

Projet de recherche
« Réduction de la Mortalité Aviaire
dans les Parcs Éoliens en Exploitation »

Eolpop : document technique

Description du modèle démographique

Thierry Chambert ¹ et Aurélien Besnard ²

¹ CNRS, UMR5175 CEFE, Montpellier, France

² EPHE, UMR5175 CEFE, Montpellier, France

Ce document technique décrit le modèle démographique sous-jacent au package et à l'application *eolpop*. Si vous souhaitez savoir comment s'utilise l'application *eolpop* (interface graphique Shiny), veuillez-vous référer directement au guide utilisateur ([disponible ici](#)).

Objectif

L'objectif de l'application *eo/pop* est de prédire l'impact démographique des mortalités aviaires causées par les collisions avec les éoliennes. A partir du nombre de mortalités individuelles (données d'entrées), l'outil permet de **quantifier**, à partir d'un modèle de projections démographiques, l'impact (sortie de l'outil) sur les **populations** d'oiseaux. Cette quantification de l'impact à l'échelle de la population servira à mieux renseigner les études d'impacts portant sur le développement de parcs éoliens (May et al. 2019) et donc à appuyer les décisions qui s'y rapportent.

Dans l'élaboration de cet outil, nous avons cherché à maximiser à la fois :

- la **précision** des prédictions de l'impact produites par le modèle démographique, donc son degré de réalisme, et
- la **praticité** de l'outil, c'est-à-dire sa facilité d'utilisation et d'interprétation des résultats, par les bureaux d'études et les services de l'Etat.

Ces deux objectifs s'opposent en partie. En effet, maximiser le réalisme des prédictions revient à augmenter la complexité du modèle (augmenter le nombre de paramètres), et par conséquent à complexifier l'utilisation de l'outil (plus d'options et de choix à faire, plus de données d'entrées à fournir ou plus d'hypothèses à poser lorsque ces données ne sont pas disponibles). Cela suppose aussi d'intégrer et de propager les incertitudes (du modèle, des paramètres et des données d'entrée) et d'afficher le degré de précision dans les sorties de l'outil, ce qui rend la lecture des résultats d'autant plus complexe. A l'opposé, maximiser l'accessibilité et l'interprétabilité revient à simplifier la modélisation et les résultats. Il a été nécessaire de faire des *compromis* et de trouver un *juste milieu* (principe de parcimonie) entre réalisme et facilité d'utilisation l'outil.

Conscient du fait que selon les situations (espèce, région), la quantité et la qualité des données disponibles sur les populations peut varier fortement, nous avons pris soin d'inclure dans l'application des options (entrées et modélisation) adaptées aux différents cas de figure. L'outil doit en effet permettre d'intégrer des données « précises » sur les paramètres démographiques (survies et fécondités par classe d'âge par exemple) lorsqu'elles sont disponibles, de sorte à maximiser le réalisme des prédictions et la précision des résultats. Mais, lorsque les données sont peu disponibles, voire absentes, l'outil doit tout de même permettre de faire des prédictions en se reposant sur des d'hypothèses supplémentaires. Dans ce cas, la précision des résultats est forcément moindre, ce qui est reflété sous forme d'une plus grande incertitude dans les résultats.

Cadre conceptuel

L'outil démographique correspond à un processus d'analyse à trois composantes (voir Figure 1) :

- **Entrée** : les **données nécessaires** au modèle démographique, notamment les données de mortalités aviaires.
- **Analyse** : le modèle démographique, qui permet de faire des **projections de la dynamique** de population à partir de **simulations**.

- **Sortie** : les **métriques d'impact** sur la population et certains éléments de visualisation.

Ici, nous nous focaliserons sur l'étape centrale d'analyse ; l'objet de ce document étant de décrire le modèle démographique utilisé par *eo/pop* pour simuler des trajectoires démographiques. Les deux autres étapes sont décrites en détail dans le guide utilisateur ([disponible ici](#)). Nous nous contenterons ici d'un bref rappel.

Nous signalons aussi que, dans *eo/pop*, toutes les sources d'incertitudes pertinentes sur les paramètres d'entrée (mortalités, effectif de la population, etc.) peuvent et doivent être renseignées par l'utilisateur. Ces incertitudes sont ensuite propagées tout au long du processus d'analyse, de sorte à être explicitement intégrées dans le résultat final. Il est en effet primordial d'inclure l'incertitude dans le résultat pour permettre une évaluation juste du risque lié aux différentes alternatives (décisions) possibles (Loss et al. 2012).

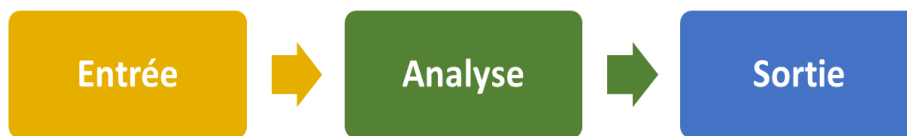


Figure 1. Schéma conceptuel de l'outil démographique.

Paramètres d'entrée

Pour réaliser l'analyse, nous rappelons que quatre paramètres d'entrée doivent être renseignés :

1. Mortalités annuelles, dues aux collisions.
2. Effectif de la population actuelle.
3. Taux de croissance annuel de la population, en l'absence de collision.
4. Capacité de charge de l'environnement. La capacité de charge est définie comme la **taille maximale** que peut atteindre la population en question, *en l'absence de collisions et autres perturbations liées à l'éolien*. Cette donnée n'est requise que pour les populations en croissance.

Une description plus détaillée de chacune de ces données d'entrée requises est fournie dans le guide utilisateur ([disponible ici](#)). Chacune de ces données d'entrée peut être fournie avec un degré d'incertitude.

En plus des quatre paramètres cités ci-dessus, les valeurs de **survie** et de **fécondité** de l'espèce, pour chaque classe d'âge, sont également requises pour simuler la trajectoire d'une population. Pour les 60 espèces d'oiseaux prioritaires du programme MAPE, incluses dans la liste déroulante de *eo/pop*, les valeurs de survie et de fécondité ont été directement intégrées dans l'application (voir le document intitulé « Obtention des paramètres démographiques de chaque espèce », [disponible ici](#)).

Sorties du modèle

L'impact démographique des mortalités additionnelles est quantifié en comparant les résultats des simulations selon les deux scénarios (Figure 2) : sans mortalités (Sc_0) et avec mortalités additionnelles dues aux collisions (Sc_1).

Deux métriques sont calculées par *eolpop* :

- La **différence relative des tailles de population prédites**, à l'horizon temporel choisi (ex : 30 ans), entre les deux scénarios (Figure 2). L'estimation de cet impact est fournie avec un intervalle de confiance (ex : à 95%), représentant la gamme d'impacts attendus possible. Une valeur de 0% correspond à une absence totale d'impact, tandis qu'une valeur de 100% correspond à l'extinction totale de la population, donc un impact maximal.
- La probabilité d'extinction de la population, à l'horizon temporel choisi, pour chacun des deux scénarios. La probabilité d'extinction est calculée à partir du ratio entre le nombre de simulations au cours desquelles la population s'est éteinte sur le nombre total de simulations réalisées. Bien entendu, dans beaucoup de situations, le risque d'extinction à 30 ans sera nul. C'est donc principalement la première métrique (différence relative des tailles de population prédites) qui sera utile pour évaluer l'impact démographique des collisions.

Dans l'application, ces métriques d'impacts sont fournies sous forme de tableaux et de graphiques, comme décrit dans le guide utilisateur ([disponible ici](#)).

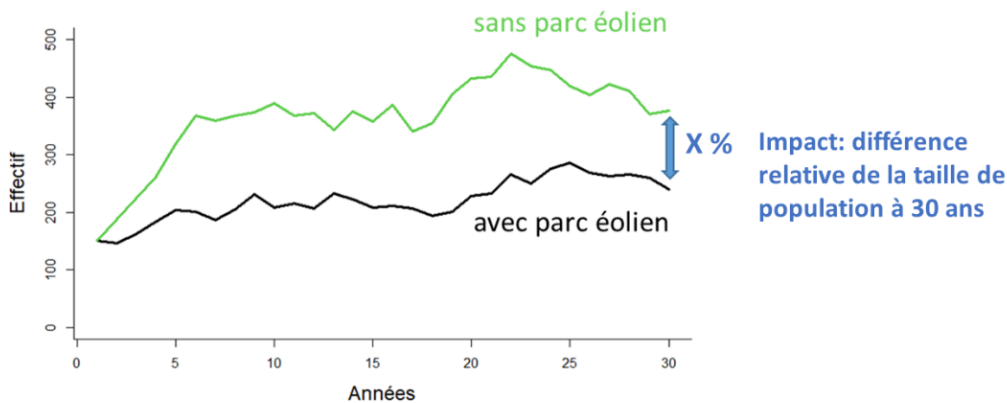


Figure 2. Illustration de la mesure d'impact à partir de l'approche comparative.

