



## **Développements initiaux d'une PG empirique pour le listao de l'océan Indien**

*Préparé pour la Commission des Thons de l'Océan Indien*

*15 mai 2021*

Rapport préparé par:  
Charles T T Edwards

Pour toute information concernant le présent rapport, veuillez contacter l'auteur à:

CESCAPE Consultancy Services  
32 Waihoanga Road  
Otaki 5582  
New Zealand

Email: [cescapecs@gmail.com](mailto:cescapecs@gmail.com)  
Téléphone: +64-21-575879

**Rapport client CESCAPE**

Code projet du client MTF/INT/661/MUL (TFAA970097099)  
Nom du projet: Évaluation de la Stratégie de Gestion des pêches  
Date de fin du projet: 31 mai 2021  
Date du rapport: 15 mai 2021  
Préparé pour: Comité Technique sur les Procédures de Gestion de la CTOI – juin 2021

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>5</b>
1.1	Gestion actuelle .....	5
1.2	PG empiriques.....	6
1.2.1	Résultats en matière de gestion.....	7
1.2.2	Règles de contrôle des captures .....	7
1.2.3	Données d'entrée.....	10
<b>2</b>	<b>Cadre d'évaluation .....</b>	<b>12</b>
2.1	Modèles Opérationnels.....	12
2.2	Dimensions.....	13
2.3	Diagnostics .....	13
<b>3</b>	<b>Résultats .....</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Résumé et travaux ultérieurs .....</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>Remerciements .....</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>Références .....</b>	<b>21</b>
<b>A</b>	<b>Appendice.....</b>	<b>23</b>

## Contexte et objectifs du projet

En se basant sur les évaluations des simulations de règles d'exploitation candidates réalisées par Bentley et Adam (Adam et Bentley, 2013, Bentley et Adam, 2014a,b, 2015, 2016), étudiées et approuvées par le Groupe de Travail sur les Thons Tropicaux (GTTT), le Groupe de Travail sur les Méthodes (GTM) et le Comité Scientifique (CS), la CTOI a adopté la Résolution 16/02 « Sur des règles d'exploitation pour le listao dans la zone de compétence de la CTOI ». Elle décrivait la règle de contrôle d'exploitation (HCR) à utiliser pour établir la capture recommandée pour le listao (SKJ) et indiquait que sa première mise en œuvre se baserait sur l'évaluation du stock de 2017 convenue par le GTTT et approuvée par le CS. La mise en œuvre de la HCR pour soumettre une limite de capture recommandée pour 2018–2020 est décrite dans CTOI, 2017a. La Résolution demandait également un examen approfondi et une éventuelle modification de la HCR à réaliser en 2021 au plus tard.

En 2018, le GTM de la CTOI a noté que la HCR du listao n'est pas une Procédure de Gestion (PG) entièrement définie, étant donné que les données sous-jacentes requises et la méthodologie d'évaluation ne sont pas définies (CTOI, 2018b). En conséquence, le GTM a suggéré de procéder à l'examen et à une potentielle révision requis au titre de la Résolution 16/02 afin de déterminer une PG entièrement définie pour le listao. Cela a été noté par le CS en 2018 et est le motif et la base des travaux actuels (CTOI, 2018a).

Une PG entièrement définie est une PG testée par simulation, incluant au moins la spécification des données d'entrée, un algorithme de décision et des résultats en matière de gestion. Les tests nécessitent un Modèle Opérationnel (MO) associé pour décrire la dynamique de la ressource faisant l'objet de la gestion et la génération de données d'observation pour l'application itérée de la PG en avant dans le temps. Le rapport actuel décrit le développement d'une PG empirique qui est testée en utilisant le MO développé par Edwards (2020b). Les travaux précédents visant à une PG basée sur un modèle ont montré qu'un modèle de dynamique de la biomasse simple, sur lequel la PG pourrait être basée, pourrait ne pas fournir d'information sur l'épuisement du stock et le GTM a noté qu'une PG empirique pourrait être plus utile pour le SKJ (CTOI, 2021). Le présent rapport décrit les développements initiaux d'une PG empirique basée sur les données d'entrée de PUE des pêcheries de canneurs (PL) des Maldives et des senneurs sous objets flottants (PSLS) de l'Union Européenne.

## I Introduction

Afin qu'une Procédure de Gestion soit évaluée par simulation, elle doit être entièrement définie en termes de données d'entrée, d'algorithme de décision et de résultats en matière de gestion. L'algorithme de décision inclut une composante destinée à estimer l'état du stock, par exemple un modèle d'évaluation du stock qui pourrait fournir une estimation de l'épuisement. La conversion de l'état du stock en une mesure de gestion est réalisée via une règle de contrôle des captures (CCR) qui décrit une relation entre l'état du stock et soit la mortalité par pêche soit les captures. Si la mortalité par pêche est produite, elle doit être convertie en une capture cible à l'aide d'une estimation de la biomasse exploitable. L'algorithme de décision peut également contenir des méga-règles qui limitent l'ampleur du changement au cours de toute année donnée ou de circonstances exceptionnelles qui pourraient être étudiées pour invalider la PG (Punt et al., 2016).

En vertu de la Résolution 16/02, la pêcherie de listao de l'océan Indien est actuellement gérée à l'aide d'une CCR (ou règle de contrôle d'exploitation) qui est basée sur une estimation de l'état du stock et un taux d'exploitation cible qui fournissent tous deux les paramètres nécessaires pour définir la règle de contrôle et les données d'entrée de l'état du stock requises pour la mettre en œuvre.

Même si de considérables travaux de développement ont été réalisés, l'estimateur de l'état du stock n'est pas entièrement défini dans la Rés. 16/02 et ne peut donc pas être testé officiellement par simulation. Par exemple, de 2017 à 2020 des modifications ont été apportées aux données d'entrée et à la grille des scénarios d'évaluation de SS III. Des évaluations périodiques des « référentiels » de ce type ne peuvent pas, par nature, être définies a priori. Un estimateur de l'état du stock bien plus parcimonieux est nécessaire, comme un modèle de dynamique de la biomasse à deux ou trois paramètres. Ce type de modèle a été développé pour le patudo de l'océan Indien (Kolody et Jumpanen, 2020). Compte tenu de leur relative simplicité, ils peuvent être entièrement définis et donc testés. Un modèle de dynamique de la biomasse a été appliqué aux données de capture et d'abondance de l'évaluation de listao de 2017 et s'est révélé fournir des estimations de l'épuisement raisonnables (Edwards, 2020a). Toutefois, les indices d'abondance ont été, depuis lors, actualisés (Guery, 2020, Guery et al., 2020, Medley et al., 2020a,b), et ne sont plus informatifs pour l'estimation de l'épuisement avec ce type de modèle (CTOI, 2021). C'est pourquoi le GTM a noté qu'une approche empirique devrait être recherchée (CTOI, 2021).

Une PG empirique se base sur des modèles descriptifs et non sur des modèles basés sur des processus. Le présent rapport décrit le développement d'une PG de ce type, en se basant sur les indices de PUE des flottilles de PL et PSLS, qui sont régulièrement utilisés dans les évaluations du stock (Fu, 2017, 2020). La PG empirique est développée parallèlement à une PG de référence qui suppose des connaissances parfaites de la biomasse de la ressource. La comparaison entre les deux permet de démontrer l'utilité de l'approche empirique. Un résumé de la gestion actuelle est soumis dans un premier temps avant de décrire la PG empirique. Un ensemble de PG est proposé en se basant sur deux CCR différentes et testées à l'aide d'un modèle opérationnel SS III. Étant donné qu'il s'agit de la phase initiale des travaux, seules des évaluations simples sont réalisées en se basant sur la grille de scénarios à zone simple utilisée dans l'évaluation du stock la plus récente (Fu, 2020).

### I.1 Gestion actuelle

En se basant sur les travaux de Bentley et Adam (Adam et Bentley, 2013, Bentley et Adam, 2014a, b, 2015, 2016), la Résolution 16/02 a été adoptée en 2016 afin d'établir des quotas de captures pour le SKJ. Elle a été mise en œuvre en 2017 en vue d'établir une limite de captures recommandée de 470 029 tonnes pour la période 2018–2020 inclus, et plus récemment en 2020 pour recommander une limite de captures préliminaire de 513 572 tonnes pour 2019–2023 (Tableau 1).

En utilisant la terminologie de Bentley et Adam (2016), la règle de contrôle produit un multiplicateur d'intensité ( $I_y$ ) en tant que fonction de la biomasse du stock reproducteur ( $SSB_y$ ), à l'aide d'une relation linéaire à étapes :

$$I_y = \begin{cases} 1 & \text{for } SSB_y \geq SSB_{40\%} \\ \frac{SSB_y - SSB_{10\%}}{SSB_{40\%} - SSB_{10\%}} & \text{for } SSB_{10\%} < SSB_y < SSB_{40\%} \\ 0 & \text{for } SSB_y \leq SSB_{10\%} \end{cases} \quad (1a)$$

La multiplication de l'intensité par un taux d'exploitation cible donne le taux d'exploitation réalisé :

$$E_y = I_y \times E_{40\%} \quad (1b)$$

Le taux d'exploitation est défini comme la capture de la composante vulnérable (sélectionnée) de la biomasse (Section 2.1.3, Bentley et Adam, 2016). Toutefois, dans la règle de contrôle en elle-même, le taux d'exploitation est implicitement redéfini comme une proportion de la biomasse du stock reproducteur. Par conséquent, la capture recommandée est établie en utilisant la relation suivante:

$$C_{y+1:3} = I_y \times E_{40\%} \times SSB_y \quad (1c)$$

Les méga-règles supplémentaires suivantes ont également été approuvées :

- La limite de capture recommandée ne doit pas dépasser 900 000 tonnes ;
- Le changement de capture recommandé par rapport à l'année précédente ne doit pas dépasser 30% sauf si  $SSB_y \leq SSB_{10\%}$ , auquel cas  $C_{y+1:3}$  sera toujours zéro.

