

MODELISATION DE LA POPULATION DE BELUGA DU FLEUVE SAINT-LAURENT

Pour le cours LBRTI 2102



Ludovic Lepers

BIRC21 10C

Décembre 2018

Prof. Emmanuel Hanert

Table des matières

Introduction.....	3
Présentation du modèle	4
Fonctionnement du modèle.....	4
Calibration du modèle	6
Prédictions.....	7
Construction du modèle.....	9
Critique du modèle.....	13
Annexes	14
Bibliographie.....	15

Introduction

Le béluga est un cétacé carnivore qui vit dans les eaux froides du nord. Ils se nourrissent de poisson et d'animaux démersaux, c'est-à-dire des animaux qui vivent au moins une partie du temps sur le fond de l'océan. Il a une espérance de vie de plusieurs dizaines d'années. Les femelles ont un petit à la fois et on l'appelle le veau. Dans ce rapport nous nous focaliserons sur ceux vivant le plus au sud, à savoir les bélugas de l'estuaire du fleuve Saint-Laurent au Québec au Canada. Il ne semble pas y avoir de mélange entre ceux et les autres populations, on les considèrera donc comme isolés. Les bélugas ne sont pas reconnu comme étant en voie d'extinction, cependant ceux peuplant le fleuve Saint-Laurent ont connu des jours meilleur car il reste moins d'un millier d'individus selon les dernières estimations (1).

Le but de ce travail était de réaliser un modèle qui décrit l'évolution de la population de béluga peuplant l'estuaire du Saint-Laurent, d'optimiser les paramètres du modèle puis de réaliser différents scénarios pour décrire l'évolution de cette population.

Ce rapport se divise en trois parties. La première détaillera l'équation du modèle, sa calibration et présentera trois scénarios pour le futur de la population de béluga. La seconde se concentrera sur comment le modèle a été construit au niveau des variables qui y sont introduite et où l'information a été récoltée. La dernière portera sur les nombreuses critiques que l'on peut porter au modèle et servira de conclusion.

La partie annexe décrit l'organisation des fichiers du modèle joints au rapport.

Présentation du modèle

Fonctionnement du modèle

Le principe du modèle est assez simple, il repose sur 8 paramètres et 3 réservoirs, combinés dans une équation différentielle.

Les trois réservoirs sont :

- La population de veaux (**bebe**), les individus compris entre 0 et 1 ans d'âge.
- La population de jeune (**jeune**), les individus compris entre 1 et 7 ans d'âge
- La population d'adulte pubère (**mature**), les autres individus (7-...ans)

Les paramètres sont :

- Le besoin de nourriture (**needNourriture**) des bélugas : 4.3 [tonnes/an]
- Le rapport entre les bélugas échoué et les bélugas échoué comptabilisés (**coefEchoueRetrouve**) : 2.51 []
- La couverture de glace minimum nécessaire pour que la population ne subisse pas d'impacts négatifs (**needIce**), 1 signifie qu'il faut que tout le fleuve Saint-Laurent soit couvert de glace pour qu'il n'y ai pas d'impact, 0 signifie que la couverture de glace ne joue aucun rôle : 0.302 []
- L'impact d'un manque de glace sur la population (**impactIce**) : 0.107 []
- Les coefficients de chasse du hareng et de la morue en tonne de nourriture absorbable par tonne présentent dans le milieu, (**coefficientChasseHareng**) et (**coefficientChasseMorue**) : 0.134[tonne/tonne de hareng] et 0.1123 [tonne /tonne de morue]
- Le temps nécessaire pour qu'un adulte ai un veau et soit prêt à en avoir un nouveau (**natalite**) : 9.09 []
- Le temps de vie moyen d'un béluga (**mortalite**) : 29.78 []

Les variables entrées varient chaque année et sont :

- Le nombre d'adulte et de veaux qui se sont échoués (**adulteEchoue**) et (**bebeEchoue**), en [béluga/an]
- Le rapport de la couverture maximum de glace du fleuve Saint-Laurent par la surface du fleuve (**pourcentageMaximalGlace**) adimensionnel []
- Le stock reproducteur de hareng (**biomasseHareng**) en [kt de hareng] (kt pour millier de tonne)
- Le stock reproducteur de morue (**biomasseMorue**) en [kt de morue]

L'équation différentielle est résolue numériquement par le solveur ode45 de Matlab. dJeune, dBebe et dMature sont la variation du nombre de béluga de chaque réservoir. Le solveur détermine un intervalle de temps adéquat lui-même. L'équation différentielle est décrite ci-dessous, la construction de l'équation est divisée en différentes étapes aux cours desquelles dJeune, dBebe et dMature se verrons attribuer à chaque fois une nouvelle valeur. Ce n'est pas un système d'équation mais bien une suite algorithmique d'opération qui aboutissent à une valeur pour chaque variable.

