

<p>Année universitaire : 2022.-2023</p> <p>Spécialité :</p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) :</p> <p>Data science pour la biologie</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input type="checkbox"/> d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p>X de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
---	--

Création d'un indicateur national sur la phénologie de migration des passereaux communs de France par l'analyse de données de baguage

Par : Armelle Lajeunesse

Soutenu à Rennes

le 07/09/2023

Devant le jury composé de :

Président : Magalie Houée-Bigot

Maître de stage : Manon Ghislain

Enseignant référent : François Husson

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Remerciements

Je tiens à remercier mes encadrants Manon Ghislain et Pierre-Yves Henry pour leur accompagnements tout le long de ce stage, pour m'avoir transmis leur connaissance sur la migration des oiseaux et fait découvrir le baguage.

Je remercie également Adrien Chaigne et Pierre Rousseaux pour m'avoir accueilli quelques jours au sein de la Réserve Naturelle de Moëze-Oléron ainsi que Louis Sallé, Jérémy Dupuy, Romain Lorrillière, Stanislas Wroza et Frédéric Robin pour avoir suivi mon avancé sur l'indicateur de phénologie.

Enfin, je remercie le CESCO pour m'avoir accueilli au sein de leurs bureaux et permis d'assister aux présentations du laboratoire.

Sommaire

Partie I : Introduction	1
1. Contexte et connaissance scientifique	1
a. Changements dans les dates de migration	1
b. Indicateur national sur la phénologie de migration des passereaux commun en France	2
c. Indicateurs sur la migration	4
2. Présentation du projet	5
Partie II : Matériel et méthode	5
1. Données	5
a. Présentation des données de baguage	5
b. Choix de la période	6
c. Pré-traitement des données	6
d. Présentation des espèces	7
2. Méthodes statistiques	9
a. GAMM : visualisation des profils de phénologie par espèce et par année et post-traitement des données	9
i. Modèle	9
ii. Post-traitement des données	9
b. Variations inter-annuelles de phénologie migratoires estimées par GAMM	10
i. Principe de la méthode	10
ii. Avantage et contraintes	11
c. Estimation des variations interannuelles et test d'effets dans un modèle mixte linéaire multi-espèce	11
i. Modèles	11
ii. Avantages et contraintes	12
iii. Présentation des variables testées	13
iv. Sélection de modèles	13
v. Estimation des variations interannuelles pour les individus précoces, intermédiaires et tardifs	14
vi. Évaluer la robustesse du plan d'échantillonnage	14
vii. Estimation des écarts à la moyenne	14
Partie III : Résultats	15
1. Profils de phénologie migratoire	15
2. Estimations des variation interannuelles par LMM	16
a. A l'échelle de l'espèce	16
b. A l'échelle du type de migration	17
c. Pour les individus précoces, intermédiaires et tardifs	19

d. Robustesse du plan d'échantillonnage	19
Partie V : Discussion	20
1. Robustesse du plan d'échantillonnage	20
2. Robustesse de la méthode d'analyse basée sur le modèle linéaire mixte	21
3. Hypothèses du modèle linéaire mixte	21
4. Effet des prédicteurs	23
5. Comparaison à la littérature	24
Partie VI : Conclusion et perspectives	24

Partie I : Introduction

1. Contexte et connaissance scientifique

a. Changements dans les dates de migration

Près de 20 % des espèces d'oiseaux, dont des passereaux, sont migratrices (Kirby et al., 2008). Ces espèces effectuent des déplacements saisonniers, entre leur aire de reproduction et d'hivernage, se manifestant avant la reproduction au printemps (migration pré-nuptiale) et après à l'automne (migration post-nuptiale) (Zucca, 2015). La migration des oiseaux est donc un phénomène caractérisé par une phénologie, c'est-à-dire dont la chronologie d'occurrence est périodique et répétée (Walther et al., 2002).

Migrer permet notamment aux individus de trouver de meilleures conditions quant à la disponibilité en ressources lors des différentes saisons (Zucca, 2015). Mais la migration est aussi coûteuse en énergie, ce qui nécessite de faire plusieurs escales le long du trajet. Ce phénomène est appelé la halte migratoire (Schmaljohann et al., 2022). Plusieurs types de migration existent. Les distances parcourues par les espèces migratrices varient grandement. Pour les espèces nichant en Europe, on trouve des espèces migratrices qui se déplacent jusqu'en Afrique au-delà du Sahara (que l'on peut nommer les espèces transsahariennes ou de longue distance) et des espèces s'arrêtant avant cette frontière (que l'on peut regrouper sous le terme courte distance) (Dupuy & Sallé, 2022). Selon les espèces, les voies empruntées diffèrent aussi (Fig 1). A l'échelle de la France métropolitaine, les espèces provenant d'Europe du nord-ouest empruntent un couloir de migration longeant la façade atlantique tandis que celles venant d'Europe du nord et du nord-est passent plutôt par l'est du territoire (Dupuy & Sallé, 2022).

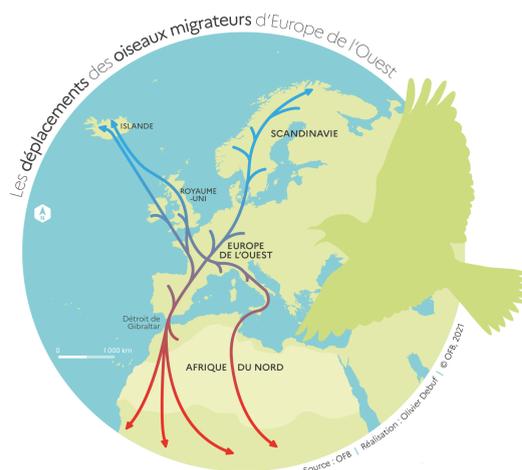


Figure 1 : Schéma des voies de migrations empruntées par les oiseaux migrateurs en Europe de l'ouest. Source : OFB

Cinq grands types de facteurs (modifications de l'usage des sols, changements climatiques, surexploitation des ressources, pollutions et invasions biologiques) sont responsables de changements de la biodiversité et des écosystèmes (IPBES, 2019). Parmi eux, les changements climatiques ont des effets à toutes les échelles, de l'individu au biome (Bellard et al., 2012). Ils impliquent notamment des changements dans les événements biologiques

pour un grand nombre d'espèces animales et végétales (Bellard et al., 2012). Pour les oiseaux migrateurs, les changements climatiques, en modifiant les variations saisonnières et la répartition habituelle des ressources (Myneni et al., 1997; Parmesan, 2006; Roy & Sparks, 2000), induisent des décalages dans les dates d'arrivée et de départ. En effet, les espèces migratrices reviennent plus tôt sur leur aire de reproduction (Horton et al., 2023; Jonzén et al., 2006; A. Lehikoinen et al., 2019; E. Lehikoinen et al., 2004). Par exemple, Lehikoinen et al. (2019) documentent un avancement annuel de la date médiane de migration de l'ordre de 0.15 jours pour des espèces de montagne. On trouve moins d'informations concernant le changement dans le calendrier de la migration post-nuptiale (Gallinat et al., 2015). Les études montrent des changements moins prononcés et variables (avancement, retard ou pas de changement selon les espèces) (Brisson-Curadeau et al., 2020; Haest et al., 2019; Jenni & Kéry, 2003; Lehikoinen et al., 2004). Par exemple, Haest et al. (2019) une tendance au retard de la migration de 0.09 jour par an pour la Grive musicienne, un migrateur de courte distance et une tendance à l'avancement de 1,86 jour par an pour le Rougequeue à front blanc, un migrateur transsaharien. On peut expliquer ces conclusions divergentes par le fait que les pressions de sélection portant sur la phénologie de départ des zones de reproduction sont nettement plus faibles que celles portant sur l'arrivée précoce. En effet, à une date optimale, sur les territoires de reproduction, cette phénologie de migration pré-nuptiale détermine largement le succès reproducteur individuel (Crick et al., 1997). De plus, la modification de la migration post-nuptiale semble dépendre de l'écologie de l'espèce, notamment de la distance de migration jusqu'à l'aire d'hivernage, puisque il a souvent été rapporté que les espèces de courte distance ont tendance à retarder leur migration tandis que c'est l'inverse pour les migrateurs transsahariens (dits à longue distance; Jenni & Kéry, 2003; Haest et al., 2019).

b. Indicateur national sur la phénologie de migration des passereaux commun en France

Le phénomène de décalage de la phénologie de migration en réponse aux changements climatiques est largement documenté dans la littérature scientifique. Cependant, il existe peu d'études qui documentent les variations interannuelles des dates de migration (par exemple Lehikoinen et al., 2019), et la grande majorité rend compte de tendances sur le long terme (Brisson-Curadeau et al., 2020; Jenni & Kéry, 2003; Lehikoinen et al., 2004). L'indicateur national sur la phénologie des passereaux communs de France participe à combler des lacunes dans la documentation de la phénologie de migration puisque son objectif sera de caractériser des fluctuations annuelles. En plus de données des informations par espèce, l'indicateur renseignera sur la variation de la phénologie à l'échelle de groupes d'espèces, par exemple entre courte et longue distance.

L'indicateur est développé à partir de données de baguage collectées par les stations en France métropolitaine. Cette méthode de suivi implique la capture d'individus à l'aide de filets, leur marquage avec des bagues individuelles, puis leur relâché après la collecte de données (comme la masse, l'âge, etc). En France, les données de baguage sont récoltées via des protocoles standardisés, mis en place par le Centre de Recherche sur la Biologie des Populations d'Oiseaux (CRBPO) (CRBPO, 2023). Le CRBPO est la plateforme nationale qui coordonne les suivis d'oiseaux sauvages par capture et marquage en France. Il anime notamment des programmes de suivi de la migration des oiseaux communs: les protocoles PHENO et SEJOUR. Le protocole PHENO a été créé pour documenter les phénologies

migratoires, notamment leurs variations dans le temps et dans l'espace, des espèces suivies à l'échelle nationale. Le protocole SEJOUR, lui, a pour objectif d'étudier le processus de séjour de halte migratoire, en déterminant les dates d'arrivée et de départ, les effectifs et l'engraissement.

Il existe d'autres méthodes de suivi permettant d'étudier le phénomène de migration des oiseaux, notamment le comptage visuel direct, sur des sites de fort passage migratoire (Dupuy & Sallé, 2022). Le comptage et le baguage présentent des différences importantes. Tout d'abord, ces deux méthodes ne suivent pas les mêmes types d'espèces. Le comptage permet de surveiller un large éventail d'espèces en identifiant et en comptant les oiseaux en vol dans les lieux de passage importants où de nombreuses espèces migrent. Ainsi, le comptage peut englober une grande diversité d'espèces migratrices, allant des passereaux aux grands rapaces. Tandis qu'avec le baguage, on retrouve surtout des espèces de passereaux communes, représentatives de la majorité des passereaux migrants, qui sont moins facilement suivies par comptage (notamment du fait de la migration rampante ou à haute altitude). Étant donné que le baguage nécessite une capture physique, il est plus adapté pour étudier des espèces qui font halte dans des zones où la capture est possible, telles que les zones de nidification ou de halte migratoire. De plus, les données de baguage ont l'avantage de fournir une information sur l'âge des individus marqués et peuvent permettre de prendre en compte l'effet de l'âge dans l'étude des changements de la phénologie de la migration post-nuptiale. En effet, les adultes migrent plus tôt que les jeunes (Gordo, 2007). Ainsi, une productivité, c'est-à-dire un plus grand nombre de jeunes individus, plus importante certaines années pourrait être confondue avec un retard de la migration si l'âge n'est pas pris en compte dans les analyses.

Le choix de l'estimateur sur lequel sera basé l'indicateur est aussi important pour caractériser les changements de dates de migration le plus précisément possible. Dans la littérature, un certain nombre de métriques ont été employées. La première date de capture (FAD) a longtemps été utilisée (Cotton, 2003; Primack et al. 2009; Sparks et al., 2005). Pourtant il s'agit d'une observation extrême qui est très peu représentative de la distribution des dates de passage de migration car elle peut être déterminée par des individus particuliers. Elle est donc aussi influencée par l'effort et les conditions d'échantillonnage ou la taille de la population de l'espèce (Sparks et al., 2005). Des études se sont basées sur d'autres paramètres de la distribution comme la médiane (Marra et al., 2005) et d'autres quantiles (Mills, 2005; Van Buskirk et al., 2009) afin d'évaluer le décalage phénologique des individus précoces, tardifs et intermédiaires. Une étude réalisée par Delacroix et al. (en cours de publication) a notamment estimé le décalage phénologique à différents quantiles de la distribution et cela pour un certain nombre d'espèces fréquemment capturées par la station de baguage "Plaisance" (Charente-Maritime) en France. Selon leurs résultats, la valeur des tendances diffère entre les individus précoces, intermédiaires pour beaucoup d'espèces. Le décalage est parfois de direction opposée entre les individus tardifs et précoces, informant d'un étalement ou d'un rétrécissement de la période de migration. La moyenne est aussi souvent un paramètre rencontré (Haest et al., 2019; Hüppop & Ppop, 2003). Certaines études, par exemple Haest et al. (2019), se sont basées notamment sur l'utilisation des dates moyennes de passage à l'automne (MAPD) pour documenter l'effet de variables météorologiques sur la date de migration post-nuptiale. Face aux foisonnement des estimateurs utilisés, Moussus et al. (2010) ont comparé l'efficacité d'estimation des changements de phénologie de plusieurs estimateurs

en conditions simulées. Ils ont montré que la moyenne et une méthode de lissage par spline fournissent les estimations les plus précises même lorsque les distributions sont biaisées vers la précocité ou le retard. Ces deux types d'estimateurs étaient également les plus robustes à la variation de la taille de l'échantillon et à la détectabilité imparfaite.

Au vu de l'analyse bibliographique, il semble donc préférable d'utiliser une méthode basée sur la moyenne ou une méthode impliquant une estimation de la phénologie par lissage, comme avec un GAMM. Pour documenter au mieux un changement de la phénologie entre années, il est aussi intéressant de produire des estimations à différents quantiles de la distribution.

c. Indicateurs sur la migration

A ce jour, il existe en France un indicateur de décalage de la date de passage moyenne des oiseaux migrateurs transsahariens au printemps à la Pointe de Grave (*Date d'arrivée des oiseaux migrateurs*, 2023). Cet indicateur produit par la Ligue de Protection des Oiseaux (LPO) montre l'évolution moyenne des dates de migration post-nuptiale de 16 espèces d'oiseaux migrateurs transsahariens à la Pointe de Grave (Gironde) entre 1986 et 2022. L'indicateur créé ici sera multi-site, donc plus à même de documenter les changements de phénologie de migration mais sera complémentaire de celui de la LPO car il portera sur la migration post-nuptiale. L'indicateur de la LPO se base sur 16 espèces, qui sont principalement des rapaces ou des passereaux de grande taille. Le cortège d'espèces évalué par l'indicateur développé sera donc différent. D'un part parce que ce ne sont généralement pas les mêmes espèces que l'on compte et que l'on bague. D'autres part, parce que l'indicateur produit par la LPO ne présente que des espèces migrant sur de longues distances, tandis que pour l'indicateur créé les passereaux migrateurs de courte et longue distance seront considérés.

Dans le processus de création d'un indicateur, il convient de définir la notion d'indicateur. Aujourd'hui, il n'y a pas de consensus pour une définition et dans le domaine de l'écologie (Heink & Kowarik, 2010), des définitions différentes sont employées (Annexes 1). La définition proposée par l'Agence Européenne pour l'Environnement "Mesure, généralement quantitative, qui peut être utilisée pour illustrer et faire connaître de façon simple des phénomènes complexes, y compris des tendances et des progrès dans le temps" (Agence européenne pour l'environnement, 1998) est celle qui fait le mieux référence à l'indicateur créé. En effet, ce dernier sera quantitatif et cherchera à communiquer de manière claire et compréhensive le phénomène complexe de changement des dates de migration pour des espèces ou des groupes d'espèces. En revanche, il ne documente pas de tendance et de progrès dans le temps mais une variation entre années.