Les données d'entrée pour la règle de contrôle ( $SSB_{40\%}$ ,  $SSB_{10\%}$ , et  $E_{40\%}$ ) sont obtenues en tant que médianes des valeurs estimées d'après la grille des scénarios de l'évaluation de SS III de l'année où la règle de contrôle est appliquée. En 2017, il y avait 36 scénarios alternatifs du modèle d'évaluation dans la grille finale (Fu, 2017, CTOI, 2017b), produisant les valeurs des médianes incluses au Tableau 1a. Suite à la mise en œuvre de la règle de contrôle, la capture en 2018 s'élevait à environ 607 000 tonnes : 29% au-dessus de la limite de capture recommandée ; et en 2019, la capture se situait à 547 000 tonnes. Malgré ces captures élevées, l'évaluation du stock en 2020, composée de 24 grilles (Fu, 2020, CTOI, 2020a), a produit un état du stock positif (Tableau 1b).

## 1.2 PG empiriques

Les PG empiriques se basent sur des modèles descriptifs des données brutes plutôt que sur des modèles basés sur les processus appliqués aux PG basées sur un modèle. Par exemple, la longueur moyenne ou les récents changements de l'indice d'abondance fourniraient les informations nécessaires pour établir un quota de captures (par ex. Carruthers et al., 2016). Leurs principaux avantages sont qu'ils sont simples à comprendre, à appliquer et finalement à communiquer. Ils se prêtent également davantage à une évaluation exhaustive et malgré leur simplicité se sont avérés fonctionner correctement dans les deux tests de simulation (Geromont et Butterworth, 2015a,b) et les études d'observation à long terme (Breen et al., 2016).

Une procédure de gestion comporte trois éléments de base, à savoir les données d'entrée, l'algorithme de décision (incluant la règle de contrôle des captures) et les résultats en matière de gestion (Punt et al., 2016). Ils sont traités dans l'ordre inverse ici. D'autres éléments, comme les méga-règles ou les circonstances exceptionnelles qui pourraient invalider la PG sont réservés aux travaux ultérieurs et ne sont pas étudiés dans les analyses actuelles. Un glossaire des termes utilisés pour la description des PG est inclus au Tableau 2.

**Tableau 1:** Quantités déduites des évaluations du stock de listao de 2017 et 2020 utilisées par la règle de contrôle pour recommander des limites de captures préliminaires conformément à la Résolution 16/02. Les valeurs sont la médiane et les quantiles de 80% dans la grille des scénarios du modèle d'évaluation. Les captures et les valeurs de biomasse sont données en unités de 1 000 tonnes.

(a) Résultats de l'évaluation du stock de SKJ de 2017 Fu (2017), CTOI 2017b produisant une capture recommandée de 470 029 tonnes pour 2018 – 2020 (IOTC, 2017a, 2018a).

Quantity	Median	80% quantiles
$C_{40\%}$	510.1	(455.9 – 618.8)
$E_{2016}/E_{40\%}$	0.93	(0.70–1.13)
$C_{2016}/C_{40\%}$	0.88	(0.72–0.98)
$SSB_0$	2,015.2	(1,651.2–2,296.1)
$SSB_{2016}/SSB_{40\%}$	1.00	(0.88–1.17)
$SSB_{2016}/SSB_0$	0.40	(0.35–0.47)
$SSB_{2016}$	796.7	(582.7–1059.4)
$E_{40\%}$	0.59	(0.53–0.65)
$C_{2016}$	446.7	
$C_{2012–2016}$	407.5	
$C_{2018–2020}$	470.0	

(b) Résultats de l'évaluation du stock de SKJ de 2020 Fu (2020), CTOI 2020a produisant une limite de capture recommandée de 513 572 tonnes pour 2021.

Quantity	Median	80% quantiles
$C_{40\%}$	536.0	(462.0 – 674.5)
$E_{2019}/E_{40\%}$	0.92	(0.67–1.21)
$C_{2019}/C_{40\%}$	1.02	(0.81–1.18)
$SSB_0$	1,992.1	(1,691.7–2,547.1)
$SSB_{2019}/SSB_{40\%}$	1.11	(0.95–1.29)
$SSB_{2019}/SSB_0$	0.45	(0.38–0.50)
$SSB_{2019}$	870.5	(660.4–1,253.2)
$E_{40\%}$	0.59	(0.53–0.66)
$C_{2019}$	547.2	
$C_{2015–2019}$	506.6	
$C_{2021–2023}$	513.6	

**Tableau 2:** Glossaire des termes utilisés pour la description des PG.

Libellé	Description
$C_{y+1:3}$	Capture totale pour les années $y + 1$ à $y + 3$ recommandées par la CCR
$C_{\text{cible}}$	Capture cible pour l'application de CCR1
$C_{\text{TAC}}$	TAC précédent pour l'application de CCR2
$I_y$	Multiplicateur d'intensité de pêche dans l'année $y$
$a_y$	Moyenne des indices d'abondance log-normalisés PL et PSLs par an
$a_R, a_L$	Paramètres de réglage pour la CCR basée sur l'indice
$SSD_y$	Épuisement $SSB_y/SSB_0$
$SSD_R, SSD_L$	Paramètres de réglage pour la CCR basée sur la SSB

### 1.2.1 Résultats en matière de gestion

Dans une pêcherie de captures contrôlées, les PG empiriques doivent produire une capture. Étant donné que la biomasse du stock est inconnue, un résultat en matière de mortalité par pêche ne pourrait pas être converti en une capture à des fins de gestion.

### 1.2.2 Règles de contrôle des captures

Le calcul de la capture recommandée d'après les données d'entrée est réalisé via une règle de contrôle des captures. Dans le contexte actuel, la CCR calcule un multiplicateur d'intensité de pêche  $I_y$  qui représente une proportion de la valeur de capture connue ( $C^*$ ). Par analogie avec l'équation 1c, la capture recommandée est alors :

$$C_{y+1:3} = I_y \times C^*$$

Si un stock est dans des conditions raisonnables alors le choix de  $C^*$  peut être informé par les captures récentes et une PG peut être élaborée pour maintenir la capture et les taux de capture au

niveau ou au-delà des niveaux actuels via de légers ajustements de  $I_y$ . Les évaluations récentes du SKJ suggèrent que le stock est en bonne santé avec des captures actuelles proches de la capture cible estimée à  $SSB_{40\%}$  (Fu, 2017, 2020). Même si des préoccupations ont été exprimées quant au fait que ces captures ne pourraient pas être durables si les conditions environnementales changent (CTOI, 2020a), elles fournissent toutefois un point de départ indicatif pour la gestion.

Nous étudions ici des PG empiriques qui dépendent d'un indice ou d'indices d'abondance. Elles fournissent soit une tendance de l'abondance soit un état par rapport à une valeur d'indice préférée (position). La tendance ou la position sont utilisées pour ajuster  $I_y$ . Par exemple, une PG type basée sur la tendance calculera la pente ( $\lambda$ ) des récentes valeurs de l'indice et l'utilisera pour ajuster les captures à la hausse ou à la baisse :

$$I_y = 1 + \kappa \cdot \lambda$$

avec  $\kappa$  comme paramètre de réglage choisi lors du processus d'évaluation de la simulation. Une PG basée sur la position utilisera un indice d'abondance  $a_y$  par rapport à une valeur de référence  $a_R$  qui est perçue comme un taux de capture souhaitable pour le stock :

$$I_y = \frac{a_y}{a_R}$$

Si  $a_y > a_R$  alors la capture est augmentée, si  $a_y < a_R$  alors la capture est réduite. Des règles de ce type incluront généralement une limite inférieure  $a_L$  au-dessous de laquelle des mesures de gestion extrêmes sont prises (par ex. fermeture de la pêche):

$$I_y = \begin{cases} \frac{a_y - a_L}{a_R - a_L} & \text{for } a_y \geq a_L \\ 0 & \text{for } a_y < a_L \end{cases}$$

Une caractéristique des règles basées sur la position est qu'elles sont sensibles aux fluctuations de l'indice dues à l'erreur d'observation. Cela peut être amélioré en prenant la moyenne de  $(a_y - a_L)/(a_R - a_L)$  sur plusieurs années, ce qui est similaire à la façon dont une règle basée sur la tendance utilise les données récentes, et pas seulement l'indice actuel. Cela produit cependant un décalage qui peut potentiellement retarder la mesure de gestion appropriée (Hoshino et al., 2020). Une alternative consiste à modifier la règle en elle-même. Deux options sont envisagées ici.

Si une capture cible souhaitable est raisonnablement bien connue, alors un plateau à  $I_y = 1$  peut être inclus pour  $a_y > a_R$  afin de maintenir la capture proche de cette valeur, avec  $a_R$  choisi de sorte à être suffisamment bas pour assurer la stabilité de  $I_y$  et suffisamment élevé pour s'assurer qu'il est sensible aux réductions de l'abondance du stock. Il s'agit de la même forme fonctionnelle que l'Équation 1a. Toutefois si la capture cible souhaitable est bien moins connue, il est alors possible d'induire la stabilité en actualisant la capture de façon récursive en utilisant une moyenne pondérée :

$$I_y = \begin{cases} \theta + (1 - \theta) \cdot \left( \frac{a_y - a_L}{a_R - a_L} \right) & \text{for } a_y \geq a_L \\ \theta & \text{for } a_y < a_L \end{cases}$$

avec une valeur type  $\theta = 0,5$  (par ex. Carruthers et al., 2016, Hoshino et al., 2020). Ce type de règle augmente la capture pour  $a_y > a_R$  et réduit la capture pour  $a_y < a_R$ , évoluant progressivement vers un niveau où  $a_y \approx a_R$ .