1. Les veaux deviennent des jeunes

$$\underline{dBebe} = - \textit{bebe} \quad [\text{béluga}]$$

$$\underline{dJeune} = \textit{bebe} [\text{béluga}]$$

2. Un sixième des jeunes deviennent des adultes

$$\underline{dJeune} = \underline{dJeune} - \textit{jeune} / 6 \quad [\text{béluga}]$$

$$\underline{dMature} = \underline{dMature} + \textit{jeune} / 6 \quad [\text{béluga}]$$

3. Des adultes meurent de vieillesse (- 7 car les veaux et les jeunes bélugas ne sont pas concernés)

$$\underline{dMature} = \underline{dMature} - \textit{mature} / (\textit{mortalite} - 7) \quad [\text{béluga}]$$

4. De nouveaux veaux naissent

$$\underline{dBebe} = \underline{dBebe} + \textit{mature} / \textit{natalite} \quad [\text{béluga}]$$

5. Des bélugas meurent en s'échouant, on pondère pour les jeunes et les adultes

$$\underline{dBebe} = \underline{dBebe} - \textit{coefEchoueRetrouve} * \textit{bebeEchoue} \quad [\text{béluga}]$$

$$\underline{dJeune} = \underline{dJeune} - \textit{coefEchoueRetrouve} * \textit{adulteEchoue} * (\textit{jeune} / (\textit{mature} + \textit{jeune})) \quad [\text{béluga}]$$

$$\underline{dMature} = \underline{dMature} - \textit{coefEchoueRetrouve} * \textit{adulteEchoue} * (\textit{mature} / (\textit{mature} + \textit{jeune})) \quad [\text{béluga}]$$

6. Impact de la couverture de glace, cela n'a lieu que si *pourcentageMaximalGlace* est plus petit que **needIce**

$$\underline{dBebe} = \underline{dBebe} + \textit{bebe} * \textit{impactIce} * (\textit{pourcentageMaximalGlace} - \textit{needIce}) \quad [\text{béluga}]$$

$$\underline{dJeune} = \underline{dJeune} + \textit{jeune} * \textit{impactIce} * (\textit{pourcentageMaximalGlace} - \textit{needIce}) \quad [\text{béluga}]$$

$$\underline{dMature} = \underline{dMature} + \textit{mature} * \textit{impactIce} * (\textit{pourcentageMaximalGlace} - \textit{needIce}) \quad [\text{béluga}]$$

7. Impact des harengs et de la morue, n'impact que s'il n'y a pas assez d'hareng et de morue pour que tous les bélugas puissent se nourrir suffisamment

$$\textit{sommeVieux} = \textit{jeune} + \textit{vieux} \quad [\text{béluga}]$$

$$\textit{masseNourritureAccessible} = \textit{biomasseHareng} * 1000 * \textit{coefficientChasseHareng} + \textit{biomasseMorue} * 1000 * \textit{coefficientChasseMorue} \quad [\text{tonne}]$$

Si $\textit{sommeVieux} * \textit{needNourriture}$ est plus grands que $\textit{masseNourritureAccessible}$, cela veut dire que les bélugas ne peuvent pas trouver suffisamment de poisson pour se nourrir et les lignes suivantes

s'exécutent, on diminue les stocks de béluga de manière proportionnelle au déficit des stocks de nourriture en les normalisant.

$$\frac{dJeune}{(sommeVieux * needNourriture)} = \frac{dJeune - jeune * (sommeVieux * needNourriture - masseNourritureAccessible)}{(sommeVieux * needNourriture)} \quad [béluga]$$

$$\frac{dMature}{(sommeVieux * needNourriture)} = \frac{dMature - mature * (sommeVieux * needNourriture - masseNourritureAccessible)}{(sommeVieux * needNourriture)} \quad [béluga]$$

On ajoute ensuite les incréments aux réservoirs puis on s'assure qu'ils ne descendent pas sous 0.

Calibration du modèle

Pour calibrer le modèle, on utilise la fonction `fminssearchbnd` (2) en appliquant des conditions de minimum et de maximum. La configuration par défaut d'`ode45` est utilisée pour la construction du modèle, l'optimisation finale utilise un 'refine' de 10 pour obtenir une courbe avec plus de point. Le modèle sera calibré sur les données comprises entre 1983 et 2012.

Les minimums et maximums pour les paramètres sont contenu dans deux vecteurs. Bien que certains (la mortalité) puissent être estimés grossièrement via la biologie de base du beluga, la plupart ont nécessité de faire tourner de nombreuses fois l'optimisation avec des paramètres de départ aléatoires pour comprendre comment le modèle se comportait et choisir des valeurs de départ les plus pertinentes possible. Cela est sans doute provoqué par l'existence de nombreux minimums locaux dans l'espace à 7 dimensions que doit parcourir la fonction qui réalise l'optimisation.

