de données à l'aide d'une compilation exhaustive et actualisée de l'ensemble des observations fortuites relevées pour les deux espèces. L'amélioration de la qualité des données influencerait directement sur les modèles développés, en permettant d'obtenir des prédictions plus précises et caractérisées par une plus grande résolution géographique des zones de reproduction des espèces.
- Développement de cartes de distribution réelle en employant des techniques de modélisation de l'habitat et en évaluant la possibilité d'incorporer dans les modèles les informations disponibles sur les populations.

En ce qui concerne les variables environnementales étant donné que leur définition a été réalisée à partir du vaste fonds documentaire sur l'écologie des deux espèces dans les Pyrénées, elles sont considérées comme suffisamment représentatives pour le développement de modèles de distribution. Cependant, pour travailler avec une résolution géographique plus adaptée à la gestion des espèces, il serait nécessaire de redéfinir les sources d'information, notamment en ce qui concerne les variables climatiques et topographiques, puisque les variables utilisées possèdent une résolution graphique de 1 km.

Remerciements

À David Champion du GAVRN, Claude Novoa de l'ONCFS, Diego García, Aida Tarrago et Ramón Martínez Vidal de la Generalitat de Catalogne, Ivan Afonso du Conseil général du Val d'Aran, Joseba Carreras de la Députation forale d'Alava, José María Fernández García d'IKT S.A., et Landry Riba et Jordi Sola du Gouvernement d'Andorre, pour leurs précieux apports tout au long du déroulement de l'action 3.1.3.4, et notamment au Partenariat IREC-Principauté d'Asturies pour nous avoir cédé leurs données sur la perdrix grise en Asturies et León.

Les partenaires / Los socios:



Avec le soutien de / Con el apoyo de:



www.gallipyr.eu

Bibliographie

- Acevedo, P., V. Alzaga, J. Cassinello, and C. Gortazar. 2007. Habitat suitability modelling reveals a strong niche overlap between two poorly known species, the broom hare and the Pyrenean grey partridge, in the north of Spain. *Acta Oecologica-International Journal of Ecology* **31**:174-184.
- Arcos, J. M., J. Bécares, B. Rodríguez, and A. Ruiz. 2009. Áreas Importantes para la conservación de las aves marinas en España. LIFE04NAT/ES/000049-Sociedad Española de Ornitología (SEO/BirdLife), Madrid.
- Bota, G., L. Brotons, D. Giralt, and M. Pla. 2008. Informe científico sobre la identificación de zonas de hàbitat adecuado para la carraca, la terrera común, la calandria común y el sisón en el ámbito de las IBAs 142 (Secans de Lleida) y 144 (Cogul-Alfès). Informe inèdit. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Solsona.
- Brotons, L., M. Pla, D. Villero, and C. Camino. 2008. Cartografia d'espècies de conservació prioritària a Catalunya: aplicacions de la conservació de l'hàbitat. Informe inèdit. Departament de Medi Ambient i Habitatge & Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Solsona.

- Estrada, J., V. Pedrocchi, L. Brotons, and S. Herrando, editors. 2004. *Atles dels ocells nidificants de Catalunya 1999-2002*. Lynx Edicions & Institut Català d'Ornitologia, Bellaterra.
- ETC/LUSI. 2007. *Corine Land Cover 2000 raster data - version 9*. European Topic Centre on Land Use and Spatial Information & European Environment Agency.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones, and A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **25**:1965-1978.
- IEA. 2001. *Mapa Digital dels Hàbitats d'Andorra*. Institut d'Estudis Andorrans, Andorra.
- Martí, R., and J. C. Moral, editors. 2003. *Atlas de las aves reproductoras de España*. Dirección General de Conservación de la Naturaleza & SEO, Madrid.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson, and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**:231-259.