Modélisation démographique

Un modèle démographique permet de prédire la taille de population l'année $t+1$ (N_{t+1}) à partir de la taille de population l'année précédente (N_t) et du taux de croissance annuel de la population (λ_t), selon la relation suivante :

$$N_{t+1} = \lambda_t N_t$$

Qui peut aussi s'écrire :

$$N_{t+1} = N_t + r_t N_t$$

Où $r_t = \lambda_t - 1$ est le taux d'accroissement annuel de la population. Par exemple, une population qui croît de 5% par an à un taux d'accroissement $r_t = 0.05$ et donc un taux de croissance $\lambda_t = 1.05$. Une population stable est définie par $r_t = 0$ et donc $\lambda_t = 1$.

Le modèle démographique utilisé dans l'application *eolpop* pour faire les simulations correspond à un modèle en temps discret (à l'échelle annuelle), avec recensement après reproduction (« post-breeding »). Il inclut les composantes suivantes :

- Structure en âge
- Densité-dépendance
- Stochasticité environnementale
- Stochasticité démographique

Structure en âge

Dans un modèle structuré en âge, le taux de croissance λ_t est déterminé par les paramètres démographiques (survies et fécondités) des différentes classes d'âge, ainsi que la proportion relative de chaque classe d'âge dans la population (Caswell 2001). En effet, les différentes classes d'âges ne contribuent pas à égalité à la dynamique d'une population. Dans un modèle structuré en âge, la relation qui permet de prédire l'évolution des effectifs d'une année sur l'autre est généralisée par une approche matricielle (Caswell 2001) :

$$\mathbf{N}_{t+1} = \mathbf{A}_t \mathbf{N}_t$$

Où \mathbf{N} représente un vecteur avec les effectifs de chaque classe d'âge et \mathbf{A} est une matrice de contribution démographique par classe d'âge, appelée matrice de Leslie (Caswell 2001). Dans la suite du document, nous utiliserons cependant la notation non-matricielle (basé sur λ_t) car elle est plus simple à suivre pour le lecteur.

Densité-dépendance

La densité-dépendance est définie comme la dépendance du taux d'accroissement *per capita*¹ r_t à la taille de population N_t , passée ou présente (Murdoch 1994). Lorsque la relation entre taux d'accroissement et taille de population est *négative*, on parle de densité-dépendance « compensatoire » (Herrando-Pérez et al. 2012). Ce terme, « compensatoire », est utilisé pour mettre

¹ *per capita* = « par individu ». Le taux d'accroissement *per capita* correspond donc à taux de croissance exprimé « par individu », et donc défini par la formule : $\Delta N_t / N_t$; où N_t est la taille de population au temps t et ΔN_t est la différence de taille de population entre t et $t+1$ (c'est-à-dire la croissance brute).

en avant le fait qu'une baisse de population est en partie *compensée* par une augmentation du taux de croissance. Ce type de relation négative s'explique en général par la compétition entre individus de la même population pour des ressources (nourriture, partenaires, sites de reproduction, etc.) qui sont limitées (Nicholson 1933, 1954). Plus la taille de population augmente, plus la densité d'individus augmente, et donc plus la compétition se renforce, ce qui impacte négativement la survie et la reproduction des individus de la population, et par conséquent, le taux de croissance *per capita*. Et inversement, lorsque la taille de population diminue, la compétition se relâche, ce qui augmente le taux de croissance *per capita*, et permet la compensation. La forme inverse de densité-dépendance, c'est-à-dire une relation positive entre taux d'accroissement et densité de population, existe aussi dans la nature (Horswill & Robinson 2015). Ce type de densité-dépendance est alors dit « dépensatoire » (Herrando-Pérez et al. 2012). On parle aussi « d'effets Allee » (Allee 1941; Courchamp et al. 1999, 2008).

Ici, nous ne considérons que la densité-dépendance compensatoire, comme c'est généralement le cas lorsque l'on modélise des trajectoires de population selon une relation logistique (Gilpin and Ayala 1973, Eberhardt et al. 2008 ; voir ci-après). Ce type de relation induit une courbe de croissance en « S » de la population (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), dans laquelle on distingue trois phases :

- Une croissance exponentielle « rapide » à faible densité (en dessous du point d'inflexion « i » ; **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)
- Une croissance « ralentie » lorsque la population a dépassé le point d'inflexion.
- La stabilisation de l'effectif de la population lorsqu'elle a atteint la capacité de charge du milieu (noté traditionnellement K), ce qui correspond à la taille maximale que peut atteindre la population dans son environnement local.

Dans ce schéma de croissance, le taux d'accroissement de la population est constamment positif ($r > 0$; voir Figure 3) jusqu'à ce que la population atteigne la valeur K, moment où le taux d'accroissement devient nul ($r = 0$).

On note qu'avec ce modèle de croissance dépendant de la densité, on ne s'attend à aucun moment à avoir un taux d'accroissement négatif, sauf si l'effectif de la population se retrouve ponctuellement au-dessus de K. Pour les projections démographiques, la densité-dépendance compensatoire n'est donc pas incluse dans le cas d'une population en déclin. En effet, ce choix ne serait pas justifié, car il n'est pas possible de paramétrer la relation de densité-dépendance (entre r et N) liée à une croissance logistique pour une population en déclin qui se situe en-dessous de sa capacité de charge (Green et al. 2016; Horswill et al. 2017; Schippers et al. 2020). Elle est incluse seulement si la population en question est en croissance, car c'est le seul cas où la relation entre r et N peut être évaluée (Figure 3 ; et voir détails plus bas).

L'ajout de densité-dépendance compensatoire se fait en incluant une relation négative entre le taux d'accroissement (r_t) de l'année t et la taille de population (N_t). On utilise une relation non-linéaire de type θ -logistique (Gilpin & Ayala 1973; Eberhardt et al. 2008) classiquement utilisée dans ces situations :

$$r_t = r_{max} \left(1 - \left(\frac{N_t}{K} \right)^\theta \right)$$

où r_{max} correspond au taux d'accroissement *per capita* théorique maximal (i.e. en l'absence d'effet de la densité) ; K est la capacité de charge du milieu, c'est-à-dire la taille de population maximale qui peut être supportée par l'environnement local ; et le paramètre θ (thêta) décrit la courbure de la relation entre r_t et N_t , donc la forme de la densité-dépendance (Figure 3). Pour calculer le taux d'accroissement r_t l'année t , il est donc nécessaire de connaître, en plus de la taille de population N_t , ces trois paramètres (r_{max} , θ et K). Comme ils sont en général totalement inconnus, une approximation de ces paramètres est obtenue selon la procédure décrite par Johnson et al. (2018).

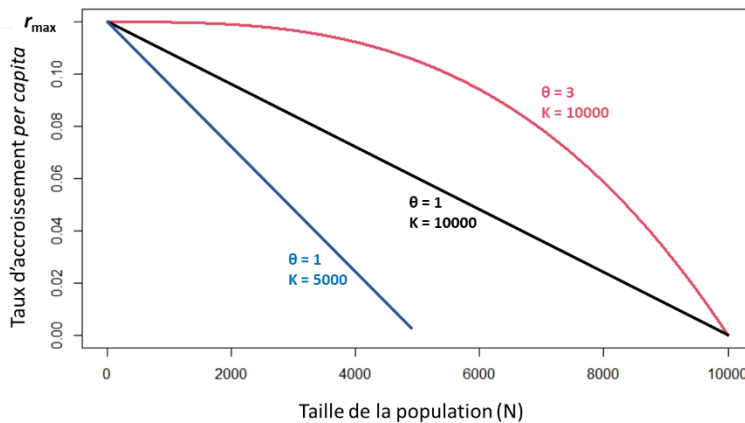


Figure 3. Exemples de relations entre le taux d'accroissement per capita (r) et la taille de la population (N).

Pour le paramètre r_{max} , l'approximation est basée sur la méthode des invariants démographiques (Niel & Lebreton 2005), qui nécessite seulement de connaître (i) l'âge à première reproduction (α) de l'espèce et (ii) la survie adulte (s).