Nous analysons ces deux types de règle de contrôle. Pour CCR1, nous supposons que la capture cible est connue d'après l'évaluation du référentiel de Fu (2020). Plus précisément,  $C_{CIBLE}$  est établie à un

quantile des valeurs de la capture cible ( $C_{40\%}$ ) estimées sur la grille des scénarios d'évaluation. La capture est alors :

**CCR1**

$$C_{y+1:3} = I_y \times C_{\text{TARGET}} \quad (2a)$$

L'intensité de pêche est ajustée en utilisant :

**CCR1 (index)**

$$I_y = \begin{cases} 1 & \text{for } a_y \geq a_R \\ \frac{a_y - a_L}{a_R - a_L} & \text{for } a_L < a_y < a_R \\ 0 & \text{for } a_y \leq a_L \end{cases} \quad (2b)$$

Pour les valeurs de  $a_L < a_y < a_R$ , l'intensité de pêche augmente de façon linéaire à  $I_y = 1$  à  $a_y = a_R$ , pour que  $C_{y+1:3} = C_{\text{CIBLE}}$ . La capture recommandée est constante pour les valeurs de  $a_y > a_R$ . Pour  $a_y < a_L$  la pêche est fermée. Lors des tests de simulation, une petite capture constante de 100 tonnes est ajoutée durant la fermeture de la pêche afin que les valeurs de l'indice continuent d'être simulées.

À des fins de comparaison, la règle équivalente d'« informations parfaites » est analysée, qui utilise l'épuisement connu ( $SSD_y$ ) du modèle opérationnel.

**CCR1 (SSB)**

$$I_y = \begin{cases} 1 & \text{for } SSD_y \geq SSD_R \\ \frac{SSD_y - SSD_L}{SSD_R - SSD_L} & \text{for } SSD_L < SSD_y < SSD_R \\ 0 & \text{for } SSD_y \leq SSD_L \end{cases} \quad (2c)$$

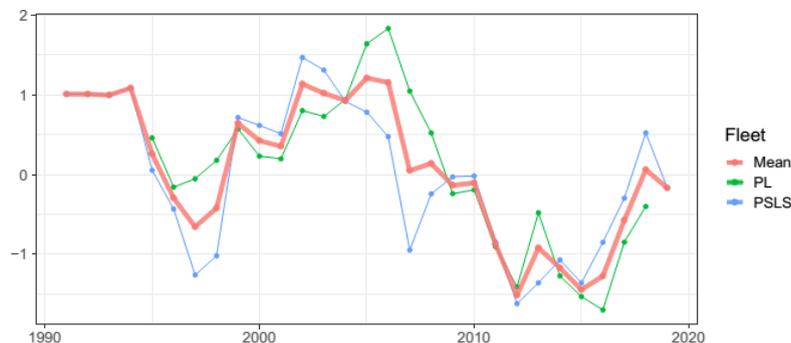
Pour CCR2, nous actualisons le TAC précédent afin de soumettre une nouvelle recommandation en appliquant l'approche moyenne pondérée :

**CCR2**

$$C_{y+1:3} = I_y \times C_{\text{TAC}} \quad (3a)$$

**CCR2 (index)**

$$I_y = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \times \left( \frac{a_y - a_L}{a_R - a_L} \right) & \text{for } a_y \geq a_L \\ 0.5 & \text{for } a_y < a_L \end{cases} \quad (3b)$$



**Figure 1** : Indices log-normalisés PL et PSLs annuels. La valeur moyenne des indices est utilisée comme donnée d'entrée  $a_y$  pour mettre en œuvre chaque PG.

qui inclut un multiplicateur d'intensité de pêche minimum  $I_y = 0,5$  à  $a_y < a_L$ . Une recommandation de captures constantes est obtenue à  $a_y = a_R$ , où  $I_y = 1$  et  $C_{y+1:3} = C_{\text{TAC}}$ . Toutefois, contrairement à CCR1, la

capture recommandée augmente au-dessus de la recommandation précédente pour les valeurs de  $a_y > a_L$ . Cela pourrait permettre à la règle d'exploiter potentiellement des niveaux de productivité du stock élevés mais probablement aux dépens de la stabilité des captures.

La règle équivalente d'« informations parfaites » est:

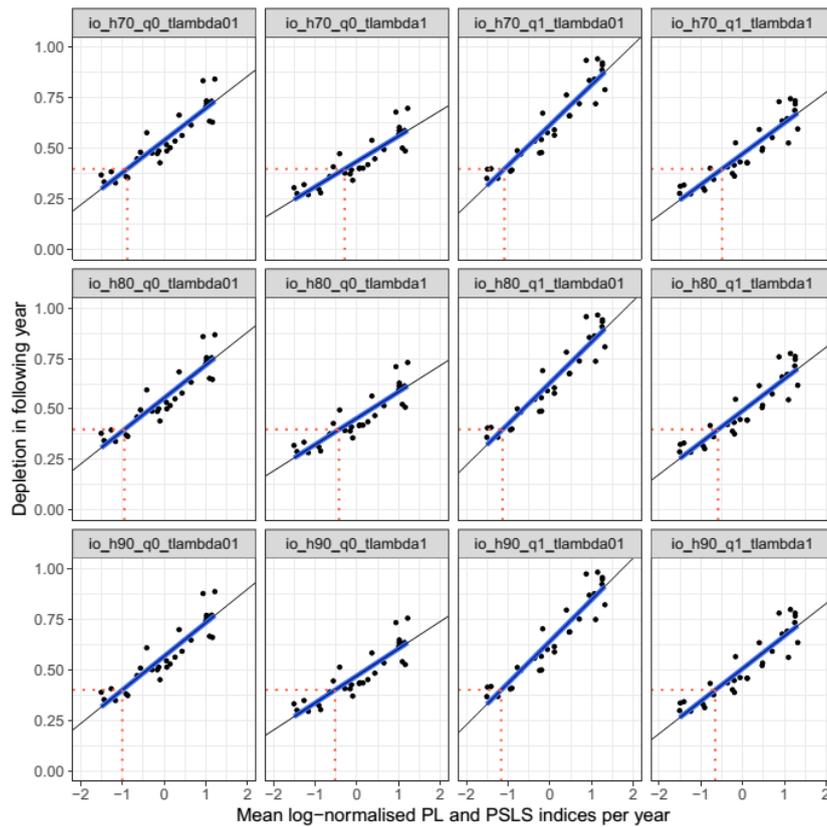
#### CCR2 (SSB)

$$I_y = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \times \left( \frac{SSD_y - SSD_L}{SSD_R - SSD_L} \right) & \text{for } SSD_y \geq SSD_R \\ 0.5 & \text{for } SSD_y < SSD_L \end{cases} \quad (3c)$$

En résumé, deux règles de contrôle des captures basées sur l'indice ont été proposées (CCR1 et CCR2), chacune avec des équivalences basées sur le  $SSD_y$  connu à des fins de comparaison. Pour que la CCR soit entièrement définie, les paramètres de réglage doivent être définis, dans ce cas les valeurs de  $a_R$  et  $a_L$ . Elles sont ensuite étudiées par rapport au calcul de la donnée d'entrée de CCR :  $a_y$ , y compris sa relation avec la SSB.

### 1.2.3 Données d'entrée

Afin d'informer le paramétrage des CCR, nous estimons la relation entre l'épuisement ( $SSD_y = SSB_y / SSB_0$ ) et l'indicateur d'état du stock de l'année antérieure  $a_{y-1}$ . L'indicateur d'état est calculé d'après les indices d'abondance log-normalisés PL et PSLs. Ils présentent des tendances similaires dans le temps (Figure 1), et nous calculons  $a_y$  comme la moyenne des deux indices log-normalisés sur les quatre saisons de l'année. En utilisant les résultats de l'évaluation du stock, nous pouvons tracer les relations entre  $a_{y-1}$  et l'épuisement au début de l'année suivante. Elles sont représentées à la Figure 2 pour les douze modèles SS III à zone simple répertoriés dans CTOI,2020a. D'après les ajustements de régression linéaire pour chaque scénario du modèle, nous pouvons estimer la valeur de  $a_{y-1}$  associée à différents niveaux d'épuisement. Les valeurs moyennes et minimum de  $a_{y-1}$  prélevées des scénarios sont répertoriées au Tableau 3. La liste complète des paramètres de régression figure au Tableau A1.



**Figure 2** : Relations entre les indices log-normalisés PL et PSL moyens de l'année et l'épuisement au début de l'année suivante, estimées d'après la grille des scénarios de l'évaluation du stock (Fu, 2020). Douze scénarios du modèle à zone simple sont représentés. La relation linéaire estimée est représentée en bleu, l'indice à  $SSB_{40\%}$  est représenté en rouge.

**Tableau 3** : Valeurs estimées pour  $a_{y-1}$  à différents niveaux d'épuisement (tableau de gauche), représentant les valeurs moyennes et minimum des scénarios (les régressions utilisées pour calculer ces valeurs sont représentées à la Figure 2 et la liste complète des paramètres par scénario est incluse au Tableau A1). Les valeurs minimum qui ont été utilisées pour élaborer des données d'entrée équivalentes pour les règles de contrôle basées sur la SSB et sur l'indice sont représentées au tableau de droite.