Quand le modèle fonctionne il donne alors le graphe suivant après optimisation :

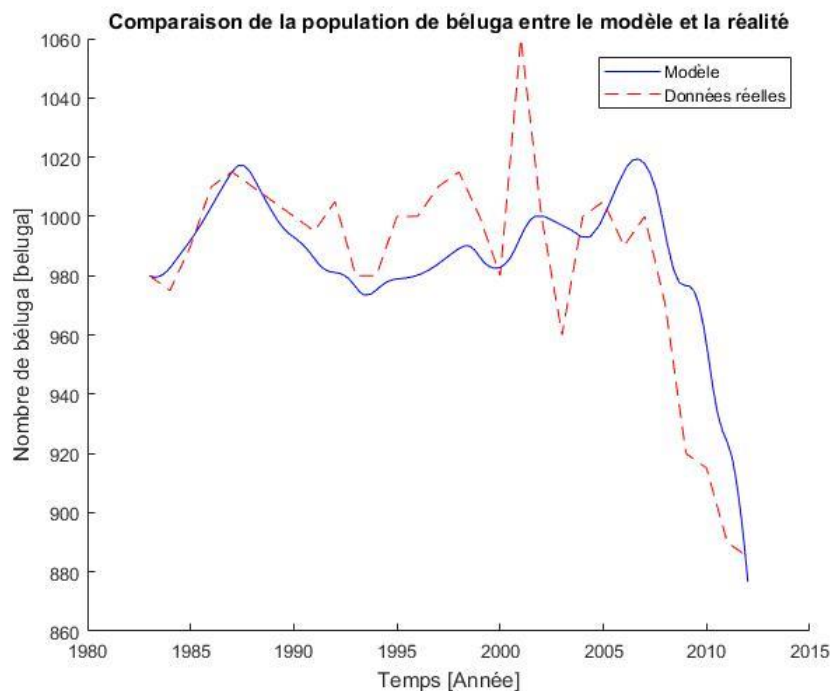


Figure 1 : Comparaison de la population de béluga entre le modèle et la réalité

Sur la figure 1, nous constatons que le modèle suit globalement la tendance des valeurs réelles mais il existe tout de même un certain écart.

Prédictions

Pour ce volet, trois scénarios ont été réalisés, un scénario optimal dans lequel les variables reviennent à un niveau semblable à celle de 1980, un scénario constant(neutre) dans lequel les valeurs restent à leur valeur des dernières années avant 2012 et un scénario pessimiste dans lequel les valeurs s'empirent par rapport à celles de 2012. Les scénarios s'étendent de 2012 à 2050.