Pour les espèces longévives, le $r_{max} (\lambda_{max} + 1)$ peut être calculé à partir de la formule suivante :

$$r_{max} = \frac{(s\alpha - s + \alpha + 1) + \sqrt{(s - s\alpha - \alpha - 1)^2 - 4s\alpha^2}}{2\alpha} - 1$$

Pour les espèces non-longévives, le r_{max} est obtenu en résolvant l'équation suivante :

$$r_{max} = \left[\exp \left(\alpha + \frac{s}{\lambda_{max} - s} \right)^{-1} \right] - 1$$

L'âge à première reproduction « α » et la survie adulte « s » des espèces sont issus de la littérature, et ont été directement inclus dans l'outil démographique. La capacité de charge K est un des paramètres d'entrée fourni par l'utilisateur. Enfin, pour le paramètre θ , on fait l'hypothèse $\theta = 1$ comme cela est généralement fait dans la littérature scientifique car il s'agit d'une hypothèse conservatrice (Wade 1998).

Stochasticité environnementale

La stochasticité environnementale correspond aux variations annuelles des valeurs de paramètres démographiques qui sont dues aux aléas des conditions de l'environnement (Boyce 1992). Il s'agit donc d'une source de variabilité naturelle qui ajoute du bruit (donc de l'incertitude) dans les prédictions des trajectoires démographiques. C'est aussi un phénomène qui fait baisser le taux de croissance moyen au cours du temps et qui augmente le risque d'extinction des petites populations (Lande 1993).

Pour modéliser ce mécanisme, un processus de tirage aléatoire est utilisé pour faire varier le taux de croissance (avant collision) appliqué à la population chaque année. Chaque nouvelle valeur de taux de croissance est tirée dans une loi de distribution représentant un niveau de variance environnementale moyen (CV = 8%) basé sur la littérature (ex : Sæther et al. 2016).

Stochasticité démographique

La stochasticité démographique correspond à la dimension aléatoire des événements de survie et de reproduction (Boyce 1992). Par exemple, une population de 10 femelles avec un taux de fécondité de 0.5 produira *en moyenne* 5 jeunes ; mais *par chance* (dimension aléatoire) elle peut en produire 4, ou 7, voire même 0. Autrement dit, la réalisation d'un événement (ici, la reproduction) n'est pas nécessairement exactement égale à l'attendu *moyen*. Cet effet d'échantillonnage est d'autant plus fort que la population est petite. Tout comme la stochasticité environnementale, ce mécanisme ajoute du « bruit démographique » dans les prédictions et il augmente le risque d'extinction des petites populations (Lande 1993).

Le fait d'inclure de la stochasticité démographique dans les simulations a pour effet d'augmenter le temps de calcul, d'autant plus quand la population simulée est grande. Dans notre outil, ce mécanisme n'est donc inclus que dans le cas des *petites populations*, car c'est là qu'il est le plus important à prendre en compte (risque d'extinction accru) ; et dans ces cas-là, l'impact sur le temps de calcul est négligeable. Dans le cas des *grandes populations*, la stochasticité démographique n'est donc pas incluse. Des tests préalables ont été réalisés pour déterminer le seuil de taille de population à partir duquel la stochasticité démographique n'est plus nécessaire (Annexe 5). Les résultats de ces tests nous ont amené à définir les seuils suivants : (1) pour une population en déclin, la stochasticité démographique est incluse si la taille de population initiale est inférieure à 3000 individus ; (2) pour une population en croissance, la stochasticité démographique est incluse si la taille de population initiale est inférieure à 500 individus.

Pour tenir compte de la stochasticité démographique, nous utilisons le procédé suivant. Chaque année simulée, les réalisations des événements de survie (nombre de morts et de survivants) et de reproduction (nombre de jeunes à l'envol) sont issus du résultat d'un tirage aléatoire dans une loi de distribution adéquate, régie par le paramètre démographique en question :

Pour les événements de survie, on utilise une loi binomiale, dont la probabilité de succès (survivre) correspond à la valeur de survie annuelle.

Pour les évènements de reproduction, on utilise une loi de Poisson dont le paramètre est égal à la fécondité annuelle.

Mortalités additionnelles

Les mortalités causées par les collisions sont incluses en ajoutant un taux de mortalité annuel h .

Soit ce taux de mortalité h est directement fourni par l'utilisateur, dans le cas où il fait l'hypothèse d'un taux de mortalité constant pour l'analyse. Soit, il est calculé à partir du nombre de mortalités annuelles (M) fourni par l'utilisateur et de la taille de population annuelle (N_t), selon la formule suivante :

$$h_t = \frac{M}{N_t}$$

Dans ce deuxième cas, on note que le taux de mortalité varie dans le temps selon la taille de population de l'année t . Pour simplifier l'écriture, dans la suite du document, nous utilisons la notation h pour faire référence au taux de mortalité annuel, qu'il soit constant (h) ou variable (h_t).

Le taux de mortalité h est inclus dans le modèle de la façon suivante :

$$N_{t+1} = (1 - h) N_t \lambda_t$$

Ici aussi, la stochasticité démographique intervient, comme décrit dans le paragraphe précédent, de sorte à modéliser les fluctuations de mortalités annuelles liées à la dimension aléatoire du phénomène de collision avec les éoliennes. Le taux de mortalité h correspond donc au paramètre d'une loi binomiale, non pas à un taux déterministe. L'application de la mortalité additionnelle h vient donc directement modifier la taille de population, comme suit :

$$N'_t = (1 - h) N_t$$

Références bibliographiques

- Allee WC. 1941. Integration of problems concerning protozoan populations with those of general biology. *The American Naturalist* 75:473–487. Science Press.
- Boyce MS. 1992. Population viability analysis. *Annual review of Ecology and Systematics* 23:481–497. Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA.
- Caswell H. 2001. *Matrix Population Models: Construction, Analysis, and Interpretation*, 2nd edition. Sinauer Associates, Sunderland MA.
- Courchamp F, Berc L, Gascoigne J. 2008. *Allee effects in ecology and conservation*. Oxford University Press.
- Courchamp F, Clutton-Brock T, Grenfell B. 1999. Inverse density dependence and the Allee effect. *Trends in ecology & evolution* 14:405–410. Elsevier.
- Eberhardt LL, Breiwick JM, Demaster DP. 2008. Analyzing population growth curves. *Oikos* 117:1240–1246. Wiley Online Library.
- Gilpin ME, Ayala FJ. 1973. Global models of growth and competition. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 70:3590–3593. National Acad Sciences.
- Green RE, Langston RHW, McCluskie A, Sutherland R, Wilson JD. 2016. Lack of sound science in assessing wind farm impacts on seabirds. *Journal of Applied Ecology* 53:1635–1641.
- Herrando-Pérez S, Delean S, Brook BW, Bradshaw CJA. 2012. Density dependence: an ecological Tower of Babel. *Oecologia* 170:585–603.
- Horswill C, O'Brien SH, Robinson RA. 2017. Density dependence and marine bird populations: are wind farm assessments precautionary? *Journal of Applied Ecology* 54:1406–1414. Wiley Online Library.
- Horswill C, Robinson RA. 2015. *Review of Seabird Demographic Rates and Density Dependence*. JNCC Report no. 552. JNCC.
- Lande R. 1993. Risks of population extinction from demographic and environmental stochasticity and random catastrophes. *The American Naturalist* 142:911–927. The University of Chicago Press for The American Society of Naturalists.
- Loss SR, Will T, Marra PP. 2012. Direct human-caused mortality of birds: improving quantification of magnitude and assessment of population impact. *Frontiers in Ecology and the Environment* 10:357–364. Wiley Online Library.
- May R, Masden EA, Bennet F, Perron M. 2019. Considerations for upscaling individual effects of wind

- energy development towards population-level impacts on wildlife. *Journal of Environmental Management* 230:84–93.
- Murdoch WW. 1994. Population Regulation in Theory and Practice. *Ecology* 75:271–287. Ecological Society of America.
- Nicholson AJ. 1933. The balance of animal populations. *The Journal of Animal Ecology* 2:132–178. Wiley Online Library.
- Nicholson AJ. 1954. An outline of the dynamics of animal populations. *Australian journal of Zoology* 2:9–65. CSIRO.
- Niel C, Lebreton J. 2005. Using demographic invariants to detect overharvested bird populations from incomplete data. *Conservation Biology* 19:826–835. Wiley Online Library.
- Saether B-E et al. 2016. Demographic routes to variability and regulation in bird populations. *Nature Communications* 7:12001.
- Schippers P, Buij R, Schotman A, Verboom J, van der Jeugd H, Jongejans E. 2020. Mortality limits used in wind energy impact assessment underestimate impacts of wind farms on bird populations. *Ecology and Evolution* 10:6274–6287. Wiley Online Library.
- Wade PR. 1998. Calculating limits to the allowable human-caused mortality of cetaceans and pinnipeds. *Marine Mammal Science* 14:1–37. Wiley Online Library.