$SSD_y$	Mean $a_{y-1}$	Minimum $a_{y-1}$	SSB-based inputs	Index-based inputs
50%	-0.14	-0.68	$SSD_R = 0.5$	$a_R = -0.7$
40%	-0.77	-1.17	$SSD_R = 0.4$	$a_R = -1.2$
30%	-1.40	-1.65	$SSD_R = 0.3$	$a_R = -1.7$
20%	-2.03	-2.21	$SSD_L = 0.2$	$a_L = -2.2$
10%	-2.66	-2.81	$SSD_L = 0.1$	$a_L = -3.0$
0%	-3.29	-3.51	$SSD_L = 0.0$	$a_L = -5.0$

D'après les relations entre  $SSD_y$  et  $a_{y-1}$  nous pouvons calculer des valeurs équivalentes pour les règles de contrôle basées sur la SSB et sur l'indice. À titre d'exemple, pour CCR1 (SSB) nous pouvons analyser une règle de contrôle avec les valeurs de  $SSD_L = 0,1$  et  $SSD_R = 0,4$ . À l'aide des valeurs minimum répertoriées au Tableau 3 (pour que la règle de contrôle soit conservatrice), les données d'entrée équivalentes pour CCR1 (indice) sont  $a_L = -3,0$  et  $a_R = -1,2$ .

Pour CCR1, nous devons, en outre, choisir une valeur de capture cible  $C_{CIBLE}$ , que nous établissons aux quantiles de 10%, 30% et 50% de la distribution de  $C_{40\%}$  des scénarios du modèle. Ils s'établissent respectivement à 461 215, 481 523 et 521 638 tonnes. Au total, douze options de CCR1 ont donc été analysées. Pour CCR2, le TAC précédent est actualisé faisant suite à chaque application de la règle de

contrôle, en commençant à  $C_{TAC} = 513\,572$  tonnes en 2024. Quatre options de CCR2 seulement ont donc été analysées. En outre, des règles de contrôle de captures constantes (CCRO) ont été appliquées, en utilisant de nouveau les quantiles de 10%, 30% et 50% de  $C_{40\%}$ . Cela permet d'illustrer les avantages du contrôle de rétroaction. La liste complète des paramétrages des CCR figure au Tableau 4.

**Tableau 4:** Liste des définitions des CCR. Chaque PG est désignée par la CCR, les combinaisons de paramètres de réglage et les données d'entrée, par ex. CCR1A (indice) et CCR1A (SSB).

	CCRO		CCR1		CCR2	
	$C_{TARGET}$	$SSD_L (a_L)$	$SSD_R (a_R)$	$C_{TARGET}$	$SSD_L (a_L)$	$SSD_R (a_R)$
A	461.2	0.0 (-5.0)	0.3 (-1.7)	461.2	0.0 (-5.0)	0.4 (-1.2)
B	485.1	0.0 (-5.0)	0.3 (-1.7)	481.5	0.1 (-3.0)	0.4 (-1.2)
C	521.6	0.0 (-5.0)	0.3 (-1.7)	521.6	0.0 (-5.0)	0.5 (-0.7)
D		0.1 (-3.0)	0.3 (-1.7)	461.2	0.1 (-3.0)	0.5 (-0.7)
E		0.1 (-3.0)	0.3 (-1.7)	481.5		
F		0.1 (-3.0)	0.3 (-1.7)	521.6		
G		0.0 (-5.0)	0.4 (-1.2)	461.2		
H		0.0 (-5.0)	0.4 (-1.2)	481.5		
I		0.0 (-5.0)	0.4 (-1.2)	521.6		
J		0.1 (-3.0)	0.4 (-1.2)	461.2		
K		0.1 (-3.0)	0.4 (-1.2)	481.5		
L		0.1 (-3.0)	0.4 (-1.2)	521.6		

## 2 Cadre d'évaluation

Le cadre d'évaluation se basait sur un ensemble de modèles opérationnels de SS III (Methot Jr. et Wetzel, 2013, version 3.30.16.02), appelés dans **R** (Équipe de base chargé du développement de **R**, 2021) et en utilisant le progiciel **R** r4ss (Taylor et al., 2021). La justification de cette approche a été fournie par Edwards (2020b). Le code de référence développé pour la mise en œuvre du projet actuel est stocké dans <https://github.com/cttedwards/skj>.

### 2.1 Modèles Opérationnels

Les Modèles Opérationnels se basaient sur l'évaluation du stock de SKJ de Fu (2020), couvrant la période 1950-2019 inclus. L'évaluation incluait un grille de douze scénarios de SS III à zone simple, décrits dans CTOI,2020a. Les libellés par scénario sont répertoriés au Tableau 5. Le modèle à deux zones n'a pas été examiné. Les modèles ont été réajustés à des fins de validation, donnant les résultats résumés au Tableau 6 (pour comparaison avec le Tableau 1b).

**Tableau 5:** Liste des scénarios de l'évaluation SS III à zone simple utilisés comme modèles opérationnels, reproduits du Tableau 2 de CTOI,2020a.

Label	Steepnes ( $h$ )	Catchability trend	Tag likelihood weighting ( $\lambda$ )
io_h70_q0_tlambda01	0.7	1.0000	0.1
io_h70_q0_tlambda1	0.7	1.0000	1.0
io_h70_q1_tlambda01	0.7	1.0125	0.1
io_h70_q1_tlambda1	0.7	1.0125	0.1
io_h80_q0_tlambda01	0.8	1.0000	0.1
io_h80_q0_tlambda1	0.8	1.0000	0.1
io_h80_q1_tlambda01	0.8	1.0125	0.1
io_h80_q1_tlambda1	0.8	1.0125	0.1
io_h90_q0_tlambda01	0.9	1.0000	0.1
io_h90_q0_tlambda1	0.9	1.0000	0.1
io_h90_q1_tlambda01	0.9	1.0125	0.1
io_h90_q1_tlambda1	0.9	1.0125	0.1

**Écarts du recrutement :** Un modèle de série temporelle autorégressif (AR1) a été ajusté aux valeurs résiduelles logarithmiques du recrutement estimées par SS III pour la période 1983 à 2018. Le

recrutement pour 2019 a été estimé par le modèle en tant que paramètre libre. Les écarts du recrutement à partir de 2020 ont été générés en utilisant un processus de marche aléatoire autorégressive ajouté à l'échelle logarithmique. Des exemples d'écarts du recrutement sont indiqués à la Figure 3.

**Application de la capture :** La capture de 2020 a été définie par SS III comme étant égale à la mortalité par pêche cible par scénario estimée ( $C_{40\%}$ ). Le TAC de 2021 à 2023 a été fixé à 513 572 tonnes sur la base de la recommandation de CTOI,2020b. La PG a été utilisée par la suite pour établir la capture. Des écarts de capture annuels, multiplicatifs (erreurs de mise en œuvre) ont été générés d'après une distribution Gamma avec une moyenne de 1,10 et un écart type de 0,05. Une erreur de mise en œuvre positive a été supposée en raison du dépassement de captures du TAC observé en 2018 et 2019 (Fu, 2020).

**Observation :** La dernière année des données de PUE était 2019. Les observations futures ont été générées d'après les valeurs de la biomasse exploitable prédites par SS III et les capturabilités estimées. Des erreurs d'observation multiplicatives ont été estimées d'après les valeurs résiduelles logarithmiques des ajustements du modèle SS III et appliquées aux valeurs de l'indice simulé à l'aide de nombres aléatoires générés d'après une distribution log-normale. Pour les scénarios supposant une capturabilité constante, les erreurs d'observation avaient une moyenne de 1. Pour les scénarios avec une capturabilité ascendante (Tableau 5), il a été supposé que les erreurs d'observation de PSLs avaient une moyenne augmentant de 1,25% par an (Fu, 2020, CTOI, 2020a).

**Tableau 6:** Quantités déduites des douze évaluations utilisées dans l'application actuelle. Les captures et les valeurs de biomasse sont données en unités de 1 000 tonnes. Les valeurs sont les estimations de la médiane et du point de référence des quantiles de 80% estimées sur plusieurs scénarios du modèle avec SS III.

Quantity	Median	80% quantiles
$C_{40\%}$	521.8	(460.8 - 672.0)
$E_{2019}/E_{40\%}$	0.955	(0.69 - 1.20)
$C_{2019}/C_{40\%}$	1.049	(0.82 - 1.19)
$SSB_0$	1969.9	(1675.3 - 2555.6)
$SSB_{2019}/SSB_{40\%}$	1.14	(0.98 - 1.25)
$SSB_{2019}/SSB_0$	0.46	(0.39 - 0.50)
$SSB_{2019}$	879.3	(700.4 - 1252.3)
$E_{40\%}$	0.59	(0.53 - 0.64)
$C_{2019}$	547.2	

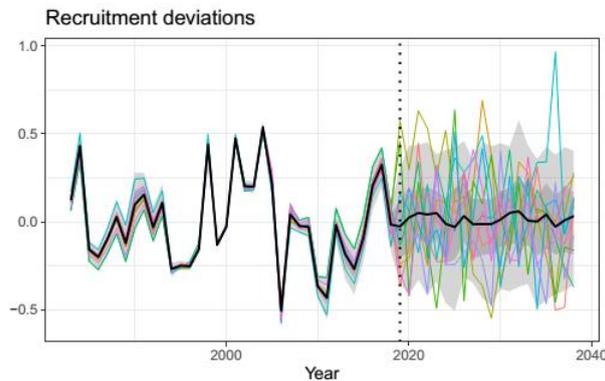
## 2.2 Dimensions

Au total, douze PG utilisant CCR1 et quatre PG utilisant CCR2 ont été testées (Tableau 4). Des scénarios équivalents basés sur la SSB et basés sur l'indice ont été exécutés pour chacune. Pour chaque PG, les variations des douze modèles opérationnels ont été projetées (Tableau 5), avec dix itérations stochastiques pour chacune. Afin de garantir la comparabilité des résultats de simulation parmi les PG appliquées à un scénario de modèle opérationnel particulier, les valeurs des écarts stochastiques et de l'erreur ont été générées pour chaque itération et ces mêmes valeurs par itération ont été appliquées à toutes les PG testées. Chaque simulation a projeté le stock en avant sur vingt ans, de 2020 à 2039 inclus, avec application de la PG tous les trois ans, en commençant en 2023 (pour établir la capture recommandée pour 2024 à 2026).