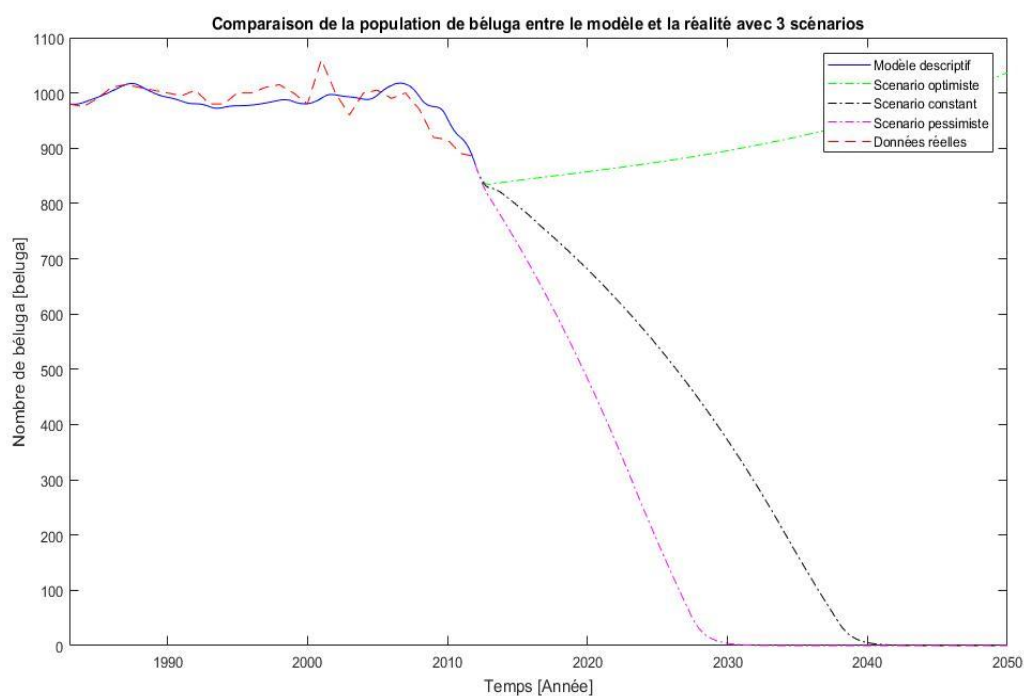


Figure 2 : Comparaison de la population de béluga entre le modèle et la réalité

Sur la figure 2, on constate que le scénario pessimiste et le scénario neutre prédisent tous les deux un effondrement de la population de béluga. Cet effondrement semble suivre la tendance actuelle. Dans le scénario optimiste la population croît lentement et rejoindra (les données ne sont pas visibles sur le graphe) un maximum vers les années 2150 avec environ 11500 bélugas, ce qui est comparable (bien que sans doute légèrement supérieur) avec les chiffres estimés du début des années 1900.

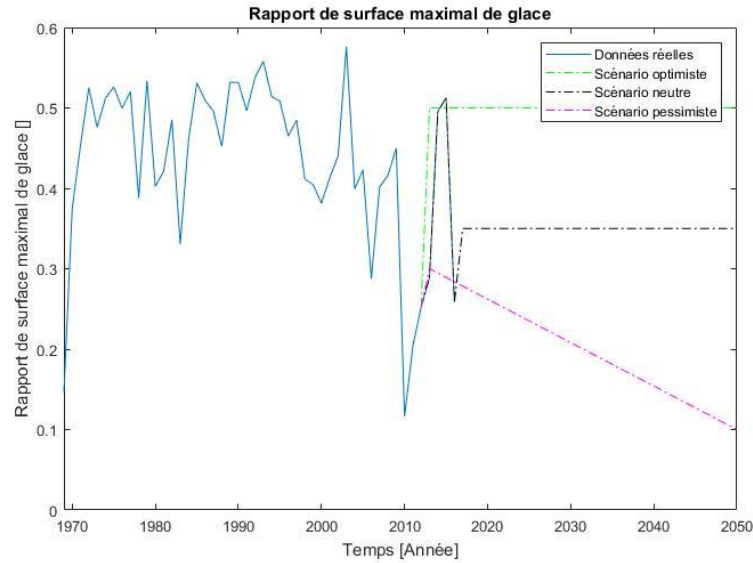


Figure 3 : Scénarios de l'évolution de la couverture de glace maximale

La principale différence entre le scénario pessimiste et le scénario neutre est que d'un côté la couverture de glace descend suffisamment pour avoir un impact sur les bélugas et de l'autre côté non, comme visible sur la figure 3. C'est sans doute ce point qui change la vitesse de perte de population entre ces deux scénarios. Enfin, sur la figure 4, on peut constater que le poisson est sans doute la cause de la chute de population dans le modèle neutre, les stocks ont en effet fortement diminué durant les 20 dernières années. Cela est tenu en compte dans le scénario constant.

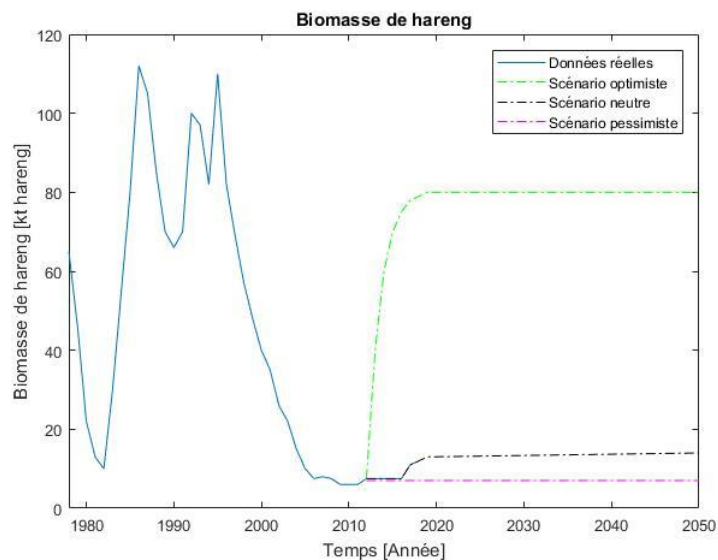


Figure 4 : Scénarios de l'évolution de la population de hareng

Bien que cela reste des suppositions assez fortes, il semble que le plus important pour essayer de maintenir une population de béluga serait que la couverture de glace ne devienne pas trop faible et que les stocks de poissons se remplissent. Cela nécessite diverses mesures, par exemple en limitant la pêche et le changement climatique.