Annexe : Stochasticité démographique

Introduction

Comme expliqué dans le guide technique/cahier des charges, la stochasticité démographique n'est importante à prendre en compte que pour les populations « relativement petites ». En effet, son influence est d'augmenter le risque d'extinction aléatoire de celles-ci. Nous avons mené une étude de simulations afin de déterminer le seuil de taille de population à partir duquel cet effet devient négligeable, et donc à partir duquel l'utilisation d'un modèle déterministe (sans stochasticité démographique) suffit.

Méthode

Dans cette étude, nous avons simulé des trajectoires de populations sur 30 ans, avec deux modèles : un incluant la stochasticité démographique (modèle stochastique), l'autre non (modèle déterministe). Nous avons ensuite comparé les résultats de ces deux modèles en terme (i) de taille de populations prédite à 30 ans et (ii) probabilité d'extinction. Pour le modèle stochastique, nous avons simulé 1 000 trajectoires pour calculer ces métriques. Nous avons répété cette procédure pour un ensemble de scénarios, en faisant varier les trois paramètres suivants :

- La taille initiale de population (N_0), qui est le paramètre cible ici, c'est-à-dire celui pour lequel on cherche à déterminer le seuil à partir duquel les deux modèles (stochastique et déterministe) donnent des résultats identiques. Nous avons évalué des tailles de population allant de $N_0 = 100$ à $N_0 = 5000$.
- Le taux de croissance (λ) de la population, avec des valeurs allant de $\lambda = 0,85$ (donc un déclin annuel de 15%) à $\lambda = 1,1$ (donc une croissance annuelle de 10%).
- La probabilité de survie (s) des individus, pour distinguer les espèces plus ou moins longévives. Là, nous avons utilisé des survies annuelles allant de $s = 0.40$ à $s = 0.90$.

Résultats

La différence, en termes de taille de population prédite à 30 ans (N_{30}), entre les deux modèles est négligeable dans tous les cas de figure (Tableau 1, colonne « Diff. N_{30} »). En effet, cette différence est au plus de quelques individus et représente toujours une différence relative faible (Tableau 1, colonne « Diff. relative N_{30} »).

La comparaison doit donc se baser sur le biais en termes de **probabilité d'extinction** (PrExt). Une véritable *probabilité* d'extinction peut seulement être quantifiée avec le modèle stochastique. Le modèle déterministe ne peut quant à lui prédire que deux résultats : (i) soit l'occurrence de l'extinction à 30 ans, ce qui revient à une probabilité d'extinction égale à 1 ; (ii) soit l'absence d'extinction à 30 ans, ce qui revient à une probabilité d'extinction égale à 0 ; sans permettre aucune probabilité « intermédiaire ». Le biais quantifié (Tableau 1, colonne « Biais PrExt ») correspond donc à cette

différence de probabilité entre les deux modèles. Un biais positif correspond donc au cas où le modèle déterministe aurait prédit (à 100%) une extinction, la probabilité réelle (risque quantifié par le modèle stochastique) étant plus basse. Un biais négatif correspond au cas où le modèle déterministe n'aurait pas prédit d'extinction (probabilité de 0%), alors qu'il existe en fait un risque non nul d'extinction à 30 ans (probabilité > 0).

Les résultats révèlent que pour des tailles de populations $N_0 \geq 100$, un biais notable n'est observable que dans les scénarios où la population serait en déclin ($\lambda < 1$; Tableau 1). Dans le cas d'une population stable ou en croissance ($\lambda \geq 1$), l'utilisation du modèle stochastique ou déterministe ne fait virtuellement aucune différence (Tableau 1). Au vu de ce résultat, en restant toutefois conservateur, nous avons donc décidé de **fixer le seuil d'utilisation du modèle déterministe à $N_0 = 500$** pour les populations **strictement** stables ou en croissance. On peut en effet être sûr que pour des effectifs de cette taille et au-dessus, les deux modèles donneront exactement les mêmes résultats.

Toutefois, dans le cas d'une population en déclin, il sera nécessaire de fixer un seuil d'utilisation du modèle déterministe à une taille de population plus élevée. D'après les résultats des simulations, on observe que le biais sur la probabilité d'extinction dépend de deux variables (voir Tableaux 1 à 4) :

- La **force du déclin** : plus λ est faible, plus le biais est élevé. Ceci s'explique par le fait que le risque d'extinction des « petites populations » augmente avec la force du déclin. Donc pour un risque d'extinction partiel ($0 < \text{PrExt} < 1$), le biais induit par le modèle déterministe, qui lui prédira une absence d'extinction (risque = 0), sera d'autant plus fort.
- La **probabilité de survie** (s) : plus elle est faible plus le biais est important. Ceci s'explique par le fait que les espèces à survie basse ont des dynamiques annuelles plus variables. Ce phénomène est lié au fait qu'elles ont (à λ égal) une fécondité plus élevée, la variabilité liée à la reproduction (processus de type « Poisson ») étant généralement plus forte que celle liée à la survie (processus de type « Binomial »).

Donc, pour déterminer le seuil à utiliser dans le cas d'une population en déclin, nous nous sommes basés sur le cas de figure représentant la force de déclin la plus forte (15% par an, $\lambda = 0.85$) et la survie la plus basse ($s = 0.40$). Il est inutile d'envisager des valeurs extrêmes car celles-ci représentent déjà un cas relativement hors norme. Chez les oiseaux, les espèces les moins longévives (petits passereaux) ont rarement une survie annuelle inférieure à $s = 0.40$; et les espèces à enjeux forts sont toutes plutôt longévives ($s > 0.70$). Un déclin annuel de 15% représente une situation assez catastrophique, où l'effectif de la population serait réduit de $>99\%$ en 30 ans (voir Tableau 2, colonnes N_0 et N_{30}). Dans un tel cas, la question de la « soutenabilité » de mortalités additionnelles ne se posera probablement même pas, et l'existence d'une différence de quelques pourcents sur la probabilité d'extinction ne changerait rien aux conclusions.

En se basant sur ce cas de figure (Tableau 2), nous avons donc décidé de **fixer le seuil d'utilisation du modèle déterministe à $N_0 = 3000$** pour les populations en déclin. Dans les cas réels qui seront traités avec cet outil démographique, on sera toujours dans des cas de figure plus favorables (λ et s plus élevés), ce seuil sera donc largement suffisant. Pour toutes ces autres situations, on remarque

que pour un effectif $N_0 \geq 3000$, les deux modèles donnent des résultats quasiment identiques (voir Tableaux 2 à 4).

Conclusion

Pour les populations stables ou en croissance, l'outil démographique utilisera le modèle stochastique si la taille de population initiale est inférieure à 500, le modèle déterministe autrement. Pour les populations en déclin, le modèle déterministe sera utilisé dans les cas où l'effectif initial est inférieur à 3000 individus.

Tableau 1. Résultats de l'étude de simulation pour des valeurs variable de taux de croissance démographique annuel, allant de $\lambda = 0.90$ à $\lambda = 1.10$. « N30 » : taille de population prédite à 30 ans ; « Diff. » : différence ; « Pr.ext » : Probabilité d'extinction.

Survie	Taux de Croissance	Taille de population initiale (N0)	N30 modèle stochastique	- N30 modèle déterministe	- Diff. N30	Diff. relative N30	Probabilité d'extinction (PrExt)	Biais PrExt
0.50	0.90	100	5.1	4.7	0.3	-7%	56%	-56%
0.50	0.90	200	9.7	9.4	0.3	-3%	30%	-30%
0.50	0.90	300	13.6	14.1	-0.6	4%	18%	-18%
0.50	0.90	400	19.2	18.8	0.3	-2%	10%	-10%
0.50	0.90	500	22.8	23.6	-0.8	3%	6%	-6%
0.50	0.90	600	27.9	28.3	-0.4	1%	2%	-2%
0.50	0.90	700	32.2	33.0	-0.8	3%	2%	-2%
0.50	0.90	800	37.5	37.7	-0.2	0%	1%	-1%
0.50	0.90	900	43.0	42.4	0.6	-1%	1%	-1%
0.50	0.90	1000	47.9	47.1	0.8	-2%	0%	0%
0.50	0.98	100	54.3	55.7	-1.4	3%	4%	-4%
0.50	0.98	200	112.4	111.3	1.1	-1%	0%	0%
0.50	0.98	300	167.0	167.0	0.0	0%	0%	0%
0.50	0.98	400	223.0	222.6	0.4	0%	0%	0%
0.50	0.98	500	283.4	278.3	5.0	-2%	0%	0%
0.50	0.98	600	332.3	334.0	-1.7	1%	0%	0%
0.50	0.98	700	384.7	389.6	-4.9	1%	0%	0%
0.50	0.98	800	445.3	445.3	0.0	0%	0%	0%
0.50	0.98	900	500.9	501.0	0.0	0%	0%	0%
0.50	0.98	1000	553.2	556.6	-3.4	1%	0%	0%
0.50	1.00	100	98.2	100.0	-1.8	2%	2%	-2%
0.50	1.00	200	197.3	200.0	-2.7	1%	0%	0%
0.50	1.00	300	306.7	300.0	6.7	-2%	0%	0%
0.50	1.00	400	402.2	400.0	2.2	-1%	0%	0%
0.50	1.00	500	494.3	500.0	-5.7	1%	0%	0%
0.50	1.00	600	601.7	600.0	1.7	0%	0%	0%