Ainsi, il serait mieux défini comme une variable essentielle de biodiversité (EBV). Les variables essentielles de biodiversité sont un ensemble de variables nécessaires et suffisantes pour décrire et prédire l'état et la dynamique de la biodiversité et permettre d'harmoniser les efforts de surveillance, de recherche, de prévision et de gestion (Pereira et al., 2013). En plus de ne pas documenter d'évolution temporelle, l'indicateur proposé est dédié à un cortège d'espèces particulier. Il produit donc une information partielle à mi chemin entre les données

d'observation et l'indicateur, ce qui est une caractéristique de l'EBV. Cependant, par simplicité d'écriture, j'utiliserai le terme d'indicateur au lieu de celui d'EBV.

2. Présentation du projet

L'objectif de ce projet est de réaliser le pré-traitement et le développement d'une méthode pour l'analyse de données de baguage préalable à la création d'un indicateur national sur la phénologie de la migration post-nuptiale des passereaux communs de France. Cet indicateur devra permettre de documenter les dates de passages des migrateurs ou des groupes d'espèces. Il aura vocation à informer de la variation interannuelle de la phénologie migratoire et pourra permettre aux chercheurs, gestionnaires de sites et autres experts ou à un public intéressé de savoir comment fluctue la phénologie de migration entre années pour les passereaux migrateurs.

Les travaux produits dans le cadre de ce projet sont une synthèse bibliographique des méthodes utilisées dans la littérature scientifique pour estimer les variations interannuelles de phénologie de la migration des passereaux à partir de données de baguage, des scripts reproductibles de pré-traitement, d'analyse des données et de visualisation sous R.

Une réflexion sur la façon dont sera publié cet indicateur et sur les processus à mettre en place pour y parvenir a également été menée.

Durant ce stage, j'ai pu aussi travailler à la recherche d'une méthode reproductible à destination des gestionnaires de sites pour l'estimation des durées de halte migratoire des espèces par année. Ce deuxième projet ne sera pas présenté dans ce rapport.

Partie II : Matériel et méthode

1. Données

a. Présentation des données de baguage

J'ai utilisé des données de baguage provenant de deux protocoles standardisés appliqués dans le cadre des suivis de la migration du CRBPO et suivis par des stations de baguage à travers la France métropolitaine :

- Le protocole PHENO, qui impose de réaliser au moins une session de baguage par semaine pendant 10 semaines consécutives au cours d'une période de migration (post et pré-nuptiale)
- Le protocole SEJOUR, qui impose de réaliser une session par jour sur au moins 10 jours consécutifs.

Seules les données de protocole SEJOUR provenant des stations réalisant à la fois le protocole SEJOUR et PHENO ont été utilisées. Un seul protocole pouvant être appliqué sur un même site, le protocole SEJOUR remplace le protocole PHENO lorsque l'objectif est de suivre la halte migratoire. Pour autant, les données du protocole SEJOUR peuvent être utilisées pour documenter la phénologie de migration puisqu'elles fournissent l'information du nombre d'individus capturés par jour.

Chaque observation des données de baguage brutes représente une capture ou une recapture d'un individu. Un certain nombre de variables, notamment, la date de capture ou de recapture, la station de baguage, le protocole suivi, la latitude et la longitude ou encore l'âge sont renseignées.

L'âge est déterminé au moment de la capture ou de la recapture à partir de critères physiques plus ou moins perceptibles selon les espèces (Demongin, 2016; Svensson, 1992). Dans les données brutes, cette variable comprend un grand nombre de catégories possibles qui peuvent être recodées en trois catégories : juvénile, adulte ou inconnu. Chez les passereaux, les individus juvéniles sont ceux âgés d'un an ou moins, les autres sont des adultes. Des imprécisions et des erreurs existent que j'ai pu corriger au mieux selon l'histoire de capture des individus au cours de la période étudiée.

J'ai également défini une variable décrivant le milieu (zone humide ou milieu buissonnant) associé à chaque station de baguage. Pour cela, j'ai affecté la catégorie zone humide ou milieu buissonnant si au moins 50% des individus capturés appartiennent à des espèces inféodées aux zones humides ou aux milieux buissonnants (Annexe 3). L'appartenance d'une espèce à l'un des deux milieux a été déterminée à dire d'expert (Fig 2).

b. Choix de la période

Les protocoles PHENO et SEJOUR ont été créés en 2014. La période d'étude pour ce projet s'étale donc sur 9 ans, de 2014 à 2022. Ainsi, si nous avons voulu produire des tendances de décalage phénologique, la période est trop courte.

c. Pré-traitement des données

Pour l'étude de la phénologie migratoire, je n'ai gardé que la première date, soit la première capture, pour chaque individu, chaque année. Puisque j'étudie la migration post-nuptiale, j'ai conservé les données entre le 1er juillet et le 30 novembre, période pendant laquelle l'ensemble des périodes de migration pour la grande majorité des espèces est compris (Dupuy & Sallé 2022). Les dates de capture retenues ont été transformées en nombre de jours pour les analyses ultérieures. Le 1er juillet est défini comme le jour 0.

J'ai sélectionné les stations respectant au mieux le protocoles PHENO et gardé pour ces stations, un maximum de sessions par année, selon la règle définie ci-après. Comme il est courant qu'une session ne puisse pas être réalisée en cas de mauvaises conditions météorologiques, et que les sessions ne sont pas toujours espacées de 7 jours exactement, j'ai conservé des périodes glissante des 63 jours au sein desquelles :

- Il y avait au moins 8 sessions qui ont été réalisées
- Il y avait au moins 6 semaines avec au moins une session par semaine
- Il n'existe pas de période sans session de plus de 21 jours.

En vérifiant visuellement la répartition des sessions pour chaque année par station, cette méthode permet de conserver un nombre suffisant de sessions bien réparties pendant la période d'échantillonnage ainsi que de maximiser le nombre de stations et sessions gardées pour les analyses.

Enfin, j'ai conservé les espèces pour lesquelles il y avait au moins 15 stations par an qui couvrent la période de migration habituelle de l'espèce concernée pour pouvoir établir la phénologie de la migration de l'espèce à l'échelle nationale.

Après le pré-traitement des données, il reste en moyenne 49 stations par an et 27 espèces (Fig 2).

d. Présentation des espèces

Les espèces retenues présentent des abondances différentes et sont capturées par un nombre de stations qui varie entre elles et par années. Ces informations, ainsi que le milieu auquel elles sont principalement inféodées et le type de migration (courte distance ou transsaharien), sont présentées dans le tableau ci-dessous. Il est à noter que les espèces catégorisées comme courte distance peuvent contenir des populations d'oiseaux résidents ainsi que des migrateurs partiels ou complets mais qui ne franchissent pas le Sahara (Fig 2).

Pour la présentation des résultats, j'ai sélectionné 6 espèces (3 espèces migratrices transsahariennes et 3 espèces migratrices de courte distance), dont le nombre d'individus par années et le nombre de stations par années sont différents.



Figure 2 : Présentation des espèces (Les carrés bleus et verts représentent le type de milieu, les carrés rouges et violets représentent le type de migration, les ronds violets représentent le nombre d'individus par année, et les ronds jaunes représentent le nombre de stations capturant par année). Les espèces en gras sont celles choisies pour la présentation des résultats.

2. Méthodes statistiques

Deux méthodes statistiques différentes ont été utilisées pour produire les estimations de variations interannuelles de phénologie migratoire : une méthode basée sur le modèle additif généralisé (GAMM) ainsi que le modèle linéaire mixte. La méthode basée sur le GAMM est utilisée pour évaluer la robustesse de la méthode d'analyse par LMM.

Le pré-traitement ainsi que l'ensemble des analyses statistiques ont été menés sur R (R core team 2022).

- a. GAMM : visualisation des profils de phénologie par espèce et par année et post-traitement des données

- i. Modèle

Le modèle GAMM a d'abord été utilisé pour visualiser les profils de phénologie migratoire de chaque espèce par année, dans le but de savoir si le nombre d'individus capturés par espèce et par année était suffisant pour estimer une phénologie migratoire. J'ai modélisé les variations du nombre d'individus capturés par espèce et par année en fonction de la date, à l'aide d'une fonction spline et d'un effet aléatoire de la station pour tenir compte des différences de nombre moyen d'individus capturés entre stations de baguage :

$$\text{Nombre d'individus capturés} \sim s(\text{jour de capture}) + (1|\text{Station})$$

Je considère qu'une espèce est présente sur un site et à un jour donné lorsqu'il y a au moins un individu capturé. Ainsi, j'ai généré des 0 lorsqu'aucun individu d'une espèce n'était capturé pour les stations et jours échantillonnés, afin de signifier une absence de l'espèce. Cela permet de fournir de l'information lors de l'ajustement des modèles GAMM.

J'ai d'abord modélisé le nombre d'individus capturés selon une loi de poisson. Cependant, j'ai trouvé que le rapport de la variance sur la moyenne était significativement plus grand que 1, indiquant de la surdispersion dans les données. Par conséquent, j'ai opté pour une distribution binomiale, mieux adaptée en cas de surdispersion.

Le modèle GAMM a été choisi car il s'agit d'une méthode flexible, qui permet de saisir de manière précise la non-linéarité du nombre de captures au cours du temps. Il permet de modéliser des profils de phénologie plus complexes que ceux pouvant être décrits par une fonction quadratique de la date par exemple. Ce niveau de complexité est défini de manière adéquate via la sélection automatique du nombre de degré de liberté lors de l'ajustement du modèle, ce qui permet d'éviter un surajustement.

- ii. Post-traitement des données

Cette étape de modélisation par GAMM a également permis de réaliser du post-traitement de données. D'une part, par la suppression d'espèces pour lesquelles nous ne détectons pas de profil de phénologie migratoire certaines années, ce qui rend impossible le calcul de l'écart de date de migration à l'année de référence, et d'autre part, par l'identification et la suppression d'un signal de dispersion post-nuptiale visible chez certaines espèces (Fig 3). La dispersion

post-nuptiale fait référence aux mouvements locaux des individus après la saison de reproduction, réalisés pour rechercher des ressources supplémentaires et pour réduire la compétition (Zucca, 2015).

La fin du signal de dispersion post-nuptiale a été identifié pour chaque espèce et chaque année comme le premier, voire le second minimum, des valeurs prédites de la phénologie estimée par GAMM.

Par exemple, pour la fauvette à tête noire, on observe une augmentation précoce du nombre d'individus capturés en juillet. Ce premier pic est beaucoup moins important que le suivant, qui correspond au flux migratoire des individus provenant du nord et du nord-est de l'Europe et qui traversent la France pour rejoindre la région méditerranéenne (Fig 3).

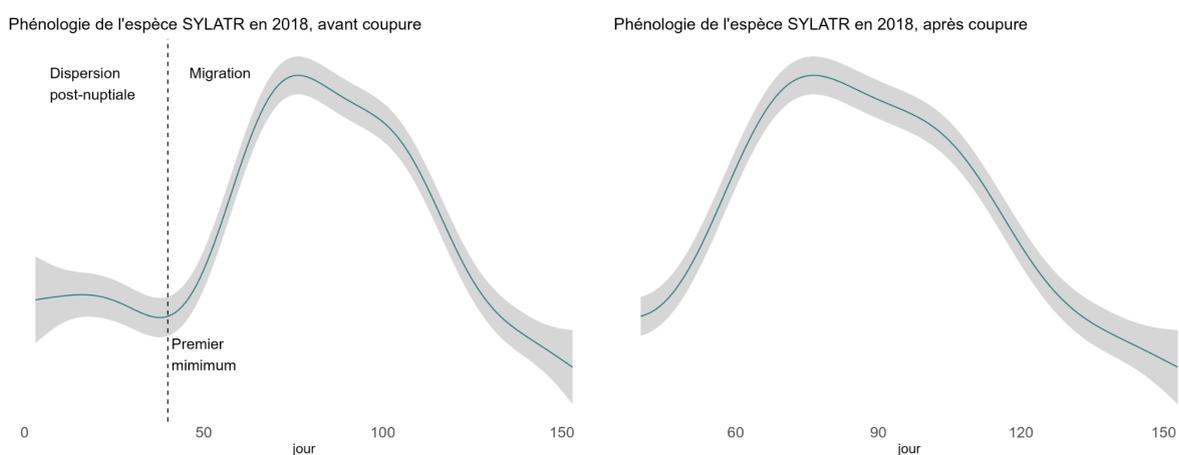


Figure 3 : Identification et suppression du signal de dispersion post-nuptiale (exemple de l'espèce SYLATR en 2018)

b. Variations inter-annuelles de phénologie migratoires estimées par GAMM

i. Principe de la méthode

Le principe de cette méthode, basée sur Moussus et al. (2010), est d'estimer le nombre de jours séparant le profil phénologique de chaque année relativement au profil phénologique d'une année définie comme référence. Ce nombre de jours est considéré comme une estimation du décalage phénologique. J'ai choisi comme année de référence la moyenne de l'ensemble des années de la période. Cela permet de s'affranchir du risque que l'année de référence choisie soit hors norme (p. ex. exceptionnellement précoce), ou du fait que le choix de l'année de référence influence l'information transmise par l'indicateur (p. ex. choisir l'année la plus tardive aurait renforcée une impression d'avancement des dates de migration). De plus, définir une année moyenne comme année de référence permet que le centrage des valeurs de l'indicateur s'améliore au fur et à mesure que des années supplémentaires sont ajoutées.

J'ai testé 36 décalages phénologiques compris entre -18 et +18 jours. Pour un décalage n , j'ajoute n aux dates de l'année de référence et j'ajuste un modèle GAMM (comme défini précédemment) à l'ensemble de données (Année de référence + décalage n) + Année X. Le meilleur décalage retenu est celui qui minimise le critère d'AIC. Pour affiner l'estimation de ce dernier, j'applique une régression quadratique sur les valeurs de décalage comprises entre

le décalage de moindre AIC - 5 jours, et +5 jours, ce qui permet d'obtenir une estimation du décalage plus précise (avec 1 décimale).

J'ai pu produire les estimations des décalages phénologiques inter-annuels pour toutes les espèces gardées après le post-traitement hormis pour l'espèce PARCAE pour laquelle j'obtenais des estimations aberrantes certainement dues aux grandes variations de formes de phénologie entre années.

ii. Avantage et contraintes

Cette méthode comprend plusieurs avantages et contraintes. Via l'utilisation du modèle GAMM, elle permet de prendre en compte l'ensemble de la phénologie pour l'estimation des décalages. Cependant, elle ne peut être appliquée qu'à l'échelle d'une espèce à la fois, et elle ne permet pas de prendre en compte des effets potentiels de covariables sur le décalage phénologique. En effet, la variable réponse du modèle étant le nombre d'individus capturés par jour, tester un effet de l'âge par exemple reviendrait à tester si le nombre moyen d'individus capturés diffère entre adultes et juvéniles, alors que l'objectif est de caractériser le décalage phénologiques entre les deux classes d'âge.

De plus, pour permettre une bonne comparaison entre l'année de référence et l'année X, cette méthode s'appuie sur une hypothèse forte, qui est la constance de la forme de phénologie estimée entre les années pour une même espèce.

En utilisant le GAMM, l'information de l'ensemble du profil phénologique est incluse dans l'estimation d'un décalage phénologique entre années. Ainsi, j'ai utilisé les résultats produits par cette première méthode pour évaluer la robustesse de la seconde méthode utilisée, qui est le modèle mixte linéaire.

c. Estimation des variations interannuelles et test d'effets dans un modèle mixte linéaire multi-espèce

i. Modèles

Dans le cadre d'un modèle linéaire mixte (LMM), je modélise le premier jour de capture de chaque individu en fonction de l'année, de l'espèce et de leur interaction, en tenant compte de l'effet aléatoire de la station :

$$\text{Jour de capture} \sim \text{Année} * \text{Espèce} + (1 | \text{Station})$$

J'ai également réalisé un modèle LMM par espèce qui m'a permis de trouver que l'année 2019 est généralement l'année dont le coefficient est le plus proche de 0 sur l'ensemble des espèces. L'année 2019 a donc été choisie comme année référence dans les modèles LMM multi-espèces. Par ailleurs, les fluctuations annuelles de phénologie des deux espèces de mésanges PARCAE et PARMAJ n'ont été obtenues que via des modèles espèces spécifiques (Annexe). En effet, la migration de ces espèces est dite éruptive, c'est-à-dire qu'elle se manifeste sous forme de vagues condensées, ce qui implique que les phénologies sont très variables entre années. Elles n'ont pas été incluses dans le modèle multi-espèce pour ne pas biaiser les estimations produites pour les autres espèces.