Construction du modèle

Le modèle a été construit en plusieurs étapes. La première fut de récolter de l'information sur les bélugas. Sur un site lié au gouvernement du Canada (1), un bilan de la situation des bélugas dans le fleuve Saint-Laurent a été réalisé par le COSEPAC en 2014. C'est sur ces informations que le modèle se repose. Selon cette étude, les facteurs principaux impactant les bélugas sont : la température de surface, l'indice de glace, la biomasse de hareng et la biomasse des poissons démersaux. Il se posait toutefois un problème, il n'était en effet pas possible de retrouver les unités des données ni le sens de ce qui était entendu par anomalie (les données étaient fournies sous forme d'anomalie dans cet article). Des recoupements ont alors été réalisés avec plusieurs autres sources pour comparer. Sur les figures 5 à 8 les données du COSEPAC seront représentées en orange.

La première comparaison est illustrée sur la figure 5, d'un côté l'anomalie telle que décrite dans l'article sur les bélugas du COSEPAC et l'autre provient de la partie météo d'un site gouvernemental Canadien(4) dont le mode de traitement est toutefois beaucoup plus clair. Il consiste à enregistrer la surface recouverte de glace dans la région du golfe du Saint-Laurent quand elle est la plus étendue et à la diviser par la surface totale du golfe pour avoir un ratio entre 0 et 1.

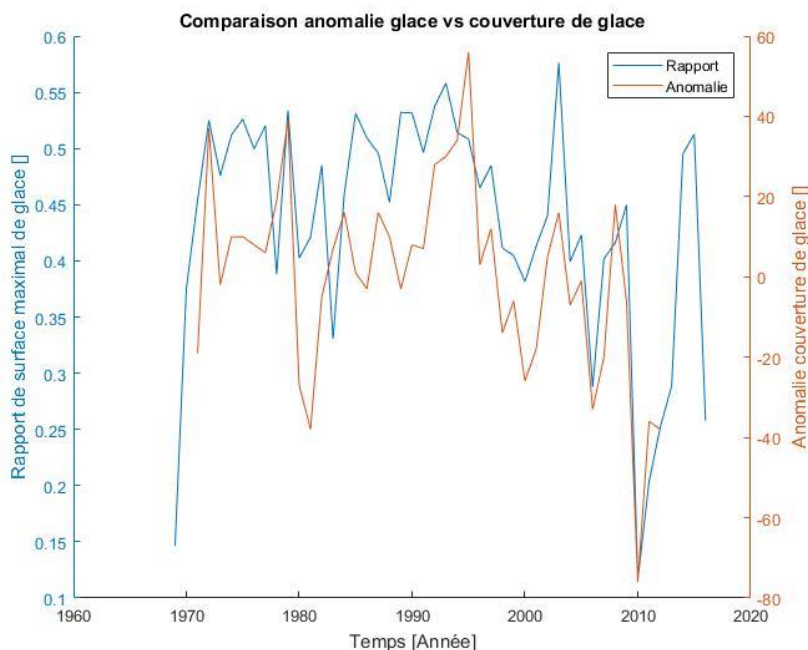


Figure 5 : Comparaison de l'anomalie avec la couverture de glace du golfe du Saint-Laurent

On constate que les données ont la même allure et on entrera donc dans le modèle celle du gouvernement Canadien.

Pour ce qui est de l'anomalie température de surface, aucune information n'est fournie par rapport à la manière dont elle est déterminée par le COSEPAC.

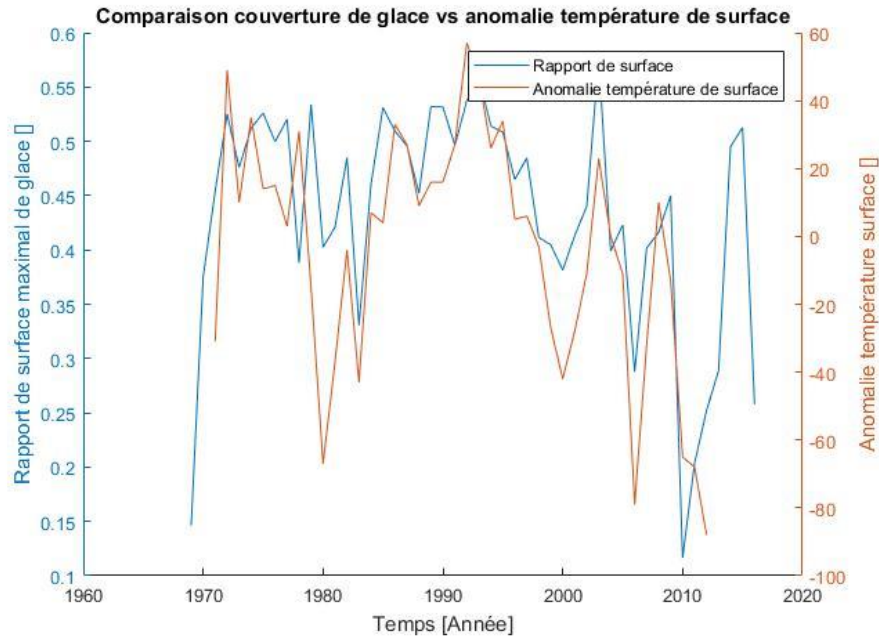


Figure 6 : Comparaison de l'anomalie de température de surface avec la couverture de glace du golfe du Saint-Laurent

Sur la figure 6 on peut remarquer que l'anomalie de température du COSEPAC et la surface recouverte de glace suivent les mêmes tendances. Le paramètre température de surface n'est donc pas intégré dans le modèle mais son impact devrait se faire ressentir au travers du facteur surface recouverte par la glace.