0.50	1.00	700	698.7	700.0	-1.3	0%	0%	0%
0.50	1.00	800	798.2	800.0	-1.8	0%	0%	0%
0.50	1.00	900	901.3	900.0	1.3	0%	0%	0%
0.50	1.00	1000	1007.0	1000.0	7.0	-1%	0%	0%
0.50	1.02	100	175.6	177.6	-2.0	1%	0%	0%
0.50	1.02	200	351.6	355.2	-3.6	1%	0%	0%
0.50	1.02	300	532.4	532.8	-0.3	0%	0%	0%
0.50	1.02	400	710.1	710.3	-0.2	0%	0%	0%
0.50	1.02	500	892.3	887.9	4.4	0%	0%	0%
0.50	1.02	600	1072.4	1065.5	6.9	-1%	0%	0%
0.50	1.02	700	1245.8	1243.1	2.7	0%	0%	0%
0.50	1.02	800	1436.8	1420.7	16.1	-1%	0%	0%
0.50	1.02	900	1589.0	1598.3	-9.2	1%	0%	0%
0.50	1.02	1000	1780.2	1775.8	4.3	0%	0%	0%
0.50	1.10	100	1576.2	1586.3	-10.1	1%	0%	0%
0.50	1.10	200	3161.9	3172.6	-10.7	0%	0%	0%
0.50	1.10	300	4766.7	4758.9	7.8	0%	0%	0%
0.50	1.10	400	6306.1	6345.2	-39.1	1%	0%	0%
0.50	1.10	500	7939.3	7931.5	7.7	0%	0%	0%
0.50	1.10	600	9536.1	9517.9	18.2	0%	0%	0%
0.50	1.10	700	11069.2	11104.2	-35.0	0%	0%	0%
0.50	1.10	800	12734.0	12690.5	43.5	0%	0%	0%
0.50	1.10	900	14234.1	14276.8	-42.7	0%	0%	0%
0.50	1.10	1000	15868.9	15863.1	5.8	0%	0%	0%

Tableau 2. Résultats de l'étude de simulation pour un taux de croissance démographique annuel de $\lambda = 0.85$, ce qui représente un déclin de la population de 15% par an. « N30 » : taille de population prédite à 30 ans ; « Diff. » : différence ; « Pr.ext » : Probabilité d'extinction.

Survie	Taux de Croissance	Taille de population initiale (N0)	N30 modèle stochastique	- N30 modèle déterministe	- Diff. N30	Diff. relative N30	Probabilité d'extinction (PrExt)	Biais PrExt
0.40	0.85	100	0.9	0.9	0.0	4%	89%	11%
0.40	0.85	200	1.8	1.8	0.0	-1%	78%	22%
0.40	0.85	300	2.9	2.7	-0.2	-6%	70%	-70%
0.40	0.85	400	3.9	3.6	-0.4	-9%	62%	-62%
0.40	0.85	500	4.6	4.5	-0.1	-2%	56%	-56%
0.40	0.85	600	5.9	5.4	-0.5	-9%	48%	-48%
0.40	0.85	700	6.2	6.3	0.1	1%	46%	-46%
0.40	0.85	800	7.1	7.2	0.1	1%	37%	-37%
0.40	0.85	900	7.8	8.1	0.3	4%	33%	-33%
0.40	0.85	1000	9.2	9.0	-0.3	-3%	29%	-29%
0.40	0.85	1100	9.5	9.9	0.3	3%	29%	-29%
0.40	0.85	1200	10.1	10.8	0.7	7%	27%	-27%
0.40	0.85	1300	12.3	11.7	-0.6	-5%	22%	-22%
0.40	0.85	1400	12.8	12.6	-0.2	-1%	21%	-21%
0.40	0.85	1500	13.5	13.5	0.0	0%	18%	-18%
0.40	0.85	1600	14.3	14.4	0.0	0%	15%	-15%
0.40	0.85	1700	15.0	15.3	0.2	1%	12%	-12%
0.40	0.85	1800	15.5	16.2	0.6	4%	15%	-15%
0.40	0.85	1900	16.2	17.1	0.8	5%	12%	-12%
0.40	0.85	2000	18.2	18.0	-0.2	-1%	11%	-11%
0.40	0.85	2500	23.5	22.4	-1.0	-4%	6%	-6%
0.40	0.85	3000	26.8	26.9	0.2	1%	3%	-3%
0.40	0.85	3500	31.3	31.4	0.1	0%	2%	-2%
0.40	0.85	4000	35.0	35.9	0.9	2%	1%	-1%
0.40	0.85	4500	41.1	40.4	-0.7	-2%	0%	0%
0.40	0.85	5000	44.7	44.9	0.2	0%	1%	-1%
0.50	0.85	100	1.0	0.9	-0.1	-8%	84%	16%

0.50	0.85	200	1.8	1.8	0.0	-2%	74%	26%
0.50	0.85	300	2.7	2.7	0.0	0%	65%	-65%
0.50	0.85	400	3.6	3.6	0.0	0%	55%	-55%
0.50	0.85	500	4.9	4.5	-0.4	-8%	46%	-46%
0.50	0.85	600	5.5	5.4	-0.1	-2%	37%	-37%
0.50	0.85	700	6.4	6.3	-0.1	-2%	32%	-32%
0.50	0.85	800	7.3	7.2	-0.2	-2%	28%	-28%
0.50	0.85	900	7.9	8.1	0.1	2%	25%	-25%
0.50	0.85	1000	9.2	9.0	-0.2	-2%	20%	-20%
0.50	0.85	1100	9.8	9.9	0.1	1%	19%	-19%
0.50	0.85	1200	11.0	10.8	-0.2	-2%	18%	-18%
0.50	0.85	1300	10.8	11.7	0.8	8%	14%	-14%
0.50	0.85	1400	12.6	12.6	-0.1	-1%	10%	-10%
0.50	0.85	1500	13.4	13.5	0.0	0%	10%	-10%
0.50	0.85	1600	14.1	14.4	0.3	2%	10%	-10%
0.50	0.85	1700	15.4	15.3	-0.1	-1%	6%	-6%
0.50	0.85	1800	16.5	16.2	-0.3	-2%	5%	-5%
0.50	0.85	1900	17.0	17.1	0.1	1%	5%	-5%
0.50	0.85	2000	18.4	18.0	-0.4	-2%	4%	-4%
0.50	0.85	2500	22.3	22.4	0.1	1%	2%	-2%
0.50	0.85	3000	27.5	26.9	-0.5	-2%	1%	-1%
0.50	0.85	3500	31.4	31.4	0.0	0%	0%	0%
0.50	0.85	4000	35.3	35.9	0.6	2%	0%	0%
0.50	0.85	4500	40.1	40.4	0.3	1%	0%	0%
0.50	0.85	5000	45.0	44.9	-0.1	0%	0%	0%
0.60	0.85	100	0.9	0.9	0.0	1%	83%	17%
0.60	0.85	200	1.7	1.8	0.1	9%	70%	30%
0.60	0.85	300	2.7	2.7	0.0	-2%	53%	-53%
0.60	0.85	400	3.6	3.6	0.0	0%	45%	-45%
0.60	0.85	500	4.4	4.5	0.0	1%	36%	-36%
0.60	0.85	600	5.6	5.4	-0.2	-3%	28%	-28%
0.60	0.85	700	6.6	6.3	-0.3	-5%	24%	-24%