## 2.3 Diagnostics

Une liste des diagnostics avec lesquels comparer les PG a été obtenue de Bentley et Adam (2016). Ils

sont répertoriés au Tableau 7.



**Figure 3 :** Exemples de dynamique du recrutement des scénarios du modèle, utilisés pour évaluer différents paramètres de réglage pour CCR1 (indice). Les écarts du recrutement sont estimés par SS III entre 1983 et 2019, et présentent un schéma similaire sur tous les modèles. Le recrutement en 2019 n'est pas informé par les données et peut donc être considéré comme un paramètre libre. Les écarts du recrutement de 2020 à 2039 ont été simulés d'après un modèle autorégressif ajusté. Un échantillon d'itérations stochastiques est représenté.

**Tableau 7 :** Résultats des diagnostics pour les évaluations des PG. Chaque statistique de performance est générée en calculant tout d'abord la statistique récapitulative par scénario et l'itération sur les années de projection puis en reportant la médiane et les quantiles de 80% sur ces valeurs, sauf si la statistique est une probabilité, auquel cas elle est calculée en tant que proportion sur toutes les années de projection, scénarios et itérations simultanément.

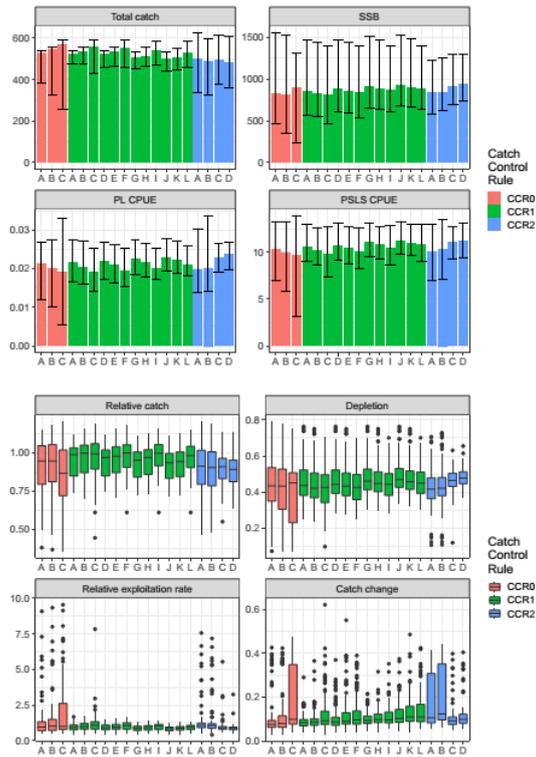
Performance Statistic	Description	Summary statistic
<b>Catch</b>		
C	Total catch	Mean
$C_{[PL]}$	Catch for PL fleet	Mean
$C_{[PSLS]}$	Catch for PSLS fleet	Mean
$C_{[PSFS]}$	Catch for PSFS fleet	Mean
$C_y/C_{40\%}$	Relative catch	Geometric mean
<b>Catch stability</b>		
Pr. $C_y = 0$	Closure	Probability
Pr. $> C_{y-1}$	Catch increase	Probability
Pr. $< C_{y-1}$	Catch decrease	Probability
$ C_{y+1}/C_y - 1 $	Catch change	Geometric mean
<b>Catch rate</b>		
$CPUE_{[PL]}$	CPUE for PL fleet	Geometric mean
$CPUE_{[PSLS]}$	CPUE for PSLS fleet	Geometric mean
<b>Exploitation rate</b>		
$F_y$	Exploitation rate	Geometric mean
$F_y/F_{40\%}$	Relative exploitation rate	Geometric mean
<b>Stock biomass</b>		
$SSB_y$	Stock biomass	Mean
$SSB_y/SSB_0$	Depletion	Geometric mean
$SSB_{MIN}/SSB_0$	Min. depletion	Minimum
Pr. $> SSB_{20\%}$	$SSB_y > SSB_{20\%}$	Probability
Pr. $> SSB_{10\%}$	$SSB_y > SSB_{10\%}$	Probability
<b>Kobe Quadrants</b>		
Pr. Red	$SSB_y < SSB_{40\%}$ and $F_y > F_{40\%}$	Probability
Pr. Green	$SSB_y > SSB_{40\%}$ and $F_y < F_{40\%}$	Probability

### 3 Résultats

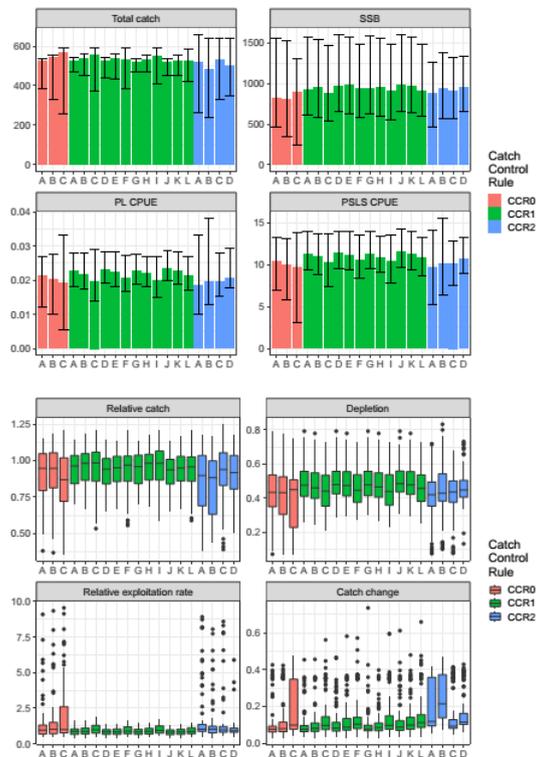
Les diagnostics récapitulatifs pour toutes les PG sont représentés aux Figures 4 et 5, pour les PG basées sur la SSB et sur l'indice respectivement. Les deux règles de contrôle de rétroaction (CCR1 et CCR2) semblent mieux fonctionner que la règle de captures constantes (CCR0), produisant des captures similaires mais avec moins de risques d'exploitation excessive. La performance des PG basées sur la SSB et sur l'indice est similaire, ce qui confirme l'utilité d'une règle basée sur l'indice. Toutefois, dans les deux cas, tout du moins pour les paramètres de réglage analysés ici, CCR1 semble supérieure, avec des captures plus élevées et moins variables pour des niveaux d'épuisement et d'exploitation équivalents. Cette différence entre CCR1 et CCR2 est plus frappante pour les règles basées sur l'indice : CCR2 ayant des captures plus variables et un plus grand risque de surexploitation (Figure 5 et Tableau A4).

Notant les paramétrages de réglage limités analysés, la supériorité apparente de CCR1 est démontrée de nouveau par les graphiques de compromis de la Figure 6. Pour des captures similaires, l'épuisement moyen est plus élevé, le taux d'exploitation est inférieur et les captures sont moins variables.

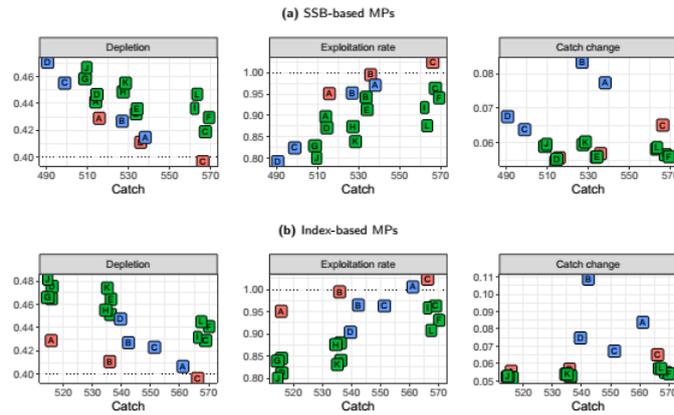
Dans les variations analysées pour CCR1, deux options sont sélectionnées pour un exposé plus détaillé, à savoir CCR1A et CCR1H, qui semblent toutes deux fonctionner correctement. Des histogrammes bidimensionnels sont représentés à la Figure 7, illustrant la façon dont les captures projetées correspondent à la règle de contrôle. Les règles équivalentes basées sur la SSB et sur l'indice sont également indiquées pour comparaison. Les captures recommandées se situent généralement sur le plateau de la règle, et les captures réelles dépassent légèrement la recommandation en raison de l'erreur de mise en œuvre. Le nombre d'itérations sur la pente de la règle est en particulier raisonnablement faible, concordant avec la stabilité des captures recommandée. Étant donné que le modèle opérationnel suppose une dynamique stable dans le temps, ceci est une fonctionnalité souhaitable. Les projections de la dynamique du modèle opérationnel avec CCR1A (indice) et CCR1H (indice) sont indiquées aux Figures 8 et 9. Finalement, l'ensemble complet de diagnostics est inclus au Tableau 8.



**Figure 4** : Résultats des diagnostics pour les PG basées sur la SSB (Tableau 7). Chaque PG est désignée par les définitions de la CCR du Tableau 4.



**Figure 5** : Résultats des diagnostics pour les PG basées sur l'indice (Tableau 7). Chaque PG est désignée par les définitions de la CCR du Tableau 4.



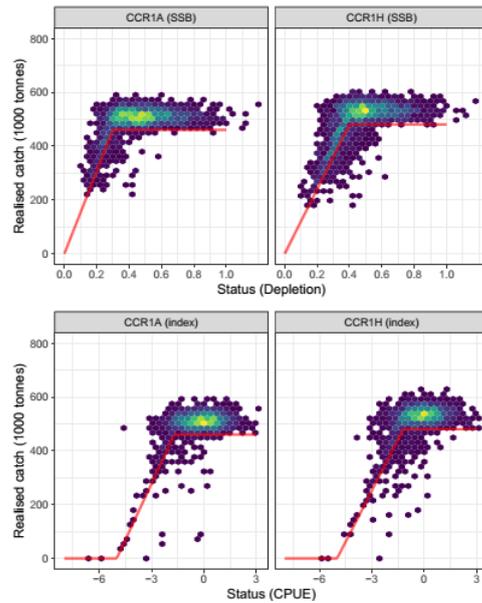
**Figure 6 :** Graphiques de compromis montrant la capture totale par rapport à : l'épuisement par rapport à  $SSB_0$ ; le taux d'exploitation par rapport à  $E_{40\%}$ ; et le changement de captures (voir Tableau 7). Les valeurs médianes des Tableaux A3 et A4 sont indiquées. Chaque PG est désignée par les définitions de la CCR du Tableau 4, avec CCRO en rouge, CCR1 en vert et CCR2 en bleu.