Pour ce qui est de la biomasse de hareng, on peut se référer au secrétariat canadien de consultation scientifique. Il fournit un document qui donne l'évolution du stock de hareng dans la zone de pêche 4T, qui est la zone dans laquelle vivent les bélugas qui nous intéressent(5). Il a estimé le stock reproducteur (4 ans et plus) sous forme de millier de tonne.

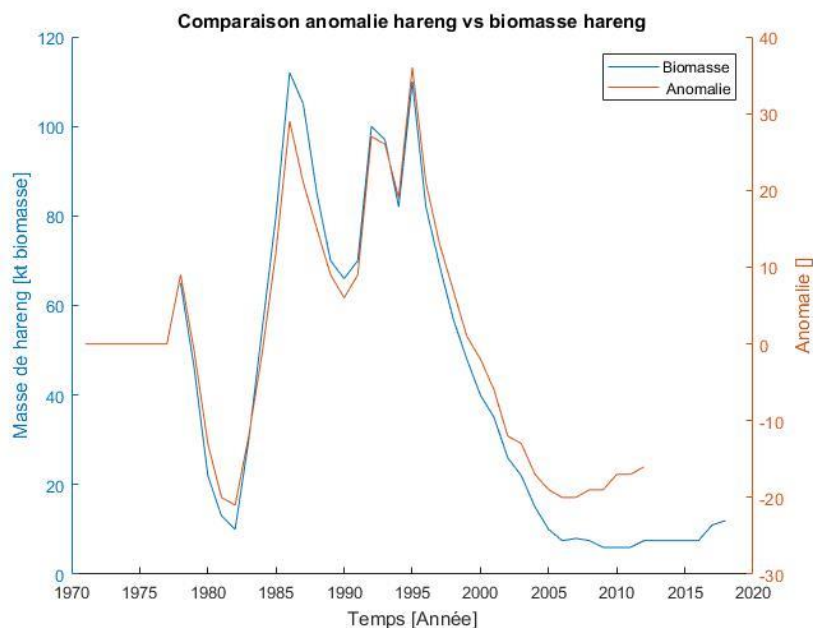


Figure 7 : Comparaison de l'anomalie du hareng avec la biomasse du hareng

Les deux courbes de la figure 7 sont similaires, il est possible qu'elles proviennent du même jeu de données, les données du secrétariat canadien de consultation scientifique (masse de hareng) seront donc utilisées dans le modèle.

Le jeu de donnée suivant est les poissons démersaux. Il n'a pas été possible toutefois de trouver comment ces données ont été produites dans l'article sur les bélugas et seront donc non utilisables. Toutefois il semble nécessaire d'ajouter au modèle des données sur les animaux démersaux car ils constituent une source d'alimentation importante pour les bélugas. C'est la morue qui a été choisie, elle est un poisson démersal présent dans le fleuve du Saint-Laurent et une estimation de sa population a été réalisée en 2006 par le secrétariat canadien d'évaluation scientifique, pour la zone 4T.

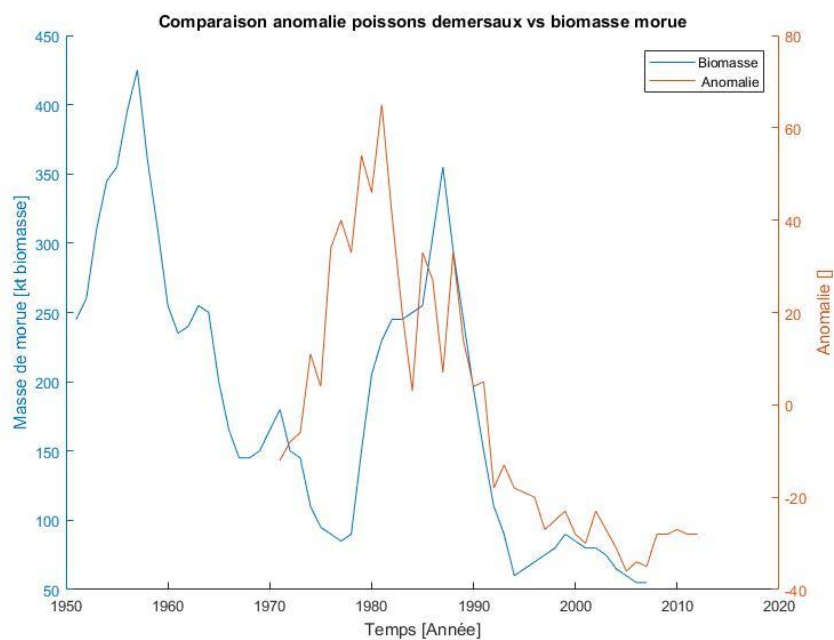


Figure 8 : Comparaison de l'anomalie des espèces démersales avec la biomasse de la morue