0.60	0.85	800	7.1	7.2	0.1	1%	19%	-19%
0.60	0.85	900	8.1	8.1	0.0	-1%	16%	-16%
0.60	0.85	1000	9.2	9.0	-0.2	-3%	12%	-12%
0.60	0.85	1100	9.9	9.9	0.0	0%	10%	-10%
0.60	0.85	1200	11.2	10.8	-0.4	-4%	8%	-8%
0.60	0.85	1300	11.7	11.7	0.0	0%	6%	-6%
0.60	0.85	1400	12.5	12.6	0.0	0%	4%	-4%
0.60	0.85	1500	13.9	13.5	-0.4	-3%	4%	-4%
0.60	0.85	1600	13.9	14.4	0.5	3%	3%	-3%
0.60	0.85	1700	15.5	15.3	-0.2	-1%	2%	-2%
0.60	0.85	1800	16.7	16.2	-0.6	-3%	2%	-2%
0.60	0.85	1900	16.8	17.1	0.2	1%	1%	-1%
0.60	0.85	2000	17.8	18.0	0.1	1%	1%	-1%
0.60	0.85	2500	23.0	22.4	-0.5	-2%	0%	0%
0.60	0.85	3000	27.2	26.9	-0.3	-1%	0%	0%
0.60	0.85	3500	31.3	31.4	0.1	0%	0%	0%
0.60	0.85	4000	35.1	35.9	0.8	2%	0%	0%
0.60	0.85	4500	40.3	40.4	0.1	0%	0%	0%
0.60	0.85	5000	45.0	44.9	-0.1	0%	0%	0%
0.70	0.85	100	0.8	0.9	0.1	6%	80%	20%
0.70	0.85	200	1.8	1.8	0.0	1%	64%	37%
0.70	0.85	300	3.0	2.7	-0.3	-9%	43%	-43%
0.70	0.85	400	3.9	3.6	-0.3	-8%	33%	-33%
0.70	0.85	500	4.6	4.5	-0.2	-3%	26%	-26%
0.70	0.85	600	5.4	5.4	0.0	0%	20%	-20%
0.70	0.85	700	6.4	6.3	-0.1	-1%	12%	-12%
0.70	0.85	800	7.5	7.2	-0.3	-4%	11%	-11%
0.70	0.85	900	8.4	8.1	-0.3	-4%	7%	-7%
0.70	0.85	1000	8.7	9.0	0.2	3%	7%	-7%
0.70	0.85	1100	9.8	9.9	0.0	0%	4%	-4%
0.70	0.85	1200	10.6	10.8	0.2	2%	4%	-4%
0.70	0.85	1300	11.5	11.7	0.2	2%	2%	-2%

0.70	0.85	1400	12.6	12.6	0.0	0%	1%	-1%
0.70	0.85	1500	13.3	13.5	0.2	1%	2%	-2%
0.70	0.85	1600	14.2	14.4	0.1	1%	1%	-1%
0.70	0.85	1700	15.2	15.3	0.0	0%	0%	0%
0.70	0.85	1800	15.4	16.2	0.7	5%	1%	-1%
0.70	0.85	1900	16.7	17.1	0.3	2%	0%	0%
0.70	0.85	2000	17.8	18.0	0.2	1%	0%	0%
0.70	0.85	2500	22.5	22.4	0.0	0%	0%	0%
0.70	0.85	3000	27.0	26.9	0.0	0%	0%	0%
0.70	0.85	3500	31.7	31.4	-0.3	-1%	0%	0%
0.70	0.85	4000	35.5	35.9	0.5	1%	0%	0%
0.70	0.85	4500	40.4	40.4	0.0	0%	0%	0%
0.70	0.85	5000	44.2	44.9	0.7	2%	0%	0%
0.80	0.85	100	1.0	0.9	-0.1	-7%	74%	26%
0.80	0.85	200	1.8	1.8	0.0	-2%	52%	48%
0.80	0.85	300	2.6	2.7	0.1	3%	37%	-37%
0.80	0.85	400	3.6	3.6	0.0	1%	21%	-21%
0.80	0.85	500	4.4	4.5	0.1	3%	14%	-14%
0.80	0.85	600	5.5	5.4	-0.1	-1%	7%	-7%
0.80	0.85	700	6.5	6.3	-0.2	-3%	4%	-4%
0.80	0.85	800	7.1	7.2	0.1	2%	3%	-3%
0.80	0.85	900	8.2	8.1	-0.1	-1%	1%	-1%
0.80	0.85	1000	8.9	9.0	0.1	1%	1%	-1%
0.80	0.85	1100	9.9	9.9	0.0	0%	0%	0%
0.80	0.85	1200	10.8	10.8	0.0	0%	1%	-1%
0.80	0.85	1300	11.8	11.7	-0.1	-1%	0%	0%
0.80	0.85	1400	12.6	12.6	-0.1	-1%	0%	0%
0.80	0.85	1500	13.4	13.5	0.0	0%	0%	0%
0.80	0.85	1600	14.2	14.4	0.2	1%	0%	0%
0.80	0.85	1700	15.3	15.3	0.0	0%	0%	0%
0.80	0.85	1800	16.1	16.2	0.0	0%	0%	0%
0.80	0.85	1900	17.0	17.1	0.0	0%	0%	0%

0.80	0.85	2000	18.0	18.0	-0.1	0%	0%	0%
0.80	0.85	2500	22.1	22.4	0.3	2%	0%	0%
0.80	0.85	3000	26.9	26.9	0.1	0%	0%	0%
0.80	0.85	3500	30.9	31.4	0.5	2%	0%	0%
0.80	0.85	4000	35.6	35.9	0.3	1%	0%	0%
0.80	0.85	4500	40.0	40.4	0.4	1%	0%	0%
0.80	0.85	5000	45.0	44.9	-0.1	0%	0%	0%

Tableau 3. Résultats de l'étude de simulation pour un taux de croissance démographique annuel de $\lambda = 0.90$, ce qui représente un déclin de la population de 10% par an. « N30 » : taille de population prédite à 30 ans ; « Diff. » : différence ; « Pr.ext » : Probabilité d'extinction.

Survie	Taux de Croissance	Taille de population initiale (N0)	N30 modèle stochastique	- N30 modèle déterministe	- Diff. N30	Diff. relative N30	Probabilité d'extinction (PrExt)	Biais PrExt
0.40	0.90	100	4.6	4.7	-0.1	3%	64%	-64%
0.40	0.90	200	9.9	9.4	0.5	-5%	40%	-40%
0.40	0.90	300	15.2	14.1	1.1	-7%	25%	-25%
0.40	0.90	400	18.5	18.8	-0.3	2%	18%	-18%
0.40	0.90	500	23.3	23.6	-0.2	1%	12%	-12%
0.40	0.90	600	26.9	28.3	-1.4	5%	7%	-7%
0.40	0.90	700	32.4	33.0	-0.6	2%	5%	-5%
0.40	0.90	800	37.5	37.7	-0.2	0%	3%	-3%
0.40	0.90	900	42.4	42.4	0.0	0%	2%	-2%
0.40	0.90	1000	49.3	47.1	2.2	-4%	1%	-1%
0.40	0.90	1100	51.0	51.8	-0.8	2%	1%	-1%
0.40	0.90	1200	56.3	56.5	-0.2	0%	1%	-1%
0.40	0.90	1300	60.5	61.2	-0.7	1%	1%	-1%
0.40	0.90	1400	65.9	65.9	-0.1	0%	0%	0%
0.40	0.90	1500	70.4	70.7	-0.3	0%	0%	0%
0.40	0.90	1600	74.3	75.4	-1.1	1%	0%	0%
0.40	0.90	1700	79.2	80.1	-0.9	1%	0%	0%
0.40	0.90	1800	85.7	84.8	1.0	-1%	0%	0%
0.40	0.90	1900	86.4	89.5	-3.1	4%	0%	0%
0.40	0.90	2000	95.7	94.2	1.5	-2%	0%	0%
0.50	0.90	100	4.7	4.7	0.0	1%	55%	-55%
0.50	0.90	200	9.5	9.4	0.1	-1%	32%	-32%
0.50	0.90	300	13.8	14.1	-0.3	2%	18%	-18%
0.50	0.90	400	19.2	18.8	0.4	-2%	9%	-9%
0.50	0.90	500	23.5	23.6	-0.1	0%	4%	-4%
0.50	0.90	600	29.2	28.3	0.9	-3%	3%	-3%