J'ai également réalisé des modèles à l'échelle du type de migration (migrateurs de courte distance VS migrateurs transsahariens. Dans ce modèle par groupe d'espèces, j'intègre un effet aléatoire espèce pour prendre en compte les différences qu'il existe entre espèce :

$$\text{Jour de capture} \sim \text{Année} * \text{Migration} + (1|\text{Station}) + (1|\text{Espèce})$$

De plus, j'ai testé si la prise en compte de la variabilité de l'abondance entre les espèces influe sur les résultats obtenus. Pour ce faire, j'ai ajusté deux modèles différents, un modèle sur données complètes et un modèle sur données échantillonnées. Pour diminuer l'effet des espèces les plus abondantes, j'ai échantillonné au hasard des observations parmi les 6 espèces les plus abondantes (nombre d'individus allant de 269117 pour SYLATR à 38749 pour SYLBOR) de façon à ce que leur nombre d'individus soit égal à celui de la 7ème espèce (PHYLUS) la plus abondante, soit 32779 individus. Les résultats de ces deux types de modèles donnent des indications différentes sur la phénologie de migration. Dans le cas du modèle sur données complètes, je donne la même contribution dans l'estimation de la date moyenne de migration à toutes les espèces, quelle que soit l'abondance et je produis donc des variations inter-annuelles pour l'espèce moyenne au sein de chaque catégorie de migration. Alors que dans le cas du modèle sur données échantillonnées, je donne un poids aux espèces, proportionnellement à leur abondance, et je produis donc des variations de dates à l'échelle de l'ensemble des oiseaux pour chaque groupe de migrateurs.

ii. Avantages et contraintes

Cette deuxième méthode présente également des avantages et des inconvénients. Tout d'abord, utiliser un LMM contraint à estimer le changement du jour moyen entre années. Or la moyenne est sensible aux valeurs extrêmes asymétriques (p. ex. les rares occasions de capture d'oiseaux en très grand nombre). De plus, pour que les modèles convergent, le choix d'une distribution normale s'est imposé. J'ai donc réalisé un LMM plutôt qu'un GLMM basé sur un loi binomiale négative, qui aurait mieux pris en compte la légère asymétrie de la variable réponse. L'hypothèse selon laquelle la variable "jour de capture" suit une loi normale n'est cependant pas extravagante au vu de l'analyse de la distribution des résidus et de la répartition des résidus en fonction des valeurs observées.

Cependant, comparée à la première méthode, l'utilisation d'un LMM permet d'estimer les décalages phénologiques via un modèle intégrant toutes les espèces. Cela permet de capturer des variations communes entre différentes espèces et d'améliorer ainsi la compréhension de l'effet de l'année sur le cortège d'espèces choisies. C'est également plus approprié pour comparer les espèces et repérer des similarités entre les mêmes types de migration par exemple. Enfin, cette méthode permet également de mieux explorer les facteurs qui influencent la phénologie des oiseaux migrateurs étudiés, en testant l'effet d'un certain nombre de covariables. Cela permet de mieux expliquer la variation du nombre de captures par année mais aussi de mieux répondre à l'objectif de création d'un indicateur, en donnant la possibilité de documenter des fluctuations interannuelles pour différentes sous-catégories, par exemple entre individus juvéniles et adultes.

iii. Présentation des variables testées

J'ai sélectionné plusieurs variables d'intérêt pour tester leur effet sur la variation du jour de capture.

Il y a des variables géographique ou à l'échelle du site :

- La latitude (maximum = 51.02037, minimum = 42.56908, moyenne = 46.90393) comme variable géographique, qui permet de contrôler les effets spatiaux.
- La voie de migration. J'ai défini et attribué chaque site à une des deux voies de migrations (voie ouest et voie est) en coupant le territoire en deux. La provenance des oiseaux selon la voie de migration empruntée diffère (Dupuy, Sallé 2022). Ainsi, il est possible que la phénologie de migration soit impactée par la voie de migration (Annexe 3).
- Milieu. A chaque station est associée la catégorie de milieu buissonnant ou de zone humide selon si plus de 50% des individus capturés appartiennent à une espèce principalement inféodée au milieu buissonnant ou à la zone humide. Ainsi 93 stations sont de type milieu buissonnant et 20 stations de type zone humide (Annexe 4). Je m'attends à trouver des dates moyennes de migration qui diffèrent selon le milieu car cela peut influencer sur le mode de vie de l'espèce (par exemple sur son régime alimentaire) et les milieux peuvent être impactés de manière différente par les changements climatiques.

J'ai également testé l'effet de l'âge. Deux espèces (REGIGN et PHYCOL) présentaient une proportion trop importante d'individus classés comme d'âge inconnu, du fait de la difficulté à âger ces espèces avec certitude (Demongin 2016; Svensson 1992). Elles ont donc été retirées lors de l'ajustement des modèles incluant un effet de l'âge et son interaction avec l'effet espèce. De même, pour toutes les espèces, les individus d'âge inconnu ont été exclus dans les modèles contenant un effet de l'âge (Annexe 2).

iv. Sélection de modèles

J'ai procédé à des analyses comparatives en testant les effets de différentes variables, en les ajoutant successivement au modèle. À chaque étape, j'ai évalué si l'inclusion de la variable conduisait à une diminution des critères AIC et BIC. Si cette diminution n'était pas observée, la variable testée n'était pas retenue et je passais à l'examen d'autres effets. Le BIC a été calculé en plus de l'AIC car c'est un critère plus parcimonieux, qui pénalise plus le nombre de variables ajoutées aux modèles que l'AIC. Pour plus de rigueur, il aurait été préférable d'utiliser une méthode de sélection automatique, par exemple une procédure stepwise mais des problèmes de convergence m'ont obligée à réaliser une sélection à la main. J'ai dû utiliser des modèles restreints, c'est-à-dire sur les données sans les espèces PHYCOL et REGIGN, pour la comparaison au modèle avec effet de l'âge.

v. Estimation des variations interannuelles pour les individus précoces, intermédiaires et tardifs

J'ai également cherché à estimer les variations inter-annuelles de la phénologie séparément pour les individus précoces, intermédiaires et tardifs. Pour ce faire, j'ai réalisé un modèle

comprenant un effet quantile en s'inspirant des études documentant le décalage phénologique à différents quantiles de la distribution, notamment de Delacroix et al. (en cours de publication). Pour cela, j'ai créé une variable quantile comprenant 3 catégories : les individus précoces, représentant les 25% d'individus les plus précoces, les individus intermédiaires, représentant les 50% des individus se répartissant autour de la date médiane et les individus tardifs représentant les 25% d'individus les plus tardifs. J'ai identifié le jour à 25%, 50% et 75% de la phénologie de migration pour chaque espèce et année à partir des valeurs prédites par les modèles GAMM. J'ai intégré au modèle l'effet quantile, son interaction avec l'année, son interaction avec l'espèce et l'interaction entre quantile, espèce et année :

$$\text{Jour de capture} \sim \text{Année} * \text{Espèce} + \text{Latitude} + \text{Quantile} * \text{Espèce} + \text{Quantile} * \text{Année} + \text{Quantile} : \text{Année} : \text{Espèce} + (1 | \text{Station}) + (1 | \text{Espèce})$$

Il a été seulement possible d'inclure l'année comme une variable continue à cette étape et donc de produire des tendances temporelles pour chaque catégorie d'individus car il y avait un nombre trop important de paramètres à estimer dans le modèle avec l'année en facteur, ce qui empêchait sa convergence.

vi. Évaluer la robustesse du plan d'échantillonnage

En utilisant des données du protocole PHENO, dont la précision d'échantillonnage à l'échelle de chaque site est relativement faible (une session de baguage par semaine), je fais l'hypothèse que le phénomène de migration est suffisamment progressif et lissé dans le temps pour pouvoir être correctement estimé.

Pour évaluer la capacité de ce plan d'échantillonnage à détecter la date moyenne de migration, j'ai comparé les résultats d'un modèle sur données complètes (PHENO et SEJOUR) à ceux d'un modèle sur un jeu de données SEJOUR avec des captures journalières.

vii. Estimation des écarts à la moyenne

Pour rendre compte des fluctuations de la phénologie migratoire entre années, j'ai calculé les écarts à la moyenne à partir des marges ajustées. Ainsi dans les résultats présentés, un écart positif signifie un retard de la migration et un écart négatif indique d'une avance de la migration.

Partie III : Résultats

1. Profils de phénologie migratoire

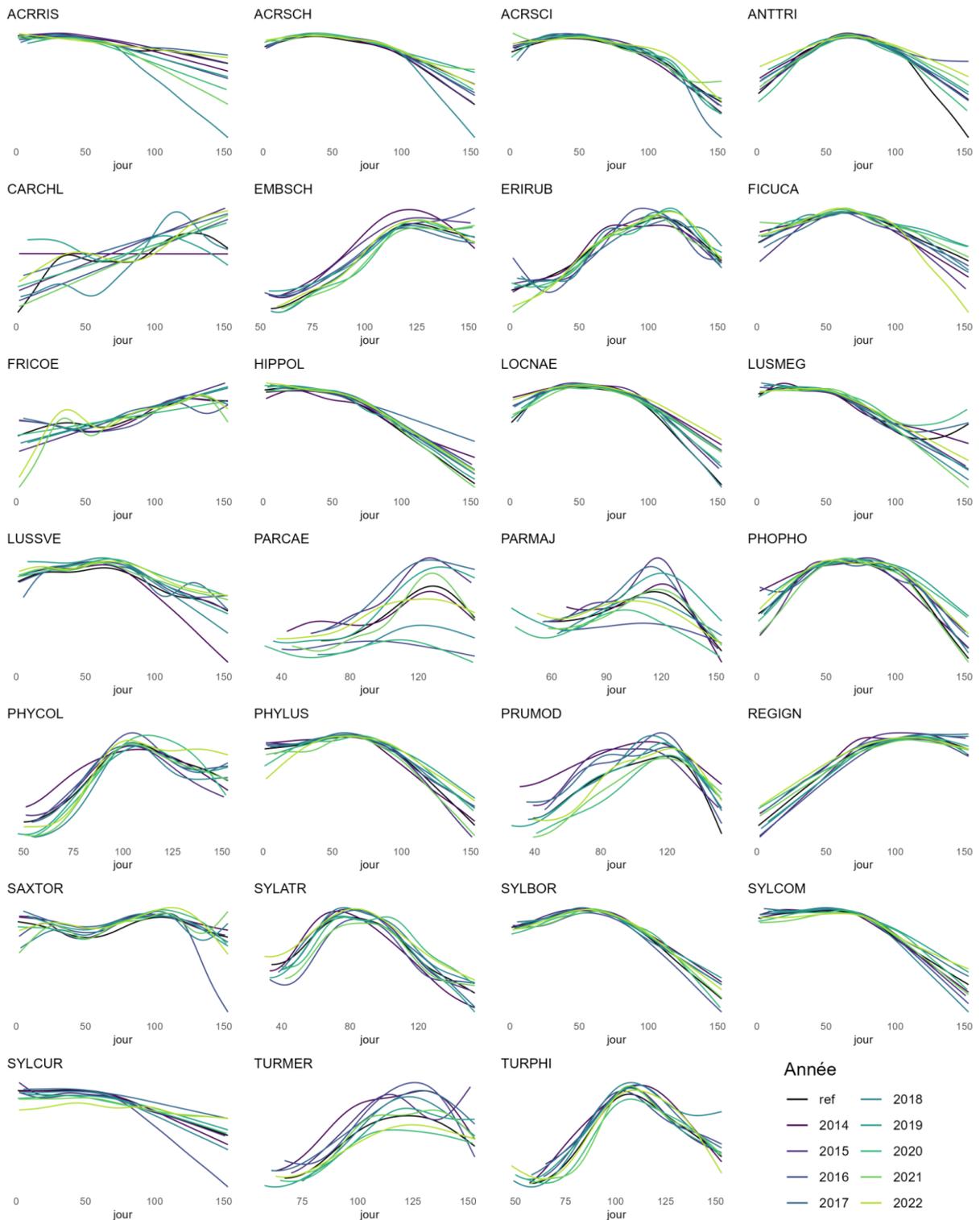


Figure 4 : Profils des phénologies de migration par espèces et par années estimées par GAMM (l'année "ref" est la phénologie moyenne calculée sur l'ensemble des années)

Compte tenu de l'impossibilité de modéliser une forme de phénologie pour certaines années pour les espèces CARCHL et FRICOE (Fig. 3), j'ai supprimé ces espèces a posteriori .

J'ai également supprimé les espèces ACRRIS, SAXTOR et SYLCUR, dont on sait que le nombre d'individus capturés par année est relativement faible (258 individus par année en moyenne) (Fig 2). Ce sont aussi des espèces pour lesquelles la forme de la phénologie estimée par GAMM n'est pas constante entre les années (Fig 4). De plus, ACRRIS et SYLCUR sont des espèces que l'on retrouve essentiellement dans le nord de la France et sont capturées par peu de stations (17 stations par année en moyenne) (Fig 2).

Les espèces EMBSCH, PARMAJ, PHYCOL, PRUMOD, SYLATR, TURMER et TURPHI présentaient un pic de dispersion post-nuptiale, qui a été supprimé. Ainsi, pour ces espèces, la phénologie ne débute pas au jour 0 mais au jour identifié pour la troncation de ce pic (Fig 4).

Visuellement, il apparaît que pour les espèces PARMAJ, PARCAE, PRUMOD, TURMER, ERIRUB, SAXTOR et dans une moindre mesure LUSSVE, LUSMEG, ACRRIS, SYLCUR ne respectent pas bien l'hypothèse de constance des formes de phénologie entre les années, un pré-requis pour l'estimation correcte des décalages de phénologie entre année (Fig 4).

2. Estimations des variation interannuelles par LMM

a. A l'échelle de l'espèce

(A) Modèles restreints

Modeles	AIC	BIC
Année + Espèce + Année:Espèce + (1 LIEUDIT)	6910976	6912876
Année + Espèce + Année:Espèce + Latitude + (1 LIEUDIT)	6910876	6912788
Année + Espèce + Année:Espèce + Latitude + Age + (1 LIEUDIT)	6909486	6911410
Année + Espèce + Année:Espèce + Latitude + Age + Age:Espece + (1 LIEUDIT)	6888770	6890891

(B) Modèles non restreints

Modeles	AIC	BIC
Année + Espèce + Année:Espèce + (1 LIEUDIT)	8087384	8087549
Année + Espèce + Année:Espèce + Latitude + (1 LIEUDIT)	8076866	8079015
Année + Espèce + Année:Espèce + Latitude + Voie + (1 LIEUDIT)	8076865	8079026
Année + Espèce + Année:Espèce + Latitude + Milieu + (1 LIEUDIT)	8076863	8079024

Table 1 : Comparaison des modèles à l'échelle de l'espèce : AIC et BIC des modèles à l'échelle de l'espèce. (A) Modèles restreints (sans les espèces REGIGN et PHYCOL et les individus d'âge "inconnu"); (B) Modèles non restreints avec toutes les espèces

Pour les modèles restreints (ajustés sur les données sans les espèces REGIGN et PHYCOL ainsi que les individus d'âge "inconnu"), le modèle présentant l'AIC et le BIC le plus faible est le modèle le plus complet, qui comprend l'effet de la latitude, celui de l'âge et son interaction avec l'espèce (Table 1.A).

Pour les modèles non restreints, le modèle incluant seulement l'effet de la latitude est celui avec l'AIC et le BIC les plus faibles (Table 1.B).