Sur la figure 8 on constate que la corrélation n'est pas parfaite entre l'anomalie des espèces démersale et la population de la morue, l'anomalie ayant été construite sur beaucoup d'espèces (5), c'est un point de critique du modèle d'autant que les mesures s'arrêtent en 2006 et qu'une extrapolation sera nécessaire.

Les dernières données introduites dans le modèle consistent en le nombre de béluga retrouvés échoué sur la plage, proviennent du COSEPAC et sont représentées sur la figure 9 (les adultes regroupent les individus jeunes et matures).

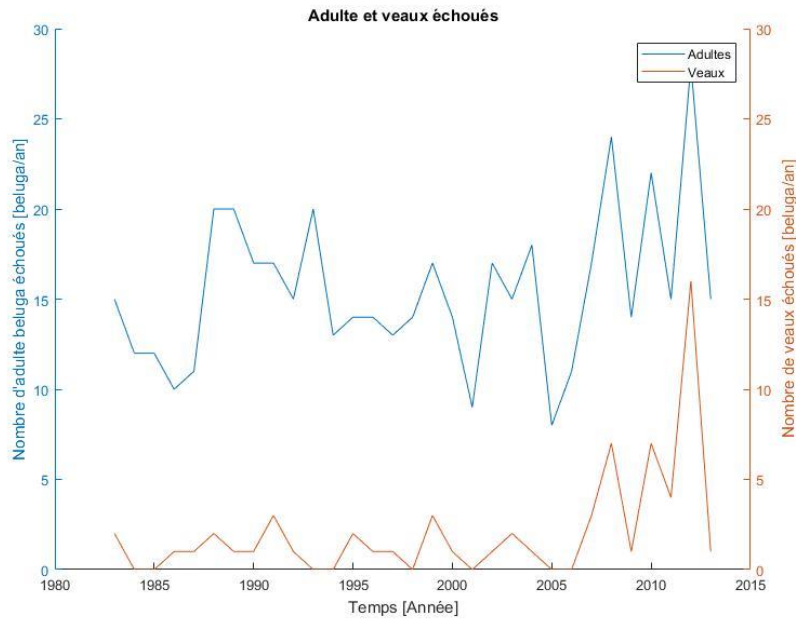


Figure 9 : Nombre de béluga retrouvés échoués par an sur les berges du Saint-Laurent

Dans le modèle on considère que les bélugas échoués ne sont pas décédés de cause « naturelle » et s'ajoutent donc à la mortalité. Un coefficient rentre en jeu parce qu'on ne retrouve pas nécessairement tous les bélugas échoués.

L'article du COSEPAC ajoutait que le taux de natalité des bélugas a augmenté en 2002. Le modèle prenait en compte cela en plus d'une mortalité variant au cours du temps. Cependant tout cela à été retiré par après car cela ne donnait pas de sens réel à la suite de l'optimisation de ces paramètres, il a donc été choisi un modèle plus explicatif bien qu'étant plus loin des données réelles.

Les données initiales sur la population des bélugas ont été elles aussi récoltées sur l'article du COSEPAC, y compris les proportions d'individus par tranche d'âge.

Pour ce qui est de la consommation moyenne de nourriture des bélugas, l'information à été trouvée sur internet(6).

Critique du modèle

Sera discuté ici les approximations, les limitations et ce qui pourrai être fait pour améliorer ou vérifier le modèle.

Le modèle se base sur des observations mais aussi sur des données issues de modèles statistiques. Ceux si contiennent une incertitude. Certaines données concernent parfois toute la zone 4T (fleuve et golfe du Saint-Laurent) qui ne reflète sans doute pas précisément ce qui se passe dans le fleuve Saint-Laurent où vivent les bélugas. Certaines données ont dû être extrapolées.

Seule la morue et le hareng ont été considérés comme source de nourriture, alors qu'un ensemble de crustacés et autre espèces démersales existent, et leurs stocks ne suivent pas nécessairement ceux de la morue et du hareng.