0.50	0.90	700	32.5	33.0	-0.5	2%	2%	-2%
0.50	0.90	800	37.8	37.7	0.2	0%	1%	-1%
0.50	0.90	900	42.6	42.4	0.2	0%	1%	-1%
0.50	0.90	1000	47.7	47.1	0.6	-1%	0%	0%
0.50	0.90	1100	52.6	51.8	0.7	-1%	0%	0%
0.50	0.90	1200	55.5	56.5	-1.0	2%	0%	0%
0.50	0.90	1300	61.5	61.2	0.3	0%	0%	0%
0.50	0.90	1400	65.9	65.9	-0.1	0%	0%	0%
0.50	0.90	1500	70.8	70.7	0.1	0%	0%	0%
0.50	0.90	1600	73.3	75.4	-2.0	3%	0%	0%
0.50	0.90	1700	80.4	80.1	0.3	0%	0%	0%
0.50	0.90	1800	85.3	84.8	0.5	-1%	0%	0%
0.50	0.90	1900	90.7	89.5	1.2	-1%	0%	0%
0.50	0.90	2000	96.3	94.2	2.1	-2%	0%	0%
0.60	0.90	100	4.7	4.7	0.0	0%	46%	-46%
0.60	0.90	200	9.2	9.4	-0.2	3%	24%	-24%
0.60	0.90	300	14.0	14.1	-0.1	1%	9%	-9%
0.60	0.90	400	18.5	18.8	-0.3	2%	4%	-4%
0.60	0.90	500	24.5	23.6	0.9	-4%	2%	-2%
0.60	0.90	600	28.3	28.3	0.1	0%	1%	-1%
0.60	0.90	700	32.0	33.0	-1.0	3%	1%	-1%
0.60	0.90	800	37.5	37.7	-0.1	0%	0%	0%
0.60	0.90	900	42.4	42.4	0.0	0%	0%	0%
0.60	0.90	1000	47.3	47.1	0.2	0%	0%	0%
0.60	0.90	1100	52.0	51.8	0.2	0%	0%	0%
0.60	0.90	1200	56.6	56.5	0.1	0%	0%	0%
0.60	0.90	1300	60.8	61.2	-0.4	1%	0%	0%
0.60	0.90	1400	66.1	65.9	0.1	0%	0%	0%
0.60	0.90	1500	70.6	70.7	0.0	0%	0%	0%
0.60	0.90	1600	75.3	75.4	0.0	0%	0%	0%
0.60	0.90	1700	80.2	80.1	0.2	0%	0%	0%
0.60	0.90	1800	87.0	84.8	2.2	-3%	0%	0%

0.60	0.90	1900	89.3	89.5	-0.2	0%	0%	0%
0.60	0.90	2000	94.4	94.2	0.2	0%	0%	0%
0.70	0.90	100	4.8	4.7	0.1	-2%	35%	-35%
0.70	0.90	200	9.3	9.4	-0.1	1%	12%	-12%
0.70	0.90	300	13.6	14.1	-0.5	4%	5%	-5%
0.70	0.90	400	18.7	18.8	-0.2	1%	1%	-1%
0.70	0.90	500	23.8	23.6	0.3	-1%	0%	0%
0.70	0.90	600	28.0	28.3	-0.2	1%	0%	0%
0.70	0.90	700	33.5	33.0	0.5	-1%	0%	0%
0.70	0.90	800	36.4	37.7	-1.3	4%	0%	0%
0.70	0.90	900	42.7	42.4	0.3	-1%	0%	0%
0.70	0.90	1000	46.5	47.1	-0.6	1%	0%	0%
0.70	0.90	1100	52.0	51.8	0.1	0%	0%	0%
0.70	0.90	1200	56.8	56.5	0.3	0%	0%	0%
0.70	0.90	1300	61.4	61.2	0.2	0%	0%	0%
0.70	0.90	1400	66.6	65.9	0.7	-1%	0%	0%
0.70	0.90	1500	70.0	70.7	-0.7	1%	0%	0%
0.70	0.90	1600	75.7	75.4	0.3	0%	0%	0%
0.70	0.90	1700	80.3	80.1	0.2	0%	0%	0%
0.70	0.90	1800	85.1	84.8	0.4	0%	0%	0%
0.70	0.90	1900	90.3	89.5	0.8	-1%	0%	0%
0.70	0.90	2000	94.2	94.2	0.0	0%	0%	0%
0.80	0.90	100	4.9	4.7	0.2	-3%	22%	-22%
0.80	0.90	200	9.5	9.4	0.1	-1%	3%	-3%
0.80	0.90	300	14.1	14.1	0.0	0%	1%	-1%
0.80	0.90	400	18.6	18.8	-0.2	1%	0%	0%
0.80	0.90	500	23.5	23.6	0.0	0%	0%	0%
0.80	0.90	600	28.5	28.3	0.3	-1%	0%	0%
0.80	0.90	700	32.8	33.0	-0.1	0%	0%	0%
0.80	0.90	800	38.0	37.7	0.3	-1%	0%	0%
0.80	0.90	900	42.0	42.4	-0.4	1%	0%	0%
0.80	0.90	1000	47.6	47.1	0.5	-1%	0%	0%

0.80	0.90	1100	52.5	51.8	0.7	-1%	0%	0%
0.80	0.90	1200	57.5	56.5	1.0	-2%	0%	0%
0.80	0.90	1300	61.1	61.2	-0.2	0%	0%	0%
0.80	0.90	1400	65.3	65.9	-0.6	1%	0%	0%
0.80	0.90	1500	70.8	70.7	0.2	0%	0%	0%
0.80	0.90	1600	75.6	75.4	0.2	0%	0%	0%
0.80	0.90	1700	79.3	80.1	-0.8	1%	0%	0%
0.80	0.90	1800	85.3	84.8	0.5	-1%	0%	0%
0.80	0.90	1900	90.0	89.5	0.5	-1%	0%	0%
0.80	0.90	2000	94.7	94.2	0.5	-1%	0%	0%
0.90	0.90	100	4.7	4.7	0.0	0%	5%	-5%
0.90	0.90	200	9.4	9.4	0.0	0%	0%	0%
0.90	0.90	300	14.1	14.1	-0.1	1%	0%	0%
0.90	0.90	400	19.0	18.8	0.2	-1%	0%	0%
0.90	0.90	500	23.6	23.6	0.0	0%	0%	0%
0.90	0.90	600	28.4	28.3	0.1	0%	0%	0%
0.90	0.90	700	32.7	33.0	-0.2	1%	0%	0%
0.90	0.90	800	37.8	37.7	0.1	0%	0%	0%
0.90	0.90	900	42.4	42.4	0.0	0%	0%	0%
0.90	0.90	1000	47.2	47.1	0.1	0%	0%	0%
0.90	0.90	1100	52.1	51.8	0.3	-1%	0%	0%
0.90	0.90	1200	56.4	56.5	-0.1	0%	0%	0%
0.90	0.90	1300	61.2	61.2	-0.1	0%	0%	0%
0.90	0.90	1400	65.5	65.9	-0.4	1%	0%	0%
0.90	0.90	1500	70.5	70.7	-0.1	0%	0%	0%
0.90	0.90	1600	75.9	75.4	0.6	-1%	0%	0%
0.90	0.90	1700	79.5	80.1	-0.6	1%	0%	0%
0.90	0.90	1800	85.0	84.8	0.2	0%	0%	0%
0.90	0.90	1900	89.5	89.5	0.0	0%	0%	0%
0.90	0.90	2000	94.6	94.2	0.4	0%	0%	0%

Tableau 4. Résultats de l'étude de simulation pour un taux de croissance démographique annuel de $\lambda = 0.95$, ce qui représente un déclin de la population de 5% par an. « N30 » : taille de population prédite à 30 ans ; « Diff. » : différence ; « Pr.ext » : Probabilité d'extinction.