**Tableau 8 :** Résultats des diagnostics pour la comparaison des PG sélectionnées (voir le Tableau 4 pour la liste des définitions des PG et le Tableau 7 pour une description de chaque diagnostic). Les médianes et les quantiles de 80% sont indiqués pour chaque statistique des scénarios et itérations. Les probabilités sont calculées sur tous les scénarios, années et itérations simultanément.

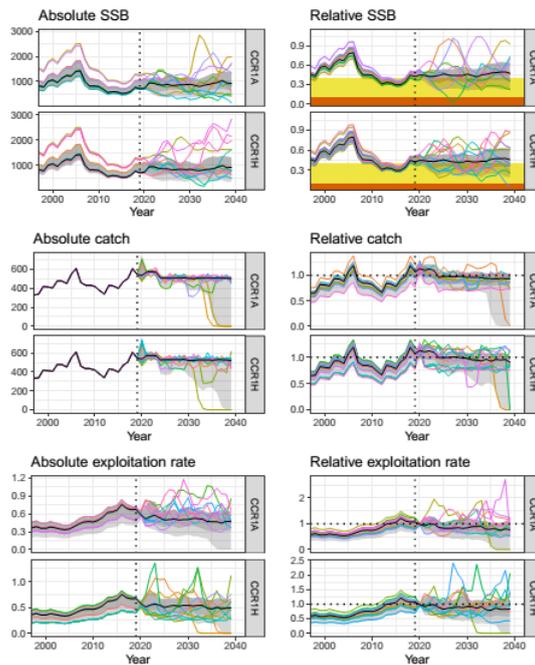
Statistic	CCR1A (SSB)	CCR1H (SSB)
C	521.4 (475.86 - 537.15)	512.79 (461.12 - 553.49)
$C_{[PI]}$	83.99 (77.34 - 86.65)	82.79 (75.36 - 88.74)
$C_{[PSLS]}$	200 (180.78 - 208.69)	197.11 (174.99 - 215.05)
$C_{[PSFS]}$	29.59 (27.13 - 31.43)	29.55 (26.38 - 32.32)
$C_y/C_{40\%}$	0.97 (0.76 - 1.07)	0.94 (0.78 - 1.04)
Pr. $C_y = 0$	0	0
Pr. $> C_{y-1}$	0.48	0.48
Pr. $< C_{y-1}$	0.52	0.52
$ C_{y+1}/C_y - 1 $	0.08 (0.06 - 0.13)	0.1 (0.07 - 0.16)
$CPUE_{[PI]}$	0.02 (0.02 - 0.03)	0.02 (0.02 - 0.03)
$CPUE_{[PSLS]}$	10.18 (8.53 - 12.68)	10.4 (9 - 12.33)
$F_y$	0.54 (0.33 - 0.73)	0.52 (0.33 - 0.65)
$F_y/F_{40\%}$	0.89 (0.57 - 1.22)	0.88 (0.59 - 1.1)
$SSB_y$	849.11 (571.13 - 1475.66)	881.9 (631.18 - 1474.45)
$SSB_y/SSB_0$	0.42 (0.32 - 0.58)	0.43 (0.35 - 0.57)
$SSB_{MIN}/SSB_0$	0.27 (0.15 - 0.4)	0.27 (0.18 - 0.38)
Pr. $> SSB_{20\%}$	0.97	0.98
Pr. $> SSB_{10\%}$	1	1
kobe_red	0.31	0.25
Pr. Green	0.57	0.58

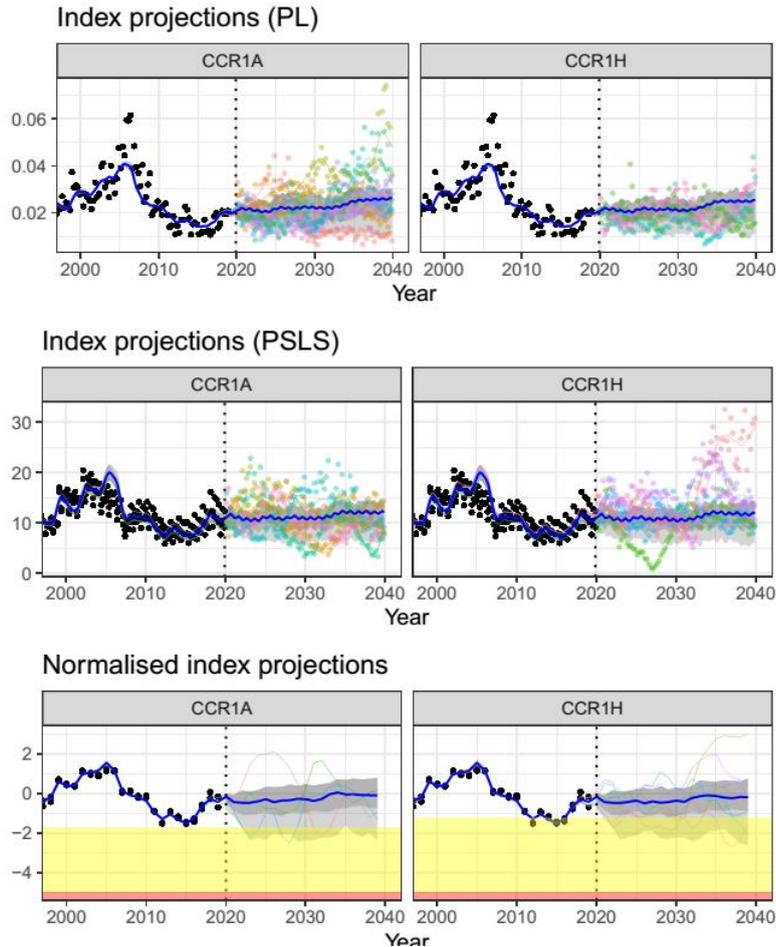
Statistic	CCR1A (index)	CCR1H (index)
C	523.65 (470.54 - 539.65)	532.96 (470.58 - 555.6)
$C_{[PI]}$	84.58 (76.93 - 86.95)	86.1 (77.09 - 89.47)
$C_{[PSLS]}$	201.09 (178.35 - 209.1)	204.84 (178.37 - 215.25)
$C_{[PSFS]}$	29.94 (26.98 - 31.54)	30.42 (27.02 - 32.55)
$C_y/C_{40\%}$	0.95 (0.75 - 1.09)	0.96 (0.75 - 1.09)
Pr. $C_y = 0$	0	0
Pr. $> C_{y-1}$	0.47	0.47
Pr. $< C_{y-1}$	0.53	0.53
$ C_{y+1}/C_y - 1 $	0.08 (0.05 - 0.17)	0.09 (0.06 - 0.19)
$CPUE_{[PI]}$	0.02 (0.02 - 0.03)	0.02 (0.02 - 0.03)
$CPUE_{[PSLS]}$	10.86 (8.93 - 13.34)	10.61 (8.72 - 12.8)
$F_y$	0.48 (0.29 - 0.73)	0.49 (0.3 - 0.74)
$F_y/F_{40\%}$	0.81 (0.48 - 1.17)	0.82 (0.52 - 1.18)
$SSB_y$	927.14 (615.41 - 1578.04)	959.87 (595.26 - 1553.33)
$SSB_y/SSB_0$	0.46 (0.34 - 0.6)	0.45 (0.33 - 0.59)
$SSB_{MIN}/SSB_0$	0.29 (0.16 - 0.41)	0.28 (0.16 - 0.4)
Pr. $> SSB_{20\%}$	0.98	0.98
Pr. $> SSB_{10\%}$	1	1
Pr. Red	0.26	0.27
Pr. Green	0.63	0.59



**Figure 7 :** Relation entre l'état du stock, mesuré soit par la SSB connue (panneau supérieur) soit par la PUE log-normalisée moyenne (panneau inférieur), et captures réalisées pendant la période de projection pour les PG : CCR1A et CCR1H. La CCR est indiquée à titre de référence dans chaque cas. Les couleurs représentent un histogramme bidimensionnel du nombre d'échantillons sur plusieurs années, itérations et scénarios du modèle de chaque catégorie. Les couleurs plus claires indiquent une plus grande fréquence des comptages.



**Figure 8 :** Dynamique suivant la projection avec CCR1A (indice) et CCR1H (indice). Un échantillon des itérations stochastiques est représenté avec les quantiles de 90% et de 50% ombrés en gris. Les valeurs relatives sont indiquées selon  $SSB_0$ ,  $C_{40\%}$  et  $E_{40\%}$  respectivement. Pour la SSB, les valeurs d'épuisement de 10-40% sont indiquées en jaune, et de 0-10% en rouge.



**Figure 9 :** Dynamique des indices suivant la projection avec CCR1A (indice) et CCR1H (indice). Un échantillon des itérations stochastiques est représenté avec les quantiles de 90% et de 50% ombrés en gris. Pour les indices standardisés, les valeurs des paramètres de réglage de  $a_L < a_Y < a_R$  sont indiquées en jaune et de  $a_Y < a_L$  en rouge.