J'ai trouvé que les variations interannuelles de phénologie estimées en confondant les deux classes d'âge sont très similaires à celles estimées pour les juvéniles seuls. De plus la corrélation entre les valeurs prédites par le modèle sans âge et le modèle avec âge est de 0.99 (Annexe 5). Ce qui indique que, sur l'ensemble, il y a très peu de différences dans les variations interannuelles entre les juvéniles et les adultes. Il est donc plus parcimonieux d'ignorer l'effet de l'âge dans la perspective de production d'un indicateur annuel de phénologie de la migration. De plus ce choix nous permet de pouvoir estimer les fluctuations annuelles pour les deux espèces supprimées PHYCOL et REGIGN. Le R^2 du modèle final choisi ($\text{jour de capture} \sim \text{Année} * \text{Espèce} + \text{Latitude} + (1|\text{Station})$) de 0.57.

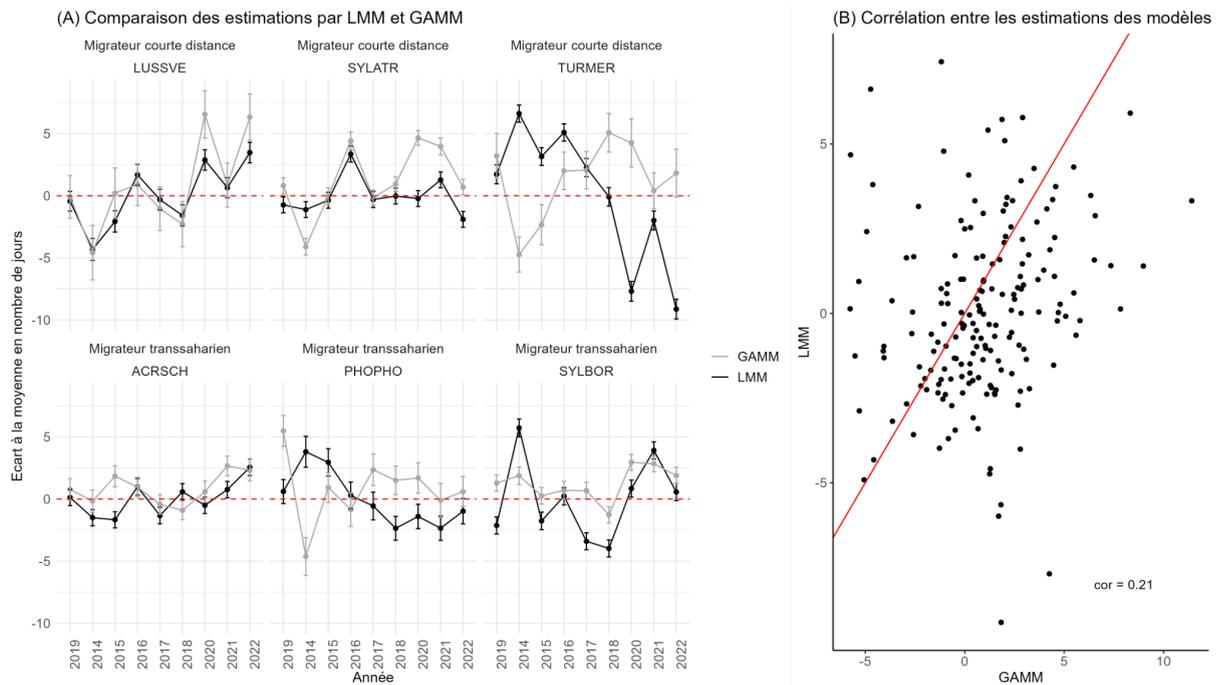


Figure 5 : Comparaison des estimations obtenues par la méthode GAMM et LMM. (A) Comparaison des variations interannuelles de phénologie estimés par GAMM et LMM; (B) Corrélation entre les estimations par GAMM et LMM

On observe des différences importantes entre les résultats produits par GAMM et ceux produits par LMM (Fig 5.A). La corrélation entre les estimations issues des deux méthodes ne s'élève qu'à 0.20 (Fig 5.B), ce qui indique une faible robustesse de la méthode d'analyse basée sur le LMM. On note que la différence est souvent plus importante lorsqu'il s'agit des espèces pour lesquelles la constance de forme de la phénologie entre les années ne semblait pas bien respectée (Fig 4).

b. A l'échelle du type de migration

(A) Modèles restreints

Modeles	AIC	BIC
Modèle restreint Année + Migration + Année:Migration + (1 LIEUDIT)	6917477	6917721
Modèle restreint Année + Migration + Année:Migration + Latitude + (1 LIEUDIT)	6917377	6917631
Année + Migration + Année:Migration + Latitude + Age + (1 LIEUDIT)	6915980	6916247
Année + Migration + Année:Migration + Latitude + Age + Age:Migration + (1 LIEUDIT)	6905924	6906203

(B) Modèles non restreints

Modeles	AIC	BIC
Année + Migration + Année:Migration + (1 LIEUDIT)	8085366	8085613
Année + Migration + Année:Migration + Latitude + (1 LIEUDIT)	8085256	8085514
Année + Migration + Année:Migration + Latitude + Voie + (1 LIEUDIT)	8085255	8085526
Année + Migration + Année:Migration + Latitude (1 Milieu/LIEUDIT)	8085258	8085528

Table 2 : Comparaison des modèles à l'échelle du type de migration : AIC et BIC des modèles à l'échelle de l'espèce. (A) Modèles restreints (sans les espèces REGIGN et PHYCOL et les individus d'âge "inconnu"); (B) Modèles non restreints avec toutes les espèces

A l'échelle du type de migration, le modèle restreint avec les plus faibles AIC et BIC inclut l'effet de la latitude, de l'âge et son interaction avec l'espèce (Table 2.A) et le modèle non restreint pour lequel l'AIC et le BIC sont le plus faibles, inclut seulement celui de la latitude (Table 2.B). Comme à l'échelle de l'espèce, la comparaison des décalages phénologiques estimés pour tous âges confondus et pour les juvéniles ne montrait pas de différences importantes et la corrélation entre les valeurs prédites par les modèles sans et avec effet de l'âge s'élevait à 0.99. Le modèle conservé est aussi celui intégrant l'effet de la latitude ($jour\ de\ capture \sim Année * Type\ de\ migration + Latitude + (1|Station) + (1|Espèce)$), $R^2 = 0.62$.

Comparaison des fluctuations interannuelles estimés par des modèles sur données complètes ou échantillonnées

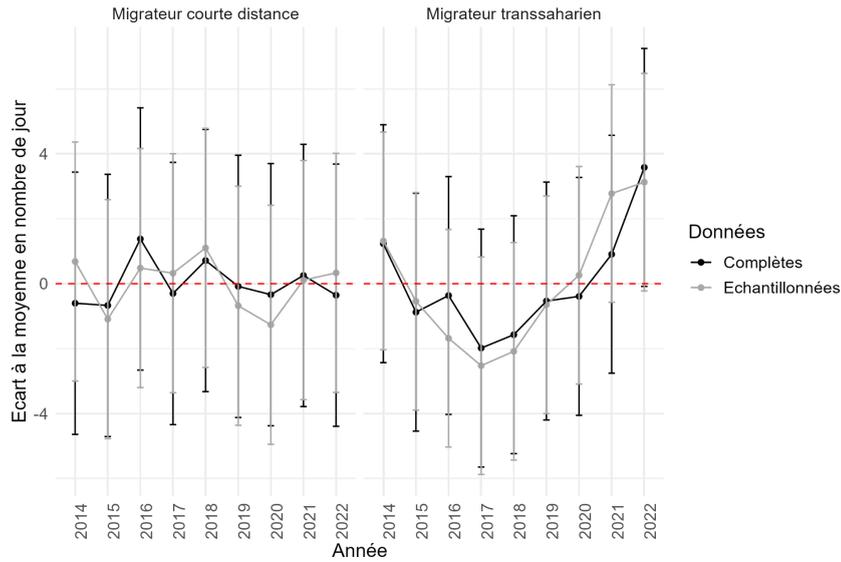


Figure 6 Variations inter-annuelles de la phénologie migratoire à l'échelle du type de migration. Les points représentent les écarts à la moyenne et les barres les intervalles de confiance à 95%.

Les migrateurs transsahariens semblent être passés relativement tardivement ces dernières années (2021-2022), après une période de migration plutôt précoce (2017-2018, Fig 6). On ne remarque pas de différences très importantes entre les résultats du modèle sur données complètes et ceux du modèle sur données échantillonnées. Pour les migrateurs courte distance, il ne semble pas y avoir de changement au cours de la période d'étude (Fig 6). Dans tous les cas, les intervalles de confiance autour des estimations indiquent qu'il y a beaucoup de variations entre les espèces pour un même type de migration, il est donc difficile d'assumer une direction de changement dans les dates de migrations à l'échelle de ces deux groupes d'espèces (Fig 6).

c. Pour les individus précoces, intermédiaires et tardifs

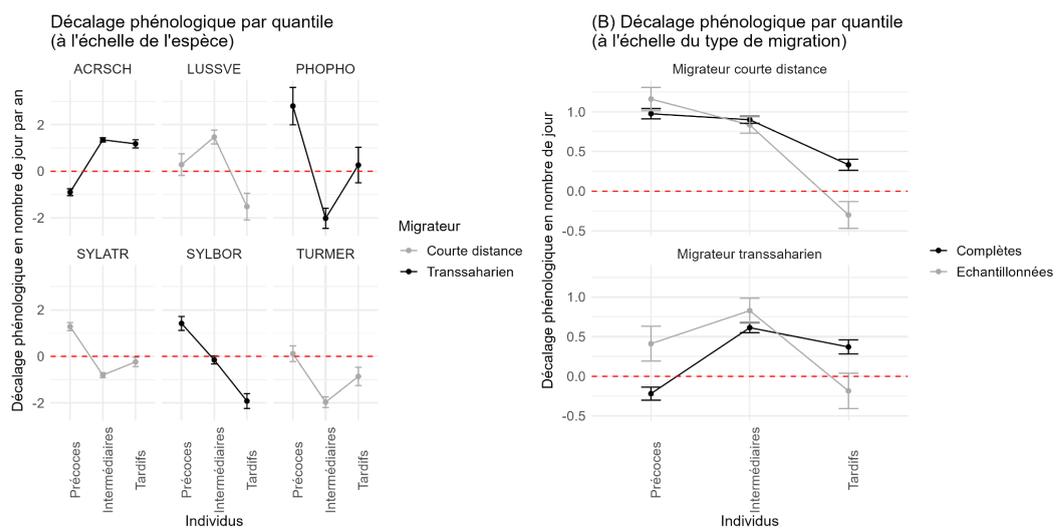


Figure 7 : Décalage phénologique pour les individus précoces, intermédiaires et tardifs. (A) : à l'échelle de l'espèce; (B) : à l'échelle du type de migration

Les tendances temporelles de décalages phénologiques par quantiles sont différentes pour beaucoup d'espèces (Figure 7.A.). On trouve pour certaines espèces, comme ACRSCH, une migration avancée pour les individus précoces mais retardée pour les individus tardifs, ce qui indique que la période de migration a tendance à s'élargir. A l'inverse, on trouve pour d'autres espèces, comme SYLBOR, que les individus précoces ont tendance à passer plus tard au fil des années tandis que les individus tardifs ont tendances à migrer plus tôt que d'habitude, indiquant cette fois que la période de migration se rétrécit (Fig. 7.A).

A l'échelle du type de migration, on observe que les individus intermédiaires ont tendance à passer plus tard (de l'ordre de 1 jour par an) pour les migrateurs courte distance comme transsahariens, aussi bien en données complètes qu'échantillonnées. On remarque des différences concernant les individus précoces et tardifs. Pour les migrateurs courte distance, les individus précoces et intermédiaires montrent une tendance similaire en condition sur données complètes et échantillonnées. Ces individus semblent migrer environ 1 jour plus tard par an. Cependant, on observe que le modèle sur données complètes estime une migration retardée pour les individus tardifs, alors que le modèle sur données échantillonnées estime un passage avancé. Pour les migrateurs transsahariens, en conditions sur données complètes, les individus précoces ont tendance à migrer plus tôt au cours des années tandis que les tardifs migrent plus tard, indiquant un allongement de la période de migration. Cependant, la situation s'inverse sur données échantillonnées, indiquant que la période de migration se rétrécit lorsque l'on donne un poids identique à chaque espèce (Fig 7.B).

d. Robustesse du plan d'échantillonnage

Il y a des différences dans les décalages estimés sur données complètes et sur données SEJOUR (Annexe 12) et la corrélation entre les valeurs estimées par le modèle sur données complètes et par le modèle sur données SEJOUR est faible (0.23) (Annexe). Ces différences sont plus importantes pour certaines espèces (TURMER, ANTTRI) que pour d'autres (ACRSCH, SYLATR) (Annexe 12).

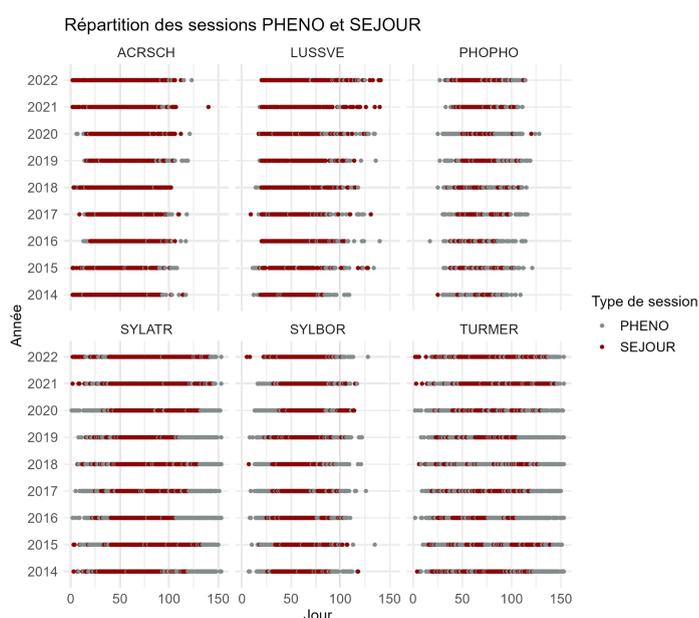


Figure 8 : Répartition des sessions PHENO et SEJOUR sur la période étudiée par espèce et année

Les données SEJOUR sont peu nombreuses et couvrent mal la période de migration de certaines espèces, c'est le cas de l'espèce TURMER en 2016 par exemple. Tandis que pour d'autres, comme ACRSCH, les données SEJOUR se superposent bien aux données PHENO et couvrent mieux la période de migration (Fig 8).

Partie V : Discussion

1. Robustesse du plan d'échantillonnage

L'indicateur national sur la phénologie de migration des passereaux communs s'appuie essentiellement sur les données issues du protocole PHENO. Je supposais donc que le phénomène de migration était suffisamment progressif dans le temps pour être correctement défini par une fréquence d'échantillonnage à hauteur d'une session par semaine. Pour vérifier cette hypothèse, j'ai comparé les estimations de variations interannuelles de phénologie produites par un modèle sur données complètes et celles produites par un modèle sur données issues du protocole SEJOUR (une session par jour). Les résultats des deux modèles diffèrent grandement pour les espèces avec peu de données SEJOUR, qui couvrent mal la période de migration. Dans ces cas, les données SEJOUR ne semblent donc pas adéquates pour servir de données contrôles. Pour d'autres espèces, dont les données SEJOUR couvrent bien la période de migration, les fluctuations interannuelles estimées par les deux modèles sont plus similaires. Ce qui indiquerait que le plan d'échantillonnage est robuste pour détecter la date moyenne de migration. Cependant, il est difficile de bien distinguer si pour toutes les espèces les différences observées sont dues à une trop faible quantité de données SEJOUR ou à une mauvaise adéquation du protocole PHENO pour estimer des dates de migration moyenne.

Il serait intéressant de simuler différentes situations de migration (d'une migration très progressive et lissée dans le temps à des passages concentrés et irréguliers) afin d'identifier si une précision d'échantillonnage d'un jour par semaine est adéquate pour détecter la date moyenne de migration. Si ce n'est pas le cas, il serait peut-être nécessaire d'imposer la réalisation de plus de sessions pendant les 10 semaines du protocole PHENO, ce qui impliquerait d'augmenter l'investissement humain et matériel des stations.