Survie	Taux de Croissance	Taille de population initiale (N0)	N30 modèle stochastique	- N30 modèle déterministe	- Diff. N30	Diff. relative N30	Probabilité d'extinction (PrExt)	Biais PrExt
0.40	0.95	100	22.9	22.6	0.3	-1%	25%	-25%
0.40	0.95	200	46.7	45.2	1.5	-3%	8%	-8%
0.40	0.95	300	67.7	67.8	-0.1	0%	2%	-2%
0.40	0.95	400	91.8	90.4	1.4	-2%	1%	-1%
0.40	0.95	500	112.7	113.0	-0.3	0%	0%	0%
0.40	0.95	600	139.4	135.6	3.9	-3%	0%	0%
0.40	0.95	700	163.9	158.2	5.8	-4%	0%	0%
0.40	0.95	800	183.1	180.7	2.3	-1%	0%	0%
0.40	0.95	900	200.2	203.3	-3.2	2%	0%	0%
0.40	0.95	1000	222.6	225.9	-3.3	1%	0%	0%
0.40	0.95	1100	247.2	248.5	-1.4	1%	0%	0%
0.40	0.95	1200	271.3	271.1	0.2	0%	0%	0%
0.40	0.95	1300	301.3	293.7	7.6	-3%	0%	0%
0.40	0.95	1400	316.5	316.3	0.1	0%	0%	0%
0.40	0.95	1500	340.9	338.9	2.0	-1%	0%	0%
0.40	0.95	1600	360.2	361.5	-1.3	0%	0%	0%
0.40	0.95	1700	380.1	384.1	-4.0	1%	0%	0%
0.40	0.95	1800	405.0	406.7	-1.7	0%	0%	0%
0.40	0.95	1900	423.9	429.3	-5.3	1%	0%	0%
0.40	0.95	2000	453.4	451.9	1.5	0%	0%	0%
0.50	0.95	100	21.9	22.6	-0.7	3%	16%	-16%
0.50	0.95	200	46.3	45.2	1.1	-2%	3%	-3%
0.50	0.95	300	67.1	67.8	-0.7	1%	1%	-1%
0.50	0.95	400	90.7	90.4	0.3	0%	0%	0%
0.50	0.95	500	111.8	113.0	-1.2	1%	0%	0%
0.50	0.95	600	140.3	135.6	4.7	-3%	0%	0%

0.50	0.95	700	157.5	158.2	-0.6	0%	0%	0%
0.50	0.95	800	178.7	180.7	-2.1	1%	0%	0%
0.50	0.95	900	201.1	203.3	-2.3	1%	0%	0%
0.50	0.95	1000	224.0	225.9	-1.9	1%	0%	0%
0.50	0.95	1100	254.1	248.5	5.6	-2%	0%	0%
0.50	0.95	1200	272.5	271.1	1.4	-1%	0%	0%
0.50	0.95	1300	293.2	293.7	-0.5	0%	0%	0%
0.50	0.95	1400	318.2	316.3	1.9	-1%	0%	0%
0.50	0.95	1500	339.6	338.9	0.7	0%	0%	0%
0.50	0.95	1600	364.6	361.5	3.1	-1%	0%	0%
0.50	0.95	1700	383.7	384.1	-0.4	0%	0%	0%
0.50	0.95	1800	408.3	406.7	1.7	0%	0%	0%
0.50	0.95	1900	427.8	429.3	-1.5	0%	0%	0%
0.50	0.95	2000	448.2	451.9	-3.7	1%	0%	0%
0.60	0.95	100	22.2	22.6	-0.4	2%	10%	-10%
0.60	0.95	200	45.9	45.2	0.7	-1%	1%	-1%
0.60	0.95	300	68.0	67.8	0.2	0%	0%	0%
0.60	0.95	400	91.4	90.4	1.0	-1%	0%	0%
0.60	0.95	500	112.1	113.0	-0.9	1%	0%	0%
0.60	0.95	600	138.7	135.6	3.1	-2%	0%	0%
0.60	0.95	700	159.4	158.2	1.3	-1%	0%	0%
0.60	0.95	800	181.1	180.7	0.4	0%	0%	0%
0.60	0.95	900	204.9	203.3	1.5	-1%	0%	0%
0.60	0.95	1000	223.5	225.9	-2.4	1%	0%	0%
0.60	0.95	1100	248.5	248.5	0.0	0%	0%	0%
0.60	0.95	1200	271.4	271.1	0.3	0%	0%	0%
0.60	0.95	1300	291.5	293.7	-2.2	1%	0%	0%
0.60	0.95	1400	313.8	316.3	-2.5	1%	0%	0%
0.60	0.95	1500	339.2	338.9	0.3	0%	0%	0%
0.60	0.95	1600	361.4	361.5	-0.1	0%	0%	0%
0.60	0.95	1700	383.4	384.1	-0.7	0%	0%	0%
0.60	0.95	1800	407.1	406.7	0.4	0%	0%	0%

0.60	0.95	1900	426.4	429.3	-2.9	1%	0%	0%
0.60	0.95	2000	458.5	451.9	6.6	-1%	0%	0%
0.70	0.95	100	23.0	22.6	0.4	-2%	3%	-3%
0.70	0.95	200	44.9	45.2	-0.3	1%	0%	0%
0.70	0.95	300	67.7	67.8	-0.1	0%	0%	0%
0.70	0.95	400	89.6	90.4	-0.8	1%	0%	0%
0.70	0.95	500	114.5	113.0	1.6	-1%	0%	0%
0.70	0.95	600	133.9	135.6	-1.7	1%	0%	0%
0.70	0.95	700	156.5	158.2	-1.6	1%	0%	0%
0.70	0.95	800	180.4	180.7	-0.4	0%	0%	0%
0.70	0.95	900	205.0	203.3	1.7	-1%	0%	0%
0.70	0.95	1000	225.0	225.9	-1.0	0%	0%	0%
0.70	0.95	1100	248.9	248.5	0.4	0%	0%	0%
0.70	0.95	1200	269.5	271.1	-1.7	1%	0%	0%
0.70	0.95	1300	295.7	293.7	2.0	-1%	0%	0%
0.70	0.95	1400	314.5	316.3	-1.8	1%	0%	0%
0.70	0.95	1500	336.7	338.9	-2.2	1%	0%	0%
0.70	0.95	1600	362.4	361.5	0.9	0%	0%	0%
0.70	0.95	1700	384.8	384.1	0.7	0%	0%	0%
0.70	0.95	1800	408.6	406.7	1.9	0%	0%	0%
0.70	0.95	1900	425.9	429.3	-3.3	1%	0%	0%
0.70	0.95	2000	450.1	451.9	-1.8	0%	0%	0%
0.80	0.95	100	22.3	22.6	-0.3	1%	1%	-1%
0.80	0.95	200	44.6	45.2	-0.6	1%	0%	0%
0.80	0.95	300	67.3	67.8	-0.4	1%	0%	0%
0.80	0.95	400	90.2	90.4	-0.2	0%	0%	0%
0.80	0.95	500	113.9	113.0	0.9	-1%	0%	0%
0.80	0.95	600	135.8	135.6	0.3	0%	0%	0%
0.80	0.95	700	159.2	158.2	1.0	-1%	0%	0%
0.80	0.95	800	179.1	180.7	-1.7	1%	0%	0%
0.80	0.95	900	203.1	203.3	-0.3	0%	0%	0%
0.80	0.95	1000	225.8	225.9	-0.1	0%	0%	0%

0.80	0.95	1100	249.4	248.5	0.9	0%	0%	0%
0.80	0.95	1200	269.8	271.1	-1.3	0%	0%	0%
0.80	0.95	1300	292.4	293.7	-1.3	0%	0%	0%
0.80	0.95	1400	315.2	316.3	-1.1	0%	0%	0%
0.80	0.95	1500	341.9	338.9	3.0	-1%	0%	0%
0.80	0.95	1600	361.4	361.5	-0.1	0%	0%	0%
0.80	0.95	1700	384.0	384.1	-0.1	0%	0%	0%
0.80	0.95	1800	404.6	406.7	-2.1	1%	0%	0%
0.80	0.95	1900	427.4	429.3	-1.9	0%	0%	0%
0.80	0.95	2000	450.1	451.9	-1.7	0%	0%	0%
0.90	0.95	100	22.3	22.6	-0.3	1%	0%	0%
0.90	0.95	200	44.6	45.2	-0.6	1%	0%	0%
0.90	0.95	300	67.7	67.8	-0.1	0%	0%	0%
0.90	0.95	400	90.1	90.4	-0.2	0%	0%	0%
0.90	0.95	500	114.3	113.0	1.3	-1%	0%	0%
0.90	0.95	600	135.2	135.6	-0.3	0%	0%	0%
0.90	0.95	700	158.3	158.2	0.2	0%	0%	0%
0.90	0.95	800	180.2	180.7	-0.6	0%	0%	0%
0.90	0.95	900	204.2	203.3	0.8	0%	0%	0%
0.90	0.95	1000	225.1	225.9	-0.8	0%	0%	0%
0.90	0.95	1100	248.2	248.5	-0.3	0%	0%	0%
0.90	0.95	1200	270.2	271.1	-0.9	0%	0%	0%
0.90	0.95	1300	293.9	293.7	0.1	0%	0%	0%
0.90	0.95	1400	314.8	316.3	-1.5	0%	0%	0%
0.90	0.95	1500	338.3	338.9	-0.6	0%	0%	0%
0.90	0.95	1600	363.5	361.5	2.0	-1%	0%	0%
0.90	0.95	1700	384.5	384.1	0.4	0%	0%	0%
0.90	0.95	1800	407.2	406.7	0.5	0%	0%	0%
0.90	0.95	1900	429.9	429.3	0.7	0%	0%	0%
0.90	0.95	2000	451.7	451.9	-0.2	0%	0%	0%