#### 4 Résumé et travaux ultérieurs

Les travaux actuels ont proposé un ensemble de règles de contrôle empiriques pour application à la pêcherie de listao de l'océan Indien, en se basant sur les indices de PUE des pêcheries de PL des Maldives et de PSLS de l'Union Européenne. Deux formulations de règles de contrôle ont été analysées avec une règle linéaire à étapes, de forme similaire à la HCR actuelle, donnant les meilleurs résultats dans le cadre des tests limités réalisés. Le point le plus notable des résultats est que la règle basée sur l'indice peut fonctionner de manière similaire à une règle qui suppose de parfaites connaissances de la ressource, à condition que des paramétrages équivalents soient utilisés dans chacune. Cela justifie dûment les futurs développements d'une approche empirique.

Étant donné que ces travaux représentent une étape initiale vers une règle empirique, le degré des tests de simulation a été limité à la fois dans les paramétrages de la règle de contrôle et dans les configurations des MO analysés. Les MO actuels supposent un stock relativement stable et productif. Il est clair qu'un plus grand ensemble de MO devra être inclus pour s'assurer que les PG testées peuvent rétablir le stock dans des conditions moins favorables.

Il est également à noter que pour que la PG soit valide, la génération des indices de PL et de PSLS devrait être définie et maintenue à l'avenir.

## **5 Remerciements**

Je remercie Dan Fu (CTOI) pour avoir fourni les fichiers de SS III et m'avoir permis de mieux les comprendre. Iago Mosqueira (Wageningen Marine Research) a prêté son concours pour établir les calculs parallèles et Alistair Dunn (Ocean Environmental) a apporté un soutien informatique supplémentaire.

Ce projet a été financé par la CTOI sous le code de projet MTF/INT/661/MUL (TFAA970097099).

## 6 Références

- Adam, S., Bentley, N., 2013. Progress and arrangements for Management Strategy Evaluation work of Indian Ocean Skipjack Tuna. Final Research Report (IOTC-2013-WPTT15-42).
- Bentley, N., Adam, S., 2014a. Management procedure evaluation for the Indian Ocean skipjack tuna fishery: model description and conditioning. Final Research Report (IOTC-2014-WPM05-08).
- Bentley, N., Adam, S., 2014b. Management Strategy Evaluation for Indian ocean skipjack tuna: first steps. Final Research Report (IOTC-2014-WPTT16-39).
- Bentley, N., Adam, S., 2015. An operating model for the Indian Ocean skipjack tuna fishery. Final Research Report (IOTC-2015-WPTT17-35).
- Bentley, N., Adam, S., 2016. Management strategy evaluation for the Indian Ocean skipjack tuna Fishery. Final Research Report (IOTC-2016-WPM07-15 Rev 1).
- Breen, P.A., Bentley, N., Haist, V., Starr, P.J., Sykes, D.R., 2016. Management Procedures for New Zealand Rock Lobster Stocks. Management Science in Fisheries (Chapter 6).
- Carruthers, T.R., Kell, L.T., Butterworth, D.D.S., Maunder, M.N., Geromont, H.F., Walters, C., McAllister, M.K., Hillary, R., Levontin, P., Kitakado, T., Davies, C.R., 2016. Performance review of simple management procedures. ICES Journal of Marine Science 73, 464–482.
- Edwards, C.T.T., 2020a. Applications of a Bayesian biomass dynamic model to Indian Ocean Skipjack Tuna. Final Research Report (IOTC–2020–WPM11–09).
- Edwards, C.T.T., 2020b. Developments toward an MSE framework for Indian Ocean skipjack tuna using Stock Synthesis III. Final Research Report (IOTC–2020–WPM11–10).
- Fu, D., 2017. Indian Ocean Skipjack Tuna stock assessment 1950–2016 (Stock Synthesis). Final Research Report (IOTC–2017–WPTT19–47 Rev 1).
- Fu, D., 2020. Preliminary Indian Ocean Skipjack Stock Assessment (Stock Synthesis). Final Research Report (IOTC–2020–WPTT22(AS)–10).
- Geromont, H.F., Butterworth, D.S., 2015a. Complex assessments or simple management procedures for efficient fisheries management: a comparative study. ICES Journal of Marine Science 72, 262–274.
- Geromont, H.F., Butterworth, D.S., 2015b. Generic management procedures for data-poor fisheries: forecasting with few data. ICES Journal of Marine Science 72, 251–261.
- Guery, L., 2020. Standardized purse seine CPUE of skipjack in the Indian Ocean for the European fleet. Final Research Report (IOTC–2020–WPTT22(AS)–INF04).
- Guery, L., Aragno, V., Kaplan, D., M., G., Baez, J., Abascal, F., J., U., Marsac, F., Merino, G., Gaertner, D., 2020. Skipjack CPUE series standardization by fishing mode for the European purse seiners operating in the Indian Ocean. Final Research Report (IOTC–2020–WPTT22(DP)–12).
- Hoshino, E., Hillary, R., Davies, C., Satria, F., Sadiyah, L., Ernawati, T., Proctor, C., 2020. Development of pilot empirical harvest strategies for tropical tuna in Indonesian archipelagic waters: Case studies of skipjack and yellowfin tuna. Fisheries Research 227, 105539.
- IOTC, 2017a. Calculation of Skipjack catch limit for the period 2018-2020 using the harvest control rule adopted in Resolution 16/02. IOTC–2017–SC20-12 Rev 1.
- IOTC, 2017b. Rapport de la 19<sup>ème</sup> Session du Groupe de travail de la CTOI sur les Thons Tropicaux. Seychelles, 17– 22 octobre 2017. IOTC–2017–WPTT19–R[F].

- IOTC, 2018a. Rapport de la 21<sup>ème</sup> Session du Comité Scientifique de la CTOI Seychelles, 3– 7 décembre 2018. IOTC–2018–SC21–R[F].
- IOTC, 2018b. Rapport de la 9<sup>ème</sup> Session du Groupe de travail sur les méthodes de la CTOI Eden Island, Seychelles, 25-27 octobre 2018 IOTC–2018–WPM09–R[F].
- IOTC, 2020a. Rapport de la 22<sup>ème</sup> Session du Groupe de travail de la CTOI sur les Thons Tropicaux (Réunion d'évaluation des stocks) Réunion virtuelle 19 -23 octobre 2020 IOTC–2020–WPTT22(AS)–R[E] Rev1.
- IOTC, 2020b. Rapport de la 23<sup>ème</sup> Session du Comité Scientifique de la CTOI. IOTC–2020–SC23–R[F].
- IOTC, 2021. Rapport de la 12<sup>ème</sup> Session du Groupe de travail sur les méthodes de la CTOI (Task Force évaluation de la stratégie de gestion). Réunion virtuelle, 1-5 mars 2021 IOTC–2021–WPM12(DP)–R[F].
- Kolody, D., Jumppanen, P., 2020. A candidate Management Procedure based on a Joint Process and Observation Error Random Effects Production Model. Final Research Report (IOTC-2020-WPM11-13).
- Medley, P., Ahusan, M., Adam, S., 2020a. Addendum to IOTC-2020-WPTT22(DP)-11. Final Research Report (IOTC–2020–WPTT22(AS)–INF05).
- Medley, P., Ahusan, M., Adam, S., 2020b. Bayesian Skipjack and Yellowfin Tuna CPUE Standardisation Model for Maldives Pole and Line 1970-2019. Final Research Report (IOTC- 2020-WPTT22(DP)-11).
- Methot Jr., R., Wetzel, C., 2013. Stock synthesis: A biological and statistical framework for fish stock assessment and fishery management. *Fisheries Research* 142, 86–99.
- Punt, A.E., Butterworth, D.S., de Moor, C.L., De Oliveira, J.A.A., Haddon, M., 2016. Management strategy evaluation: best practices. *Fish and Fisheries* 17, 303–334.
- R Core Team, 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>. version 4.0.5.
- Taylor, I.G., Doering, K.L., Johnson, K.F., Wetzel, C.R., Stewart, I.J., 2021. Beyond visualizing catch-at-age models: Lessons learned from the r4ss package about software to support stock assessments. *Fisheries Research* 239, 105924. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2021.105924>.

## A Appendice

**Tableau A1.** Paramètres de régression de la relation entre les indices de PUE log-normalisés PL et PSL (a<sub>y-1</sub>) moyens et l'épuisement de la biomasse estimé l'année suivante (Figure 2). Les valeurs prévues pour a<sub>y-1</sub> sont indiquées pour différents niveaux d'épuisement, estimés d'après les paramètres de régression.

Model run	Intercept	Slope	Predicted a <sub>y-1</sub>					
			SSB 50%	SSB 40%	SSB 30%	SSB 20%	SSB 10%	SSB 0%
io_h70_q0_tlambda01	0.54	0.16	-0.26	-0.89	-1.51	-2.14	-2.77	-3.40
io_h70_q0_tlambda1	0.44	0.13	0.50	-0.30	-1.10	-1.89	-2.69	-3.49
io_h70_q1_tlambda01	0.62	0.20	-0.59	-1.09	-1.59	-2.10	-2.60	-3.10
io_h70_q1_tlambda1	0.48	0.15	0.16	-0.50	-1.15	-1.81	-2.47	-3.13
io_h80_q0_tlambda01	0.56	0.16	-0.34	-0.95	-1.57	-2.18	-2.79	-3.41
io_h80_q0_tlambda1	0.46	0.13	0.33	-0.43	-1.20	-1.96	-2.73	-3.50
io_h80_q1_tlambda01	0.63	0.20	-0.64	-1.13	-1.63	-2.12	-2.61	-3.11
io_h80_q1_tlambda1	0.49	0.16	0.05	-0.59	-1.23	-1.86	-2.50	-3.14
io_h90_q0_tlambda01	0.57	0.17	-0.40	-1.01	-1.61	-2.21	-2.81	-3.41
io_h90_q0_tlambda1	0.47	0.13	0.22	-0.53	-1.27	-2.02	-2.76	-3.51
io_h90_q1_tlambda01	0.64	0.21	-0.68	-1.17	-1.65	-2.14	-2.63	-3.11
io_h90_q1_tlambda1	0.51	0.16	-0.04	-0.66	-1.28	-1.90	-2.53	-3.15
Mean	0.53	0.16	-0.14	-0.77	-1.40	-2.03	-2.66	-3.29
Min.	0.44	0.13	-0.68	-1.17	-1.65	-2.21	-2.81	-3.51

**Tableau A2.** Résultats des diagnostics pour l'évaluation des PG de captures constantes (voir le Tableau 4 pour la liste des définitions des PG et le Tableau 7 pour une description de chaque diagnostic). Les médianes sont indiquées pour chaque statistique des scénarios et itérations. Les probabilités sont calculées sur tous les scénarios, années et itérations simultanément.