Cependant, je devrais pouvoir me fier au fait que les données utilisées sont appropriées pour estimer les variations inter-annuelles de phénologie à l'échelle nationale. En effet, en agrégeant les données de plusieurs stations, je trouve que la répartition des sessions utilisées couvrent bien les périodes de migration de chaque espèce et leur fréquence est finalement proche d'une session par jour.

2. Robustesse de la méthode d'analyse basée sur le modèle linéaire mixte

J'ai utilisé les résultats de la méthode basée sur le GAMM pour évaluer la robustesse des estimations produites par LMM. Cependant, je peux m'interroger sur la capacité de la méthode par GAMM à produire des décalages phénologiques réalistes pour toutes les espèces. En effet, la visualisation de la forme de phénologie obtenue par GAMM par espèce et par année montre que l'hypothèse de constance de forme entre les années n'est pas toujours bien respectée pour certaines espèces. Cela représente 6 espèces sur 21 (en ne comptant pas les deux espèces supprimées en post-traitement de données). Ce sont d'ailleurs pour les espèces

dont la constance de formes est la moins respectée que les différences d'estimation entre les deux méthodes sont les plus importantes (c'est-à-dire que la direction du changement de date de migration par année sont opposées), comme pour l'espèce TURMER. Par ailleurs, le fait que la méthode basée sur le GAMM n'a pas fonctionné à produire des estimations de décalages phénologiques réalistes pour l'espèce PARCAE, l'une des espèces pour laquelle la constance de forme est la moins respectée, suggère que cette hypothèse doit être respectée pour produire des estimations de décalages pertinentes.

Cependant, pour les espèces dont la constance de forme est mieux respectée, par exemple l'espèce ACRSCH, les différences sont faibles. Les retards ou avancées estimées sont plus ou moins importants selon la méthode mais les écarts à la moyenne sont de même direction. Dans ces cas, cela suggère donc que la méthode d'analyse par LMM est robuste.

Enfin, le fait d'avoir généré des 0 pour informer de l'absence d'une espèce à un site et une date échantillonnés dans le cadre de la modélisation par GAMM peut impliquer de produire des estimations différentes entre les méthodes. Cela pourrait expliquer que l'on trouve des écarts dans les valeurs même pour les espèces dont les profils de phénologie se ressemblent entre année.

3. Hypothèses du modèle linéaire mixte

En ce qui concerne la méthode basée sur le modèle linéaire mixte, plusieurs contraintes peuvent être discutées également.

Tout d'abord, utiliser ce type de modèle contraint de se baser sur la moyenne du jour de capture. Or, les changements de dates de phénologie migratoires peuvent être d'ampleur différentes voir changer de direction entre les individus aux deux extrémités de la distribution (Delacroix et al., en cours de publication; Mills, 2005; Van Buskirk et al., 2009). En ajoutant un effet quantile, j'ai pu produire des estimations de décalages phénologiques pour plusieurs portions de la distribution. Cela permet de comparer les moyennes des individus les plus précoces et celles des individus les plus tardifs. Cependant, je n'ai réussi qu'à estimer les tendances sur la période d'étude et non pas les variations interannuelles. Comme la période d'étude est relativement courte, il faut être précautionneux dans l'interprétation des résultats. Pour produire des tendances sur le long terme, deux solutions pourraient être envisagées. La première serait d'attendre d'avoir une période plus longue pour estimer à nouveau les décalages phénologiques pour les différents types d'individus. La deuxième serait d'agréger les données d'années antérieures à 2014 pour les stations dont le plan d'échantillonnage était déjà similaire à celui imposé par la standardisation du protocole en 2014 (au moins une session par semaine pendant 10 semaines).

De plus, il est possible que la relation entre le jour de la capture et les prédicteurs ne soit pas linéaire. En effet, Haest et al. (2019), ont montré qu'un modèle comprenant un terme quadratique décrivait mieux la tendance temporelle de la date moyenne annuelle de passage à l'automne (MAPD) qu'un modèle linéaire pour certaines espèces. Pour être en mesure de se fier aux tendances produites, il faudrait donc tester si l'ajout d'un terme quadratique améliore l'ajustement du modèle.

Pour certaines espèces, la distribution du jour de capture présente une légère asymétrie (5 espèces sur 20 présente un biais vers la précocité (Annexe 6), ce qui implique une sous-estimation des variations interannuelles. Pour tester cela, je pourrais simuler différents scénarios d'asymétrie (distribution non-asymétrique, biaisée vers la précocité) et évaluer si les coefficients estimés par LMM sont significativement différents entre les scénarios. S'il n'y a pas de différence, cela suggère que les variations interannuelles sont sous-estimées. Dans ce cas, il pourrait être intéressant d'utiliser une méthode d'échantillonnage ou de pondération, pour donner un poids plus important aux individus précoces dans le modèle LMM, afin de corriger une sous-estimation des coefficients

J'ai fait l'hypothèse que les fluctuations interannuelles présenteraient des patrons différents entre les migrateurs de courte distance et les migrateurs transsahariens. Or, il y a beaucoup de variabilité entre les espèces au sein des migrateurs de courte distance comme des migrateurs transsahariens, ce qui ne permet pas de documenter d'avancée ou de retard de la migration chaque année. Jenni & Kéry (2003) ont documenté le décalage de phénologie post-nuptial pour 65 espèces de migrateurs de longue et de courte distance. Ils ont trouvé que la majorité des espèces de longue distance avancent leur date de passage tandis que la majorité des migrateurs de courte distance la retardent. Cependant, quelques espèces, parmi les longue distance (5 sur 20) et les courte distance (12 sur 28) montrent des tendances dans la direction opposée. Cela soutient le fait qu'il existe de la variabilité entre les espèces au sein de ces groupes. Il est donc possible que les variations interannuelles de phénologie soient aussi spécifiques à l'espèce. Une autre explication serait que la définition des catégories de migration est trop imprécise. En effet, il pourrait exister des sous-catégories, au sein des migrateurs de courte distance notamment, qui comprennent aussi bien des espèces résidentes que des migrateurs partiels et complets (Dupuy & Sallé, 2022). Pour identifier le nombre de classes de migrateurs, il pourrait être intéressant d'utiliser une méthode de regroupement, comme le clustering hiérarchique qui permet de ne pas avoir d'a priori sur le nombre de classes.

A l'échelle du type de migration, j'ai également réalisé deux types de modèle (sur données complètes et échantillonnées) pour évaluer l'effet de la prise en compte de l'abondance sur les fluctuations interannuelles. Les résultats du modèle sur données échantillonnées ne sont pas très différents de ceux du modèle sur données complètes. Cependant, les deux modèles incluent un effet aléatoire de l'espèce, qui permet déjà de prendre en compte les différences d'abondance. Il faudrait réaliser d'autres modèles ne comprenant pas d'effet aléatoire de l'espèce, en condition sur données complètes et échantillonnées pour observer des différences.

4. Effet des prédicteurs

La variable "voie de migration" n'a pas été sélectionnée à l'étape de comparaison des modèles, suggérant qu'il n'y pas de différence dans la phénologie de migration des oiseaux provenant du nord-ouest et passant le long de la façade atlantique et celle des migrateurs provenant du nord et nord-est et passant par l'autre voie. Cependant, il n'existe pas de référence bibliographique exacte pour attribuer une des deux voies de migration à chaque station. Ainsi, il pourrait être possible que la définition des voies ne soit pas suffisamment précise. Pour mieux discriminer les différentes voies de migration, il serait pertinent d'utiliser

des données d'oiseaux bagués et recontrôlés ultérieurement pour observer les voies de migrations.

De même, j'ai trouvé que le milieu n'affecte pas de manière significative les variations du jour de capture. Mon hypothèse d'une phénologie de migration différentes selon le milieu ne s'appuyait pas sur des références dans la littérature, il est donc possible que le milieu ne soit pas un facteur discriminant. Il faut également noter qu'il y a un déséquilibre important entre les deux classes de milieux (5 espèces de zone humide et 15 espèces de milieu buissonnant).

J'ai trouvé un effet significatif de l'âge, indiquant qu'il existe une différence dans les dates de passage entre les individus juvéniles et adultes. Cependant, l'âge ne modifie pas significativement la valeur de la date moyenne. Il n'y a donc pas d'intérêt à garder un effet de l'âge dans un objectif d'indicateur. Néanmoins, la répartition des individus dans chaque catégorie est très déséquilibrée (les juvéniles représentent environ 80% des individus pour la plupart des espèces; Annexe 2), ce sont de fait surtout des juvéniles qui sont capturés en période de migration post-nuptial, soit juste après la reproduction, car c'est à cette période que le nombre de jeunes individus est maximal.

5. Comparaison à la littérature

En estimant les variations interannuelles de la phénologie de migration, il est difficile de pouvoir comparer mes résultats car cette approche a été très peu étudiée. Lehikoinen et al. (2019), ont produit un indicateur documentant la variation annuelle de la phénologie pré-nuptiale pour l'ensemble des espèces étudiées (195 espèces) sur la période 1959-2015. Cet indicateur estime l'écart entre la date médiane de passage de chaque année avec celle de l'année 1959. Entre deux années consécutives, l'écart à l'année de référence peut être très différents. Par exemple, dans les années très précoces (1960-1961), on trouve des différences d'environ 5 jours. Pour les années tardives (2014-2015), on trouve une différence de 3 jours. Ainsi, il ne semble pas étonnant de caractériser des écarts de plusieurs jours certaines années (par exemple de l'ordre de 5 jours). Cependant, Lehtikoinen et al. (2019) ont étudié la migration pré-nuptiale sur une période longue, depuis les années 60, au moment où les changements climatiques devaient induire de fortes réponses chez les espèces. La comparaison avec leur indicateur n'est donc pas non plus idéale.

Partie VI : Conclusion et perspectives

En conclusion, l'indicateur produit permet de montrer les variations interannuelles de la date de migration à l'échelle de l'espèce. L'âge, la voie de migration et le milieu n'impacte pas suffisamment la valeur de l'indicateur pour que celui-ci soit désagrégé en catégorie d'espèces de zone humide et de milieu buissonnant ou de voie est et ouest, ni même en catégories d'individus juvéniles et adultes. De la même manière, il n'est pas approprié de documenter une valeur d'écart selon le type de migration du fait de la forte variabilité entre les espèces.

Des étapes supplémentaires sont à mener avant la mise en production automatique de l'indicateur. Tout d'abord, un travail d'analyse plus poussé pour le contrôle de la robustesse du plan d'échantillonnage et de la modélisation devrait être réalisé. De plus, il existe des étapes manuelles dans l'analyse, comme l'identification et la suppression du signal de dispersion

post-nuptiale au moment de la visualisation des profils phénologiques ou bien le choix de l'année de référence pour le modèle LMM, qui sont un frein à une mise à jour annuelle automatique de l'indicateur. Il serait donc judicieux de réfléchir à des alternatives.

A terme, l'indicateur pourrait être publié de plusieurs manières. Les variations interannuelles de phénologie pourraient être présentées sur la plateforme du CRBPO. Cela permettrait aux gestionnaires de sites ou à un public intéressé de connaître le décalage de l'année en cours pour des espèces d'intérêt. L'indicateur pourrait aussi enrichir les fiches espèces présentées par l'Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN). L'INPN est le portail national dédié à la biodiversité et à la géodiversité, qui diffuse des connaissances sur les espèces, les milieux naturels, les espaces protégés et le patrimoine géologique de France. On y trouve des fiches de présentation des espèces donnant un certain nombre d'informations, par exemple sur la classification ou la distribution de l'espèce. Une rubrique pourrait être destinée aux variations de dates de migrations. Enfin, il serait possible de publier un indicateur de variations interannuelles des dates de migration des passereaux communs de France sur l'observatoire national de la biodiversité (ONB), un service national mettant à disposition du public des informations documentées sur la biodiversité, notamment sous la forme d'indicateurs.

Bibliographie

Agence européenne pour l'environnement. (1998). L'environnement en Europe, deuxième évaluation,... - Agence européenne pour l'environnement—Office des publications officielles des Communautés...

Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365–377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>

Brisson-Curadeau, É., Elliott, K. H., & Côté, P. (2020). Factors influencing fall departure phenology in migratory birds that bred in northeastern North America. *The Auk*, 137(1), ukz064. <https://doi.org/10.1093/auk/ukz064>

Cotton, P. A. (2003). Avian migration phenology and global climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(21), 12219–12222. <https://doi.org/10.1073/pnas.1930548100>

CRBPO. (2023, August 1). <https://crbpo.mnhn.fr/>

Crick, H. Q. P., Dudley, C., Glue, D. E., & Thomson, D. L. (1997). UK birds are laying eggs earlier. *Nature*, 388(6642), Article 6642. <https://doi.org/10.1038/41453>

Date d'arrivée des oiseaux migrants. (2023, January 9). naturefrance. <http://naturefrance.fr/indicateurs/date-darrivee-des-oiseaux-migrants>

Demongin, L. (2016). *Identification Guide to Birds in the Hand*.

Dupuy, J., & Sallé, L. (2022). *Atlas des Oiseaux Migrateurs de France (Illustrated édition)*. BIOTOPE.

Gallinat, A. S., Primack, R. B., & Wagner, D. L. (2015). Autumn, the neglected season in climate change research. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(3), 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.01.004>

Gordo, O. (2007). Why are bird migration dates shifting? A review of weather and climate effects on avian migratory phenology. *Climate Research*, 35, 37–58. <https://doi.org/10.3354/cr00713>

Haest, B., Hüppop, O., van de Pol, M., & Bairlein, F. (2019). Autumn bird migration phenology: A potpourri of wind, precipitation and temperature effects. *Global Change Biology*, 25(12), 4064–4080. <https://doi.org/10.1111/gcb.14746>

Heink, U., & Kowarik, I. (2010). What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning. *Ecological Indicators*, 10(3), 584–593. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.09.009>

Horton, K. G., Morris, S. R., Van Doren, B. M., & Covino, K. M. (2023). Six decades of North American bird banding records reveal plasticity in migration phenology. *Journal of Animal Ecology*, 92(3), 738–750. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13887>

Hüppop, O., & Ppop, K. H. (2003). North Atlantic Oscillation and timing of spring migration in birds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 270(1512), 233–240. <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2236>

IPBES. (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6417333>

Jenni, L., & Kéry, M. (2003). Timing of autumn bird migration under climate change: Advances in long-distance migrants, delays in short-distance migrants. *Proceedings. Biological Sciences*, 270(1523), 1467–1471. <https://doi.org/10.1098/rspb.2003.2394>

Jonzén, N., Lindén, A., Ergon, T., Knudsen, E., Vik, J. O., Rubolini, D., Piacentini, D., Brinch, C., Spina, F., Karlsson, L., Stervander, M., Andersson, A., Waldenström, J., Lehikoinen, A., Edvardsen, E., Solvang, R., & Stenseth, N. C. (2006). Rapid advance of spring arrival dates in long-distance migratory birds. *Science (New York, N.Y.)*, 312(5782), 1959–1961. <https://doi.org/10.1126/science.1126119>

Kirby, J. S., Stattersfield, A. J., Butchart, S. H. M., Evans, M. I., Grimmett, R. F. A., Jones, V. R., O'Sullivan, J., Tucker, G. M., & Newton, I. (2008). Key conservation issues for migratory land- and waterbird species on the world's major flyways. *Bird Conservation International*, 18(S1), S49–S73. <https://doi.org/10.1017/S0959270908000439>

Lehikoinen, A., Lindén, A., Karlsson, M., Andersson, A., Crewe, T. L., Dunn, E. H., Gregory, G., Karlsson, L., Kristiansen, V., Mackenzie, S., Newman, S., Røer, J. E., Sharpe, C., Sokolov, L. V., Steinholtz, Å., Stervander, M., Tirri, I.-S., & Tjørnløv, R. S. (2019). Phenology of the avian spring migratory passage in Europe and North America: Asymmetric advancement in time and increase in duration. *Ecological Indicators*, 101, 985–991. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.083>

Lehikoinen, E., Sparks, T. H., & Zalakevicius, M. (2004). Arrival and Departure Dates. In *Advances in Ecological Research* (Vol. 35, pp. 1–31). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(04\)35001-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(04)35001-4)

Marra, P. P., Francis, C. M., Mulvihill, R. S., & Moore, F. R. (2005). The influence of climate on the timing and rate of spring bird migration. *Oecologia*, 142(2), 307–315. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1725-x>

Mills, A. (2005). Changes in the timing of spring and autumn migration in North American migrant passerines during a period of global warming. *Ibis*, 147, 259–269. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2005.00380.x>

Moussus, J.-P., Julliard, R., & Jiguet, F. (2010). Featuring 10 phenological estimators using simulated data. *Methods in Ecology and Evolution*, 1(2), 140–150. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00020.x>

Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G., & Nemani, R. R. (1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386(6626), Article 6626. <https://doi.org/10.1038/386698a0>

Parmesan, C. (2006). Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37(1), 637–669. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>

Pereira, H. M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G. N., Jongman, R. H. G., Scholes, R. J., Bruford, M. W., Brummitt, N., Butchart, S. H. M., Cardoso, A. C., Coops, N. C., Dulloo, E., Faith, D. P., Freyhof, J., Gregory, R. D., Heip, C., Höft, R., Hurtt, G., Jetz, W., ... Wegmann, M. (2013). Essential Biodiversity Variables. *Science*, 339(6117), 277–278. <https://doi.org/10.1126/science.1229931>

Primack, R. B., Ibáñez, I., Higuchi, H., Lee, S. D., Miller-Rushing, A. J., Wilson, A. M., & Silander, J. A. (2009). Spatial and interspecific variability in phenological responses to warming temperatures. *Biological Conservation*, 142(11), 2569–2577. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.06.003>

Roy, D. B., & Sparks, T. H. (2000). Phenology of British butterflies and climate change. *Global Change Biology*, 6(4), 407–416. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00322.x>

Sparks, T. H., Bairlein, F., Bojarinova, J. G., Hüppop, O., Lehikoinen, E. A., Rainio, K., Sokolov, L. V., & Walker, D. (2005). Examining the total arrival distribution of migratory birds. *Global Change Biology*, 11(1), 22–30. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00887.x>

Svensson, L. (1992). *Identification Guide to European Passerines*. The author.