Il semble que la teneur en polluant et que des marrée d'algue ont un impact négatif sur les bélugas, le modèle n'en tiens pas compte. Plus généralement, le paramètre mortalité doit être vu comme la durée de vie d'un béluga en conditions optimales, toutefois toutes les conditions impactant cette valeur n'ont sans doute pas été comptabilisées dans le modèle et en plus certaines composante ne sont pas ramenée à la population (bélugas échoués).

N'ayant qu'un seul jeu de données provenant lui-même d'un modèle statistique pour la population de béluga, la calibration et la validation ont été réalisée en même temps. Cela ne permet pas de garantir une bonne robustesse du modèle. Il faudrait le confronter aux données dans 4 ans pour refaire une validation sur les 10 années qui ont suivi sa calibration (2012-2022) ou utiliser une partie du jeu de donnée de la calibration uniquement pour la validation. L'auteur ne s'en ai malheureusement rendu compte qu'après avoir calibré le modèle avec tout le jeu de donné. L'idéal aurait été de confronter le modèle à une autre population de béluga, cela est toutefois complexe car les autres populations vivent dans des endroits plus reculés, comme la baie de Hudson, où les données ne sont pas aussi accessibles voire existante. Les bélugas du Saint-Laurent sont un bon objet de travail car il n'y a pas de migration et le gouvernement local s'y intéresse, fournissant par la même occasion beaucoup de données accessibles. L'état réalise aussi des études sur la condition du fleuve comme la couverture de glace, etc... vu que cette région est importante pour les activités de l'homme (pêche, transport maritime...). Une population aurait peut-être pu être utilisée pour la validation, à savoir celle peuplant l'océan entre la Russie et le Japon bien qu'elle semble moins bien délimitée que celle vivant dans le Saint-Laurent.

Le modèle a besoin d'une sécurité pour éviter d'afficher une population de béluga négative dans les scénarios prédisant que la population soit réduite à 0. En effet, le nombre de béluga échoué ne varie pas avec la population et une fois à 0, le modèle considère toujours une certaine quantité de béluga qui s'échouent sur la plage. C'est sans doute une approximation qui pose des problèmes quand la population atteint une valeur fort différente de celle initiale et utilisée pour calibrer le modèle.

Le scénario optimal n'est pas très stable, en modifiant le nombre de béluga adulte échoué d'une seule unité on passe d'une croissance qui se comporte de manière exponentielle jusqu'à son maximum à une décroissance lente jusqu'à la disparition de la population, c'est encore une fois les bélugas échoués qui semblent poser un problème.

Annexes

Ci-joint 4 fichiers : OptimisationBeluga.m, ScenarioBeluga.m, funct.m et fminsearchbnd.m.

Le fichier fminsearchbnd.m provient d'internet et permet d'optimiser le modèle.

Le fichier OptimisationBeluga.m permet d'optimiser les paramètres et d'afficher les graphes sur les données.

Le fichier ScenarioBeluga.m permet de faire trois prédictions et de les représenter graphiquement.

Le fichier funct.m est l'équation différentielle du modèle.

Bibliographie

1. COSEPAC, Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. Béluga (*Delphinapterus leucas*) de l'estuaire du Saint-Laurent : évaluation et rapport de situation du COSEPAC 2014 [Internet]. aem. 2015 [cité 18 déc 2018]. Disponible sur: <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/registre-public-especes-peril/evaluations-rapports-situations-cosepac/beluga-population-estuaire-saint-laurent-2014.html>
2. fminsearchbnd, fminsearchcon - File Exchange - MATLAB Central [Internet]. [cité 20 déc 2018]. Disponible sur: <https://nl.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8277>
3. Secrétariat canadien de consultation scientifique. ÉVALUATION DU HARENG DE L'ATLANTIQUE [Internet]. [cité 18 déc 2018]. Disponible sur: http://publications.gc.ca/site/archivee-archived.html?url=http://publications.gc.ca/collections/collection_2018/mpo-dfo/fs70-6/Fs70-6-2018-029-fra.pdf
4. Canada E et C climatique. Graphique de la couverture maximale de glace pour le golfe du Saint-Laurent, de 1968 à 2016 [Internet]. aem. 2010 [cité 18 déc 2018]. Disponible sur: <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/previsions-observations-glaces/conditions-glaces-plus-recentes/climatologie/graphique-golfe-saint-laurent-1968-2016.html>
5. Plourde S, Galbraith P, Lesage V, Gregoire F, Bourdage H, Gosselin J-F, et al. Ecosystem perspective on changes and anomalies in the Gulf of St. Lawrence: a context in support of the management of the St. Lawrence beluga whale population. DFO CSAS Research Document. 1 janv 2014;2013/129:29 p.
6. Béluga, Bélouga, *Delphinapterus leucas*, mammifère marin, cétacé, monodontidés [Internet]. [cité 18 déc 2018]. Disponible sur: <http://www.faunaventure.org/animaux/belugas.html>