Statistic	CCR0A	CCR0B	CCR0C
C	527.05	542.81	566.35
C <sub>[PL]</sub>	84.99	87.76	91.42
C <sub>[PSLS]</sub>	201.74	208.50	214.75
C <sub>[PSFS]</sub>	30.23	31.15	32.50
C <sub>y</sub> /C <sub>40%</sub>	0.94	0.92	0.86
Pr. C <sub>y</sub> = 0	0.00	0.00	0.00
Pr. > C <sub>y-1</sub>	0.45	0.44	0.41
Pr. < C <sub>y-1</sub>	0.55	0.56	0.59
C <sub>y+1</sub> /C <sub>y</sub> - 1	0.08	0.08	0.10
CPUE <sub>[PL]</sub>	0.02	0.02	0.02
CPUE <sub>[PSLS]</sub>	9.85	9.62	9.18
F <sub>y</sub>	0.57	0.55	0.57
F <sub>y</sub> /F <sub>40%</sub>	0.92	0.97	0.94
SSB <sub>y</sub>	825.68	806.11	897.05
SSB <sub>y</sub> /SSB <sub>0</sub>	0.41	0.40	0.41
SSB <sub>MIN</sub> /SSB <sub>0</sub>	0.25	0.24	0.21
Pr. > SSB <sub>20%</sub>	0.90	0.86	0.79
Pr. > SSB <sub>10%</sub>	0.94	0.92	0.86
Pr. Red	0.39	0.43	0.46
Pr. Green	0.52	0.46	0.44

**Tableau A3.** Résultats des diagnostics pour l'évaluation des PG basées sur la SSB (voir le Tableau 4 pour la liste des définitions des PG et le Tableau 7 pour une description de chaque diagnostic). Les médianes sont indiquées pour chaque statistique des scénarios et itérations. Les probabilités sont calculées sur tous les scénarios, années et itérations simultanément.

Statistic	CCR1A	CCR1B	CCR1C	CCR1D	CCR1E	CCR1F	CCR1G	CCR1H	CCR1I	CCR1J	CCR1K	CCR1L	CCR2A	CCR2B	CCR2C	CCR2D
C	521.40	533.99	557.69	519.69	531.20	550.38	504.52	512.79	537.16	499.84	507.20	527.99	497.96	484.72	490.43	482.17
$C_{[PI]}$	83.99	85.97	90.25	83.73	85.67	88.48	81.15	82.79	86.55	80.27	81.90	85.40	79.96	78.93	79.45	78.23
$C_{[PSLS]}$	200.00	205.63	213.23	200.00	204.34	210.68	193.79	197.11	206.07	192.06	194.91	201.94	189.52	186.00	188.53	184.54
$C_{[PSFS]}$	29.59	30.50	31.94	29.51	30.36	31.72	28.86	29.55	31.06	28.59	29.18	30.59	29.33	28.66	28.32	27.92
$C_y/C_{40\%}$	0.97	0.98	0.96	0.94	0.95	0.93	0.92	0.94	0.97	0.90	0.91	0.94	0.89	0.88	0.89	0.87
Pr. $C_y = 0$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pr. $> C_{y-1}$	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.49	0.48	0.48	0.49	0.48	0.48	0.49	0.43	0.42	0.45	0.46
Pr. $< C_{y-1}$	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.51	0.52	0.52	0.51	0.52	0.52	0.51	0.57	0.58	0.55	0.54
$ C_{y+1}/C_y - 1 $	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.09	0.10
$CPUE_{[PI]}$	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
$CPUE_{[PSLS]}$	10.18	9.78	9.62	10.22	9.96	9.57	10.69	10.40	10.07	10.81	10.52	10.30	9.47	9.72	10.51	10.80
$F_y$	0.54	0.57	0.59	0.53	0.55	0.53	0.50	0.52	0.56	0.48	0.50	0.53	0.58	0.57	0.48	0.46
$F_y/F_{40\%}$	0.89	0.95	0.99	0.86	0.90	0.90	0.83	0.88	0.95	0.81	0.84	0.90	0.97	0.95	0.81	0.76
$SSB_y$	849.11	830.67	809.31	876.54	855.06	843.24	906.59	881.90	864.31	923.37	901.49	881.33	838.51	843.56	908.10	937.94
$SSB_y/SSB_0$	0.42	0.40	0.41	0.43	0.41	0.40	0.45	0.43	0.42	0.45	0.44	0.43	0.39	0.39	0.45	0.45
$SSB_{MIN}/SSB_0$	0.27	0.25	0.21	0.27	0.25	0.21	0.29	0.27	0.25	0.29	0.27	0.26	0.19	0.20	0.24	0.25
Pr. $> SSB_{20\%}$	0.97	0.95	0.90	0.97	0.96	0.92	0.99	0.98	0.96	0.99	0.99	0.97	0.89	0.89	0.95	0.96
Pr. $> SSB_{10\%}$	1.00	1.00	0.96	1.00	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	0.94	0.98	0.99
Pr. Red	0.31	0.35	0.38	0.28	0.32	0.33	0.22	0.25	0.31	0.19	0.22	0.26	0.39	0.36	0.26	0.23
Pr. Green	0.57	0.52	0.48	0.58	0.54	0.49	0.62	0.58	0.52	0.64	0.60	0.55	0.45	0.48	0.59	0.62

**Tableau A4.** Résultats des diagnostics pour l'évaluation des PG basées sur l'indice (voir le Tableau 4 pour la liste des définitions des PG et le Tableau 7 pour une description de chaque diagnostic). Les médianes sont indiquées pour chaque statistique des scénarios et itérations. Les probabilités sont calculées sur tous les scénarios, années et itérations simultanément

Statistic	CCR1A	CCR1B	CCR1C	CCR1D	CCR1E	CCR1F	CCR1G	CCR1H	CCR1I	CCR1J	CCR1K	CCR1L	CCR2A	CCR2B	CCR2C	CCR2D
C	523.65	539.18	556.22	523.23	533.86	532.88	520.55	532.96	546.47	516.11	525.49	524.82	518.95	476.70	529.05	502.99
$C_{[P_L]}$	84.58	86.94	89.52	84.29	86.05	85.99	83.87	86.10	88.48	83.36	84.51	85.24	83.04	77.45	85.34	81.65
$C_{[PSLS]}$	201.09	207.08	213.30	200.84	204.25	203.73	200.17	204.84	210.08	198.38	201.74	201.26	196.17	180.87	202.01	191.97
$C_{[PSFS]}$	29.94	30.77	32.04	29.68	30.44	30.38	29.58	30.42	31.60	29.46	30.03	30.17	29.99	28.67	30.50	29.71
$C_y/C_{40\%}$	0.95	0.94	0.93	0.90	0.88	0.83	0.95	0.96	0.93	0.90	0.89	0.86	0.86	0.71	0.92	0.89
Pr. $C_y = 0$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pr. $> C_{y-1}$	0.47	0.47	0.46	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.42	0.40	0.45	0.47
Pr. $< C_{y-1}$	0.53	0.53	0.54	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.58	0.60	0.55	0.53
$ C_{y+1}/C_y - 1 $	0.08	0.08	0.10	0.08	0.09	0.14	0.08	0.09	0.10	0.09	0.10	0.14	0.12	0.22	0.09	0.12
$CPUE_{[P_L]}$	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
$CPUE_{[PSLS]}$	10.86	10.60	9.96	10.93	10.64	10.20	10.86	10.61	10.13	11.10	10.83	10.23	9.18	9.48	9.77	10.04
$F_y$	0.48	0.48	0.49	0.44	0.44	0.37	0.47	0.49	0.52	0.44	0.45	0.41	0.56	0.52	0.55	0.49
$F_y/F_{40\%}$	0.81	0.81	0.82	0.75	0.77	0.64	0.81	0.82	0.85	0.75	0.75	0.69	0.97	0.88	0.93	0.83
$SSB_y$	927.14	950.59	877.85	967.89	980.77	940.01	936.45	959.87	910.05	981.56	975.20	914.27	879.84	931.94	913.61	954.19
$SSB_y/SSB_0$	0.46	0.45	0.42	0.47	0.46	0.42	0.46	0.45	0.42	0.47	0.46	0.44	0.39	0.40	0.41	0.43
$SSB_{MIN}/SSB_0$	0.29	0.27	0.21	0.29	0.28	0.21	0.30	0.28	0.21	0.30	0.28	0.22	0.18	0.16	0.22	0.21
Pr. $> SSB_{20\%}$	0.98	0.97	0.92	0.98	0.97	0.94	0.98	0.98	0.94	0.99	0.98	0.96	0.85	0.87	0.90	0.93
Pr. $> SSB_{10\%}$	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	0.91	0.92	0.94	0.98
Pr. Red	0.26	0.29	0.36	0.22	0.25	0.31	0.24	0.27	0.35	0.20	0.22	0.28	0.42	0.36	0.38	0.29
Pr. Green	0.63	0.57	0.48	0.65	0.61	0.52	0.63	0.59	0.49	0.67	0.63	0.52	0.43	0.45	0.48	0.53