Van Buskirk, J., Mulvihill, R. S., & Leberman, R. C. (2009). Variable shifts in spring and autumn migration phenology in North American songbirds associated with climate change. *Global Change Biology*, 15(3), 760–771. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01751.x>

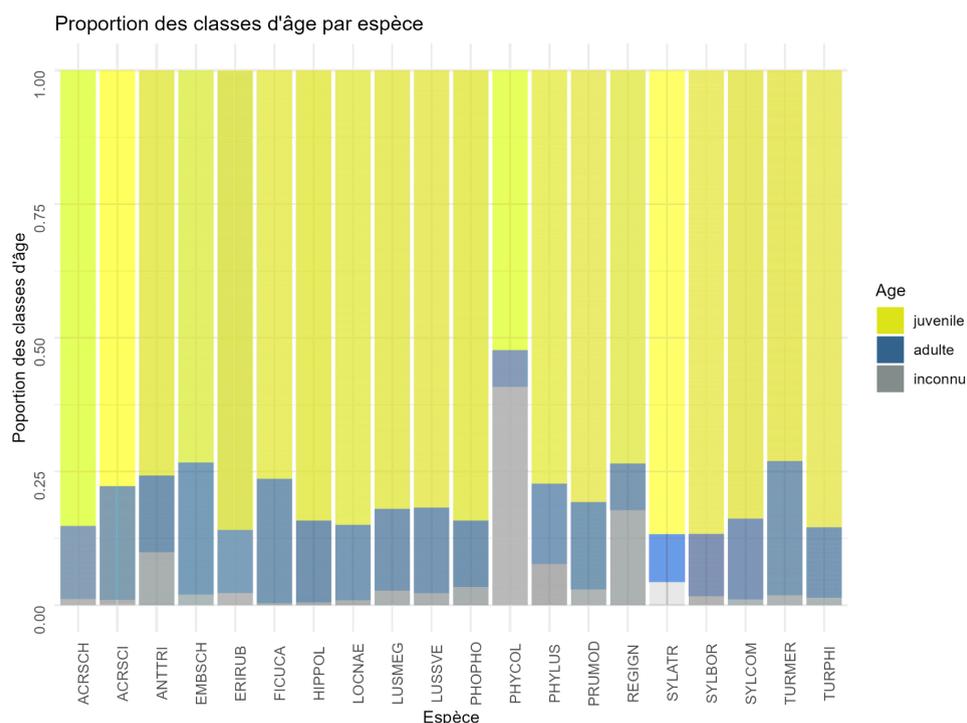
Zucca, M. (2015). *La migration des oiseaux: Comprendre les voyageurs du ciel* (Editions Sud Ouest).

Annexes

Annexe 1 : Tableau de définitions d'indicateurs utilisés dans le domaine de l'écologie

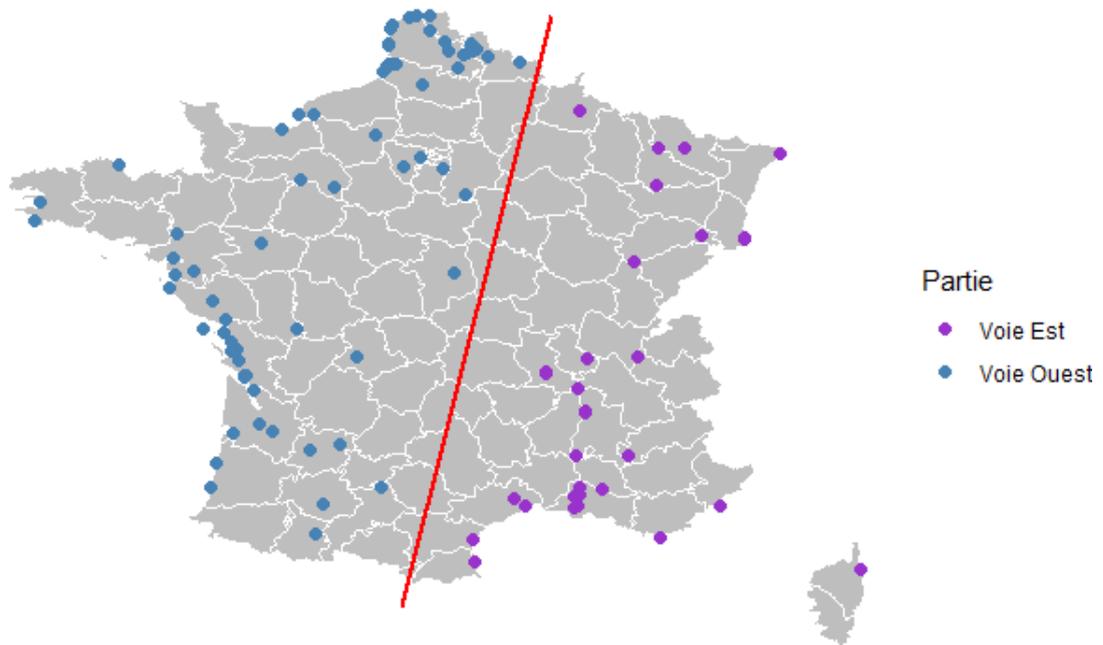
Auteur (date)	Définition
Noss (1990)	Les indicateurs sont des substituts mesurables pour des paramètres environnementaux tels que la biodiversité qui sont supposés avoir une valeur pour le public
Alfsen et Sæbø (1997)	Nombre indiquant l'état et le développement de l'environnement ou des conditions affectant l'environnement. Donne des informations supplémentaires que ce qui est directement mesuré ou observé (valeur du paramètre ou des informations statistiques). Doit donc être placé dans un contexte à partir duquel il est possible de déduire ce qui est indiqué.
Agence européenne de l'environnement (1998)	Mesure, généralement quantitative, qui peut être utilisée pour illustrer et faire connaître de façon simple des phénomènes complexes, y compris des tendances et des progrès dans le temps
Valse (2000)	Variable décrivant l'état d'un système
Duelli et Obrist (2003)	Corrélat mesurable à l'entité à évaluer.
Rempel et al (2004)	Un indicateur est une valeur observée représentative d'un phénomène d'étude. En général, les indicateurs quantifient les informations en agrégeant des données différentes et multiples.
Burger (2006)	Indice ou paramètre de mesure pour évaluer la santé d'un système (économique, physique, biologique, humain)

Annexe 2 : Proportion d'individus par classe d'âge par espèce



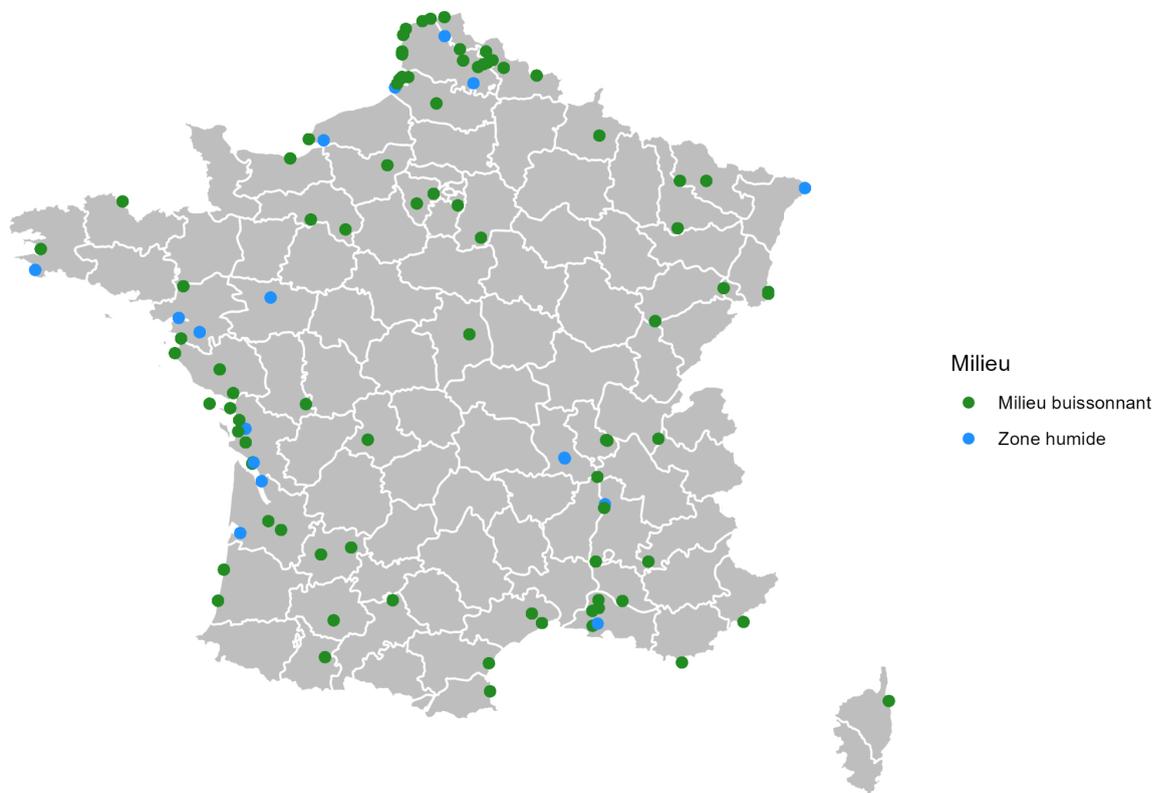
Annexe 3 : Voies de migration (ouest et est)

Représentation des voies de migration à l'échelle de la France métropolitaine



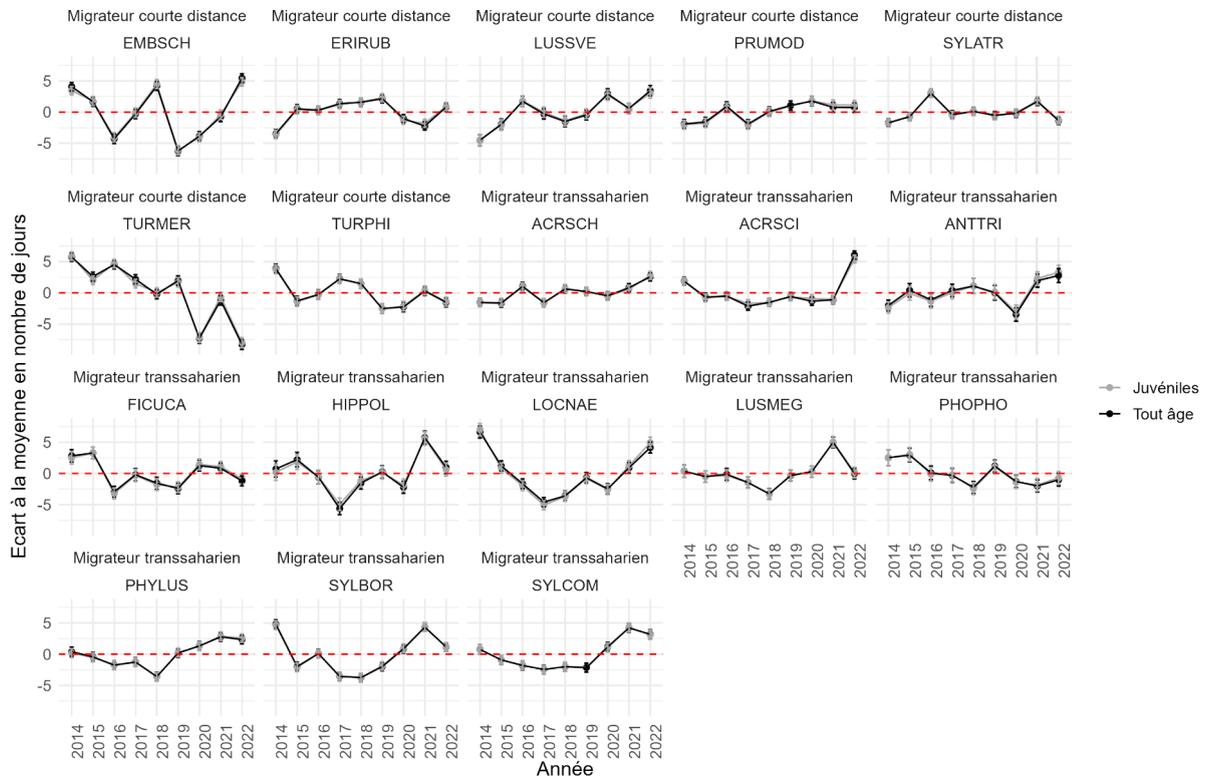
Annexe 4 : Répartition des stations selon le milieu (Zone humide ou milieu buissonnant)

Répartition des stations (sur la période 2014-2022) selon le milieu

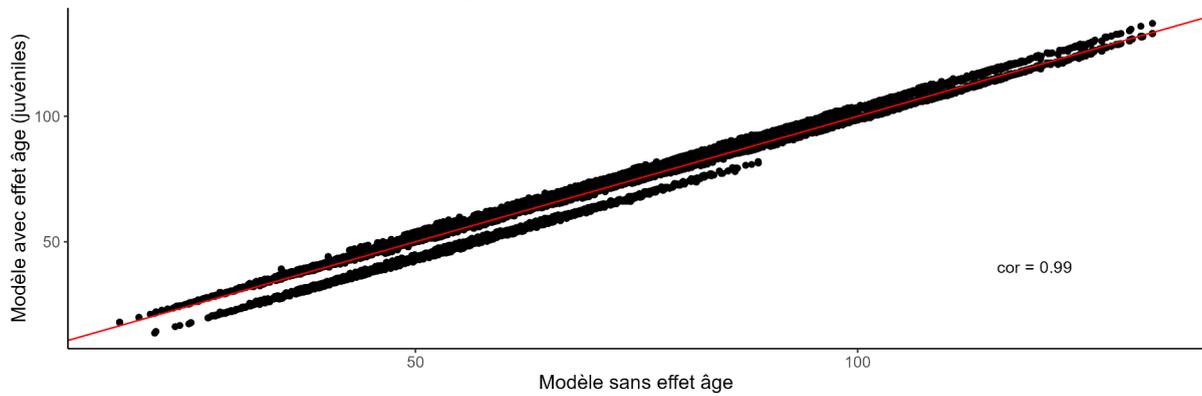


Annexe 5 : Comparaison des variations interannuelles estimées par un modèle sans effet de l'âge et un modèle avec effet de l'âge

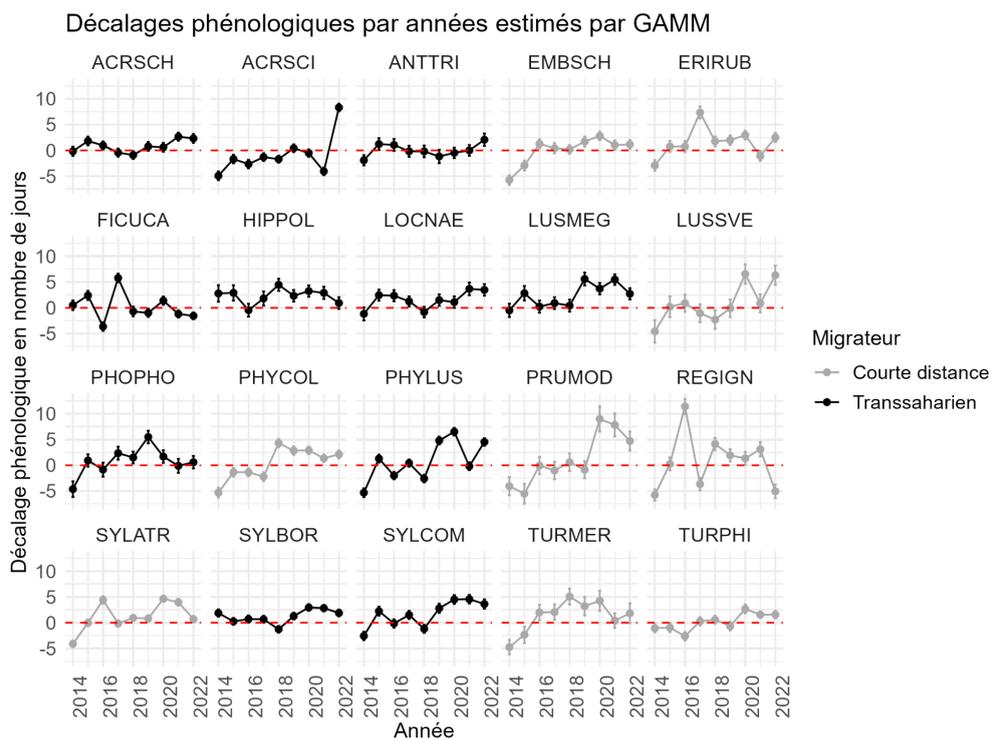
(A) Comparaison des fluctuations inter-annuelles obtenus à partir des modèles avec et sans effet de l'âge



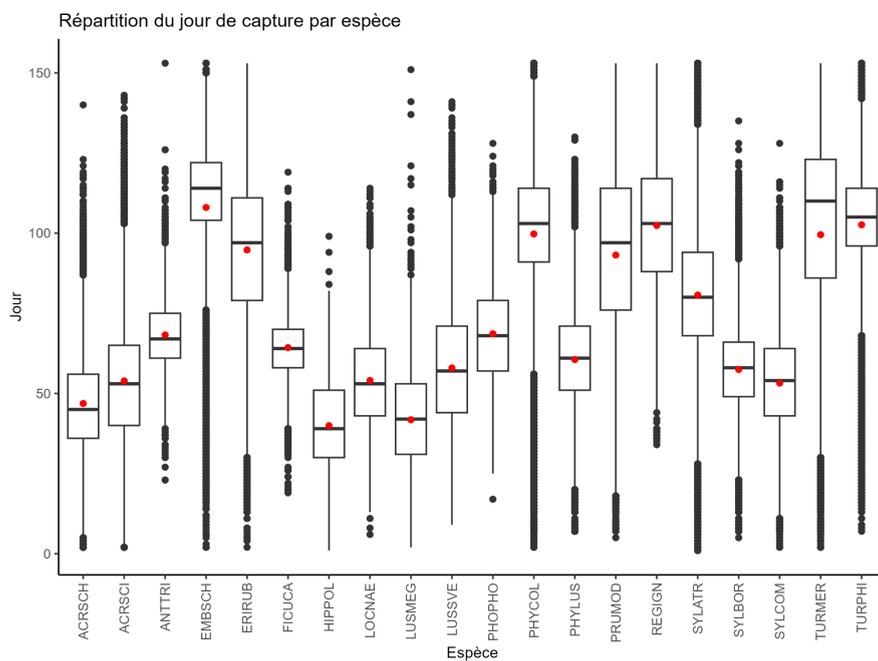
(B) Corrélation entre les valeurs prédites des modèles avec et sans effet de l'âge



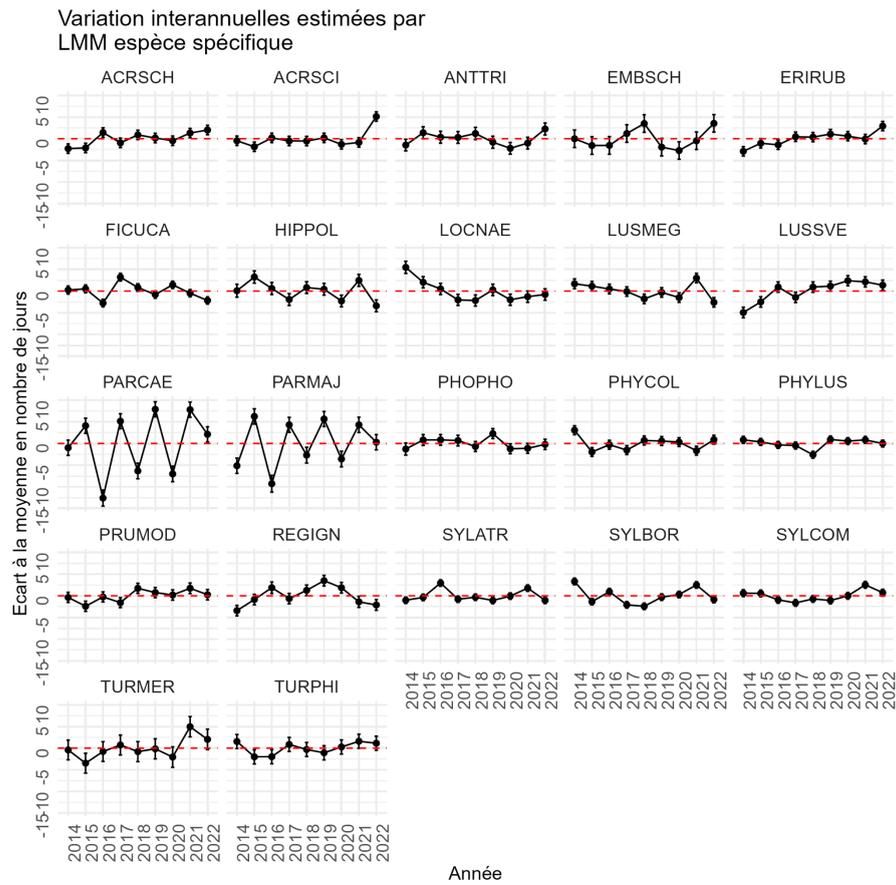
Annexe 6 : Décalage phénologique par année et par espèce estimés par GAMM



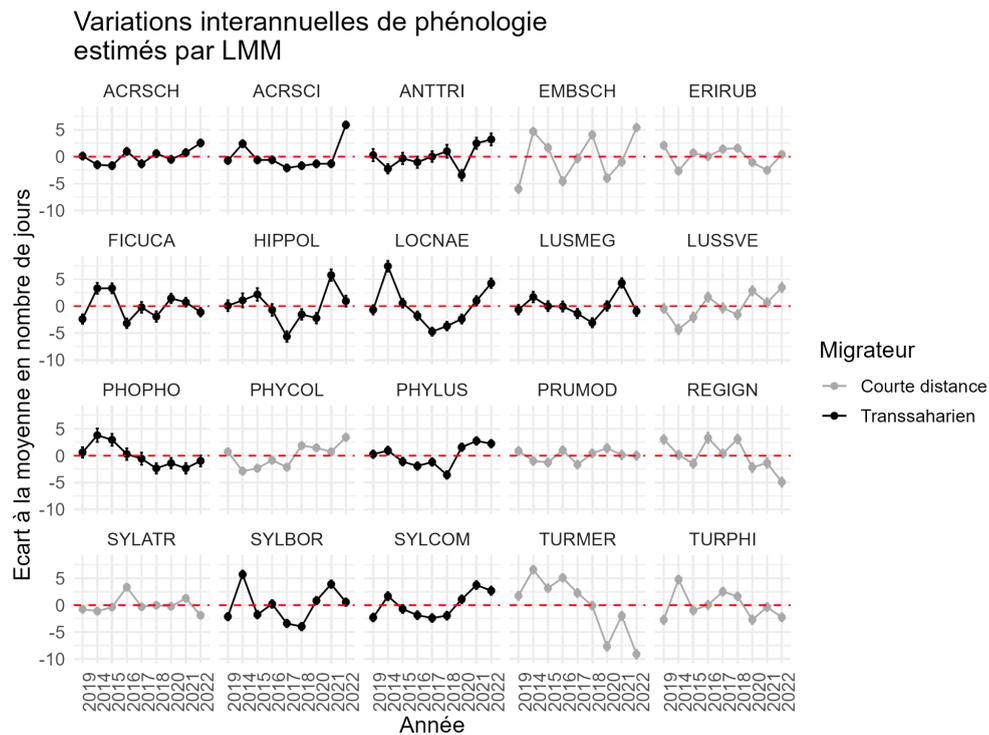
Annexe 7 : Evaluation de l'asymétrie de la distribution du jour de capture par espèce (les points en rouge représentent la moyenne du jour de capture, le jour 0 correspond au 1er juillet)



Annexe 8 : Variations interannuelles de phénologie par espèce estimées par LMM espèce spécifique

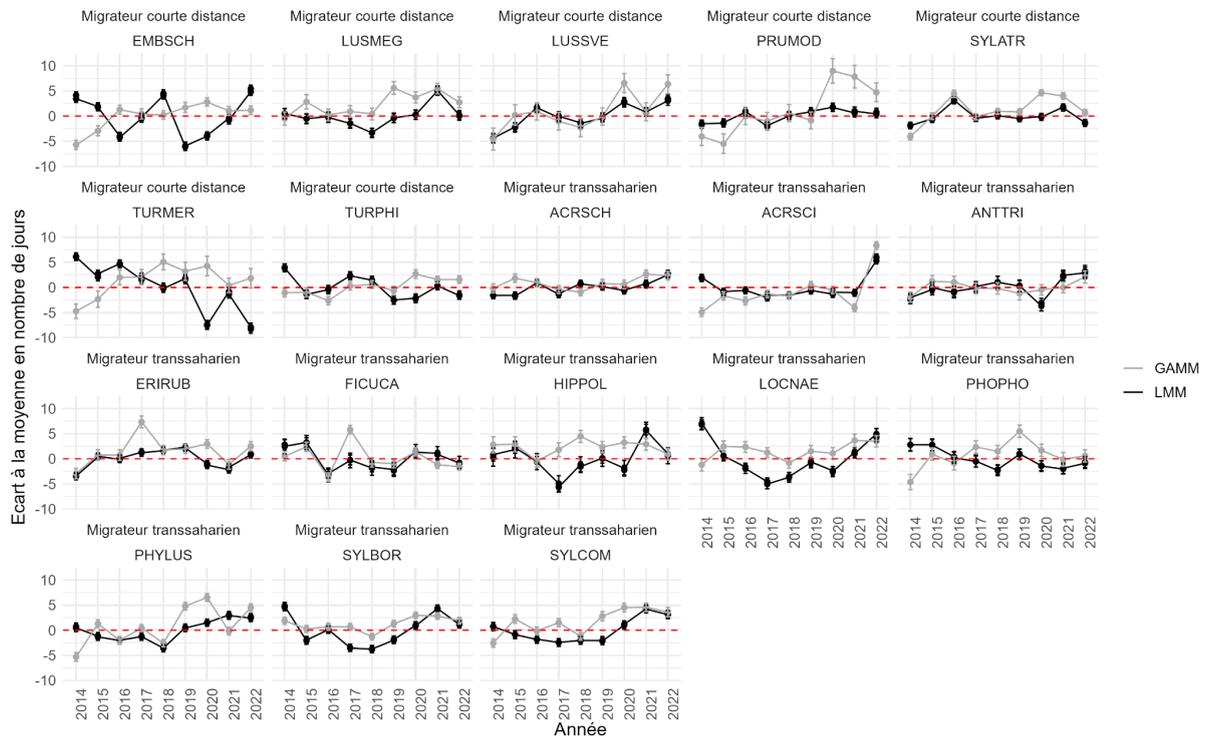


Annexe 9 : Variations interannuelles de phénologie par espèce estimées par LMM multi-espèce

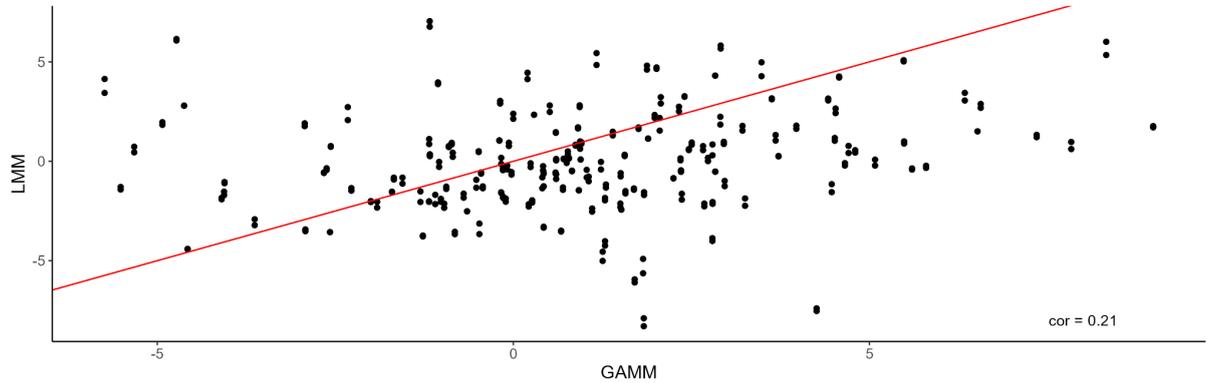


Annexe 10 : Comparaison des variations interannuelles de phénologie estimées par GAMM et LMM

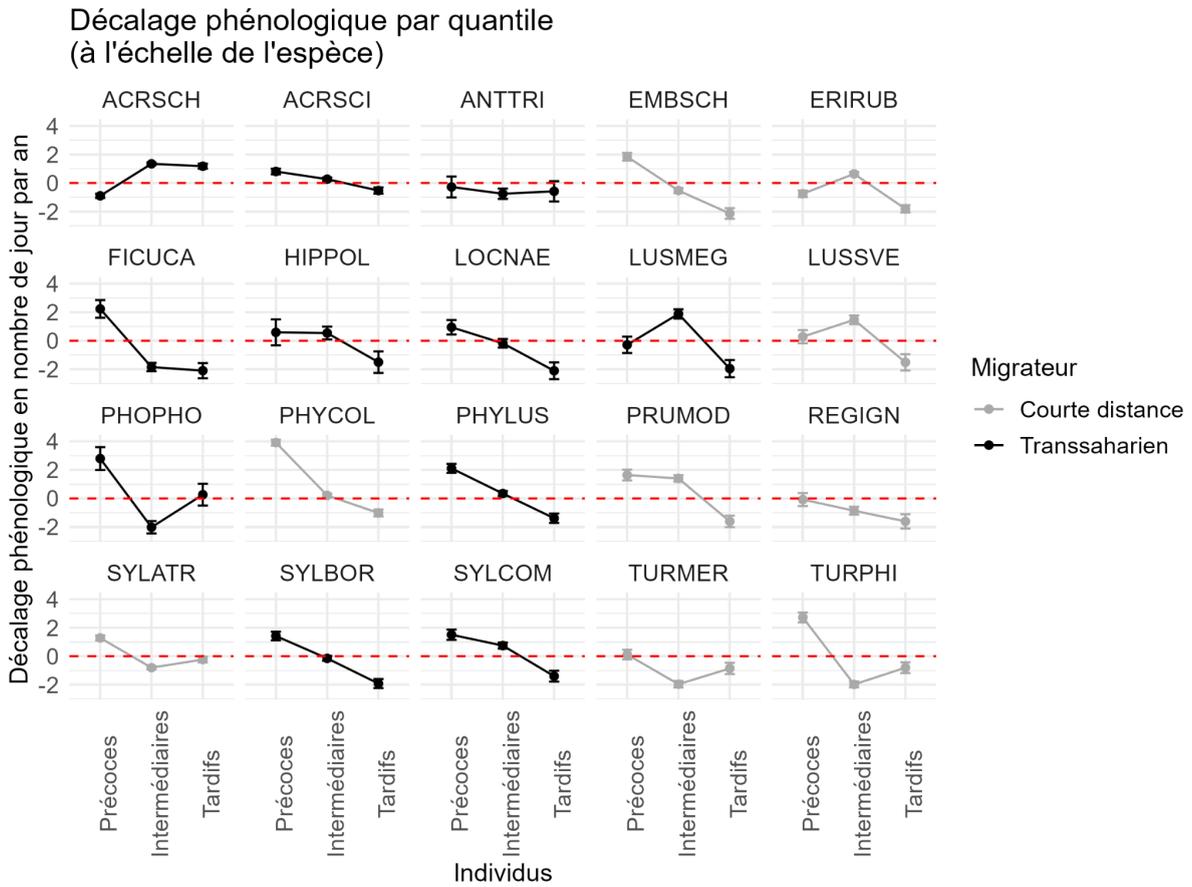
(A) Comparaison des estimations par LMM et GAMM



(B) Corrélation entre les estimations des modèles LMM et GAMM

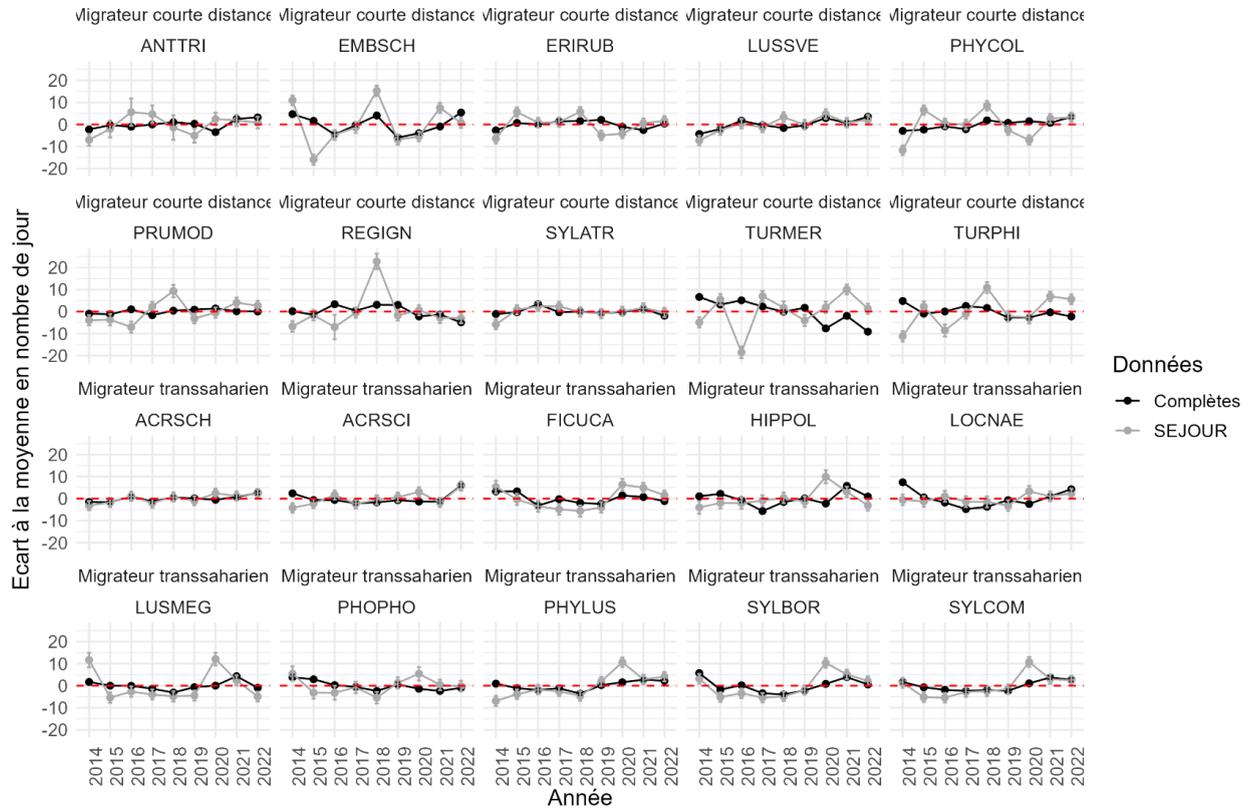


Annexe 11 : Décalages phénologiques (en nombre de jours par an) estimés pour les individus précoces, intermédiaires et tardifs à l'échelle de l'espèce

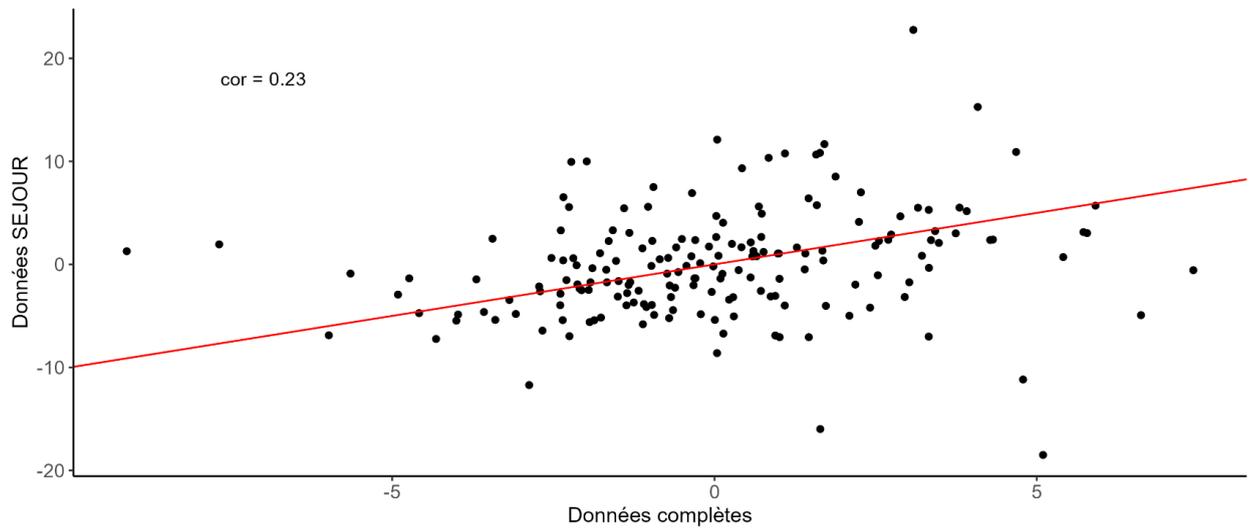


Annexe 13 : Evaluation de la robustesse du plan d'échantillonnage PHENO : comparaison des estimations entre un modèle sur données complètes et sur données SEJOUR

(A) Comparaison des variations interannuelles estimées par des modèles sur données complètes et sur données SEJOUR

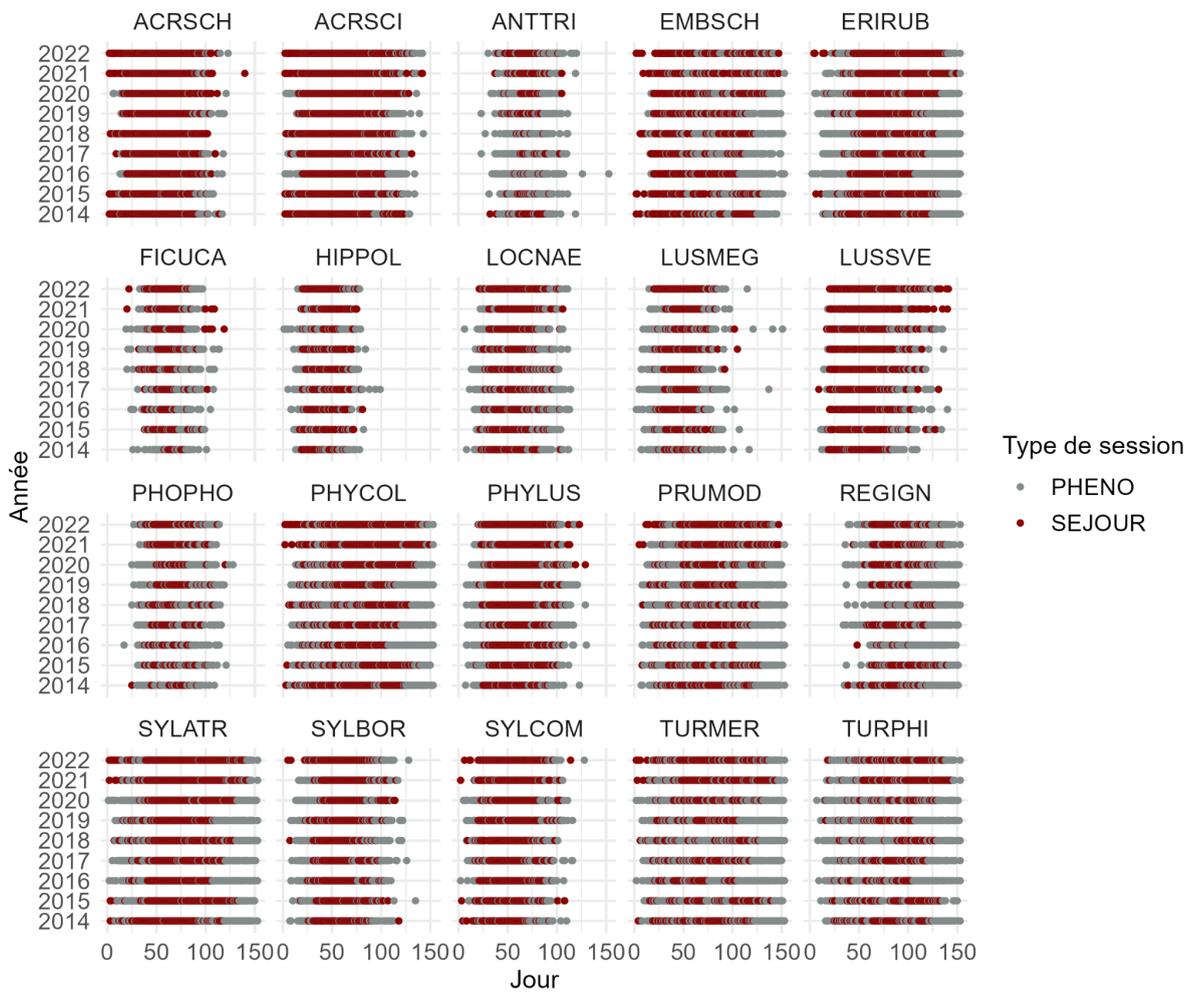


(B) Corrélation entre les estimations des modèles LMM sur données complètes ou SEJOUR



Annexe 14 : Répartition des sessions PHENO et SEJOUR par espèce et année

Répartition des sessions PHENO et SEJOUR



	Diplôme : Master Spécialité : Spécialisation / option : Data science pour la biologie Enseignant référent : François Husson
Auteur(s) : Armelle Lajeunesse	Organisme d'accueil : Patrinat, Muséum National d'Histoire Naturelle
Date de naissance* : 02/04/1998	Adresse : 43 rue Buffon, 75005 Paris
Nb pages :24 Annexe(s) :9	Maître de stage : Manon Ghislain
Année de soutenance : 2023	
Titre français : Création d'un indicateur national sur la phénologie de migration des passereaux communs de France par l'analyse de données de baguage Titre anglais : Creation of a national indicator on the migration phenology of common passerines in France by analyzing ringing data	
Résumé (1600 caractères maximum) : Beaucoup d'études scientifiques ont montré un changement dans les dates d'arrivée et de départ chez les espèces d'oiseaux migratrices en réponse au changement climatique. Pour documenter l'ampleur de l'avancée ou du retard chaque année, j'ai développé les méthodes de prétraitement et d'analyse de données de baguage pour la création d'un indicateur national sur la phénologie de migration postnuptiale des passereaux communs de France. J'ai utilisé deux méthodes statistiques différentes, une méthode basée sur un modèle additif généralisé mixte et un modèle linéaire mixte, pour estimer les variations interannuelles de phénologie migratoire pour 20 espèces de passereaux migrateurs transsahariens ou de courte distance. J'ai documenté des fluctuations entre années à l'échelle des espèces et des types de migration (migration transsaharienne et courte distance) ainsi qu'un changement dans les dates de migration pour les individus précoces, intermédiaires et tardifs. Pour tester la robustesse de la méthode basée sur le modèle linéaire mixte et du plan d'échantillonnage des données utilisées, des analyses supplémentaires devront être menées. Des données sur des années supplémentaires sont nécessaires pour documenter un tendance à l'avancée ou au retard de la migration postnuptiale.	
Abstract (1600 caractères maximum) : Many scientific studies have shown a change in arrival and departure dates in migratory bird species in response to climate change. To document the extent of progress or delay each year, I developed methods of preprocessing and analysis of ringing data for the creation of a national indicator on the phenology of postnuptial migration of common passerines in France. I used two different statistical methods, a method based on a mixed generalized additive model and a mixed linear model, to estimate interannual variations in migratory phenology for 20 species of trans-Saharan or short-distance migratory passerines. I have documented fluctuations between years at the scale of species and migration types (trans-Saharan and short-distance migration) as well as a change in migration dates for early, intermediate and late individuals. To test the robustness of the method based on the linear mixed model and of the data sampling plan used, additional analyzes will have to be carried out. Data for additional years are needed to document an advancing or retarding trend in postnuptial migration.	
Mots-clés : Indicateur, Migration, Phénologie, Passereaux, Données de baguage	
Key Words: Indicator, Migration, Phenology, Passerines, Banding data	

Notes complémentaires au rapport

Étapes manuelles dans le traitement et l'analyse de données :

- La visualisation des profils phénologique par GAMM implique la suppression et l'identification d'un signal de dispersion post-nuptiale chez certaines espèces (en mettant à jour l'indicateur, il est possible de trouver de nouvelles années pour certaines espèces gardées sans détection de profil phénologique)
- Identification du jour associé au premier ou deuxième minimum représentant le niveau de troncation pour le signal de dispersion post-nuptiale)
- Identification de l'année de référence au moment de l'ajustement des modèle LMM multispécifique, pour les modèle LMM multi-espèce : Avec la mise à jour de l'indicateur au cours des années, l'année de référence peut-être amenée à changer

Points de discussion supplémentaires :

Usage de la repasse dans les données SEJOUR et parfois PHENO:

- Faut-il corriger les estimations en prenant en compte les effets de démarrage / arrêt de repasse ? En combinant données PHENO et SEJOUR,, on peut avoir un mélange de données acquises avec repasse et sans repasse pour des espèces visées. Possibilité aussi d'une mauvaise conception du planning de repasse. Au démarrage de la repasse, on trouverait des oiseaux en nombre (qui étaient présents mais mal capturés) et inversement pour l'arrêt de la repasse
- La repasse a pour but de sur-représenter les espèces qui sont ciblées. Comment corriger les estimations pour ces sur-représentations ? (Important dans le développement d'un indicateur multi-espèces pour lequel on voudrait pondérer chaque espèce par son abondance relative (donc basée sur le nb d'ind capturés).

Une méthode pour traiter les individus capturés pour plusieurs années ?

Prendre en compte l'autocorrélation spatiale ? Des sites qui sont proches se ressemblent beaucoup au point d'être des pseudos-réplicats ?