

4.2 Échantillonnage des prises, de l'effort, de la CPUE et de la taille

En principe, il existe deux méthodes de collecte des données : le dénombrement complet et l'échantillonnage. En général, une étude-cadre ou un recensement de la pêcherie se réalise en effectuant un dénombrement complet de la population. Cette technique est idéale pour estimer les prises totales annuelles, mais dépasse d'habitude le budget de la plupart des centres de recherche des pêcheries. Il faut par conséquent appliquer un système d'échantillonnage approprié de sorte à obtenir des données représentatives qui peuvent être extrapolées à l'ensemble de la pêcherie. La **Figure 4.2.1** montre une représentation schématique du processus qui peut se produire lors de l'évaluation des niveaux de prises pour les données de Tâche 1.

Cette section aborde brièvement les aspects statistiques et pratiques des différentes modalités d'échantillonnage des pêcheries de thonidés et des poissons dans le but d'estimer des statistiques résumées concernant l'ensemble des débarquements, l'effort de pêche et la taille ainsi que d'autres caractéristiques biologiques des poissons. La section 4.2.1 est un guide de la théorie d'échantillonnage de base dans le contexte des pêcheries de thonidés. La section 4.2.2 décrit et commente des plans habituels d'échantillonnage statistique et la section 4.2.3 aborde la précision d'échantillonnage. La section 4.2.4 revient à des questions plus pratiques. Elle récapitule les principales sources d'information différentes sur les stocks et les pêcheries de thonidés en attirant l'attention sur leurs points forts et sur leurs points faibles et suggère des solutions pratiques pour effectuer l'échantillonnage et l'estimation conformément à la discussion statistique antérieure. La section 4.2.5 présente les problèmes potentiels que peuvent poser les statistiques des prises annuelles totales et leurs solutions éventuelles. Enfin, la section 4.2.6 aborde l'extrapolation des estimations des échantillons aux estimations pour une flottille complète ou pour un stock de poissons dans une strate spatio-temporelle standard de l'ICCAT, par exemple $5^{\circ} \times 5^{\circ} \times \text{mois}$, $1^{\circ} \times 1^{\circ} \times \text{mois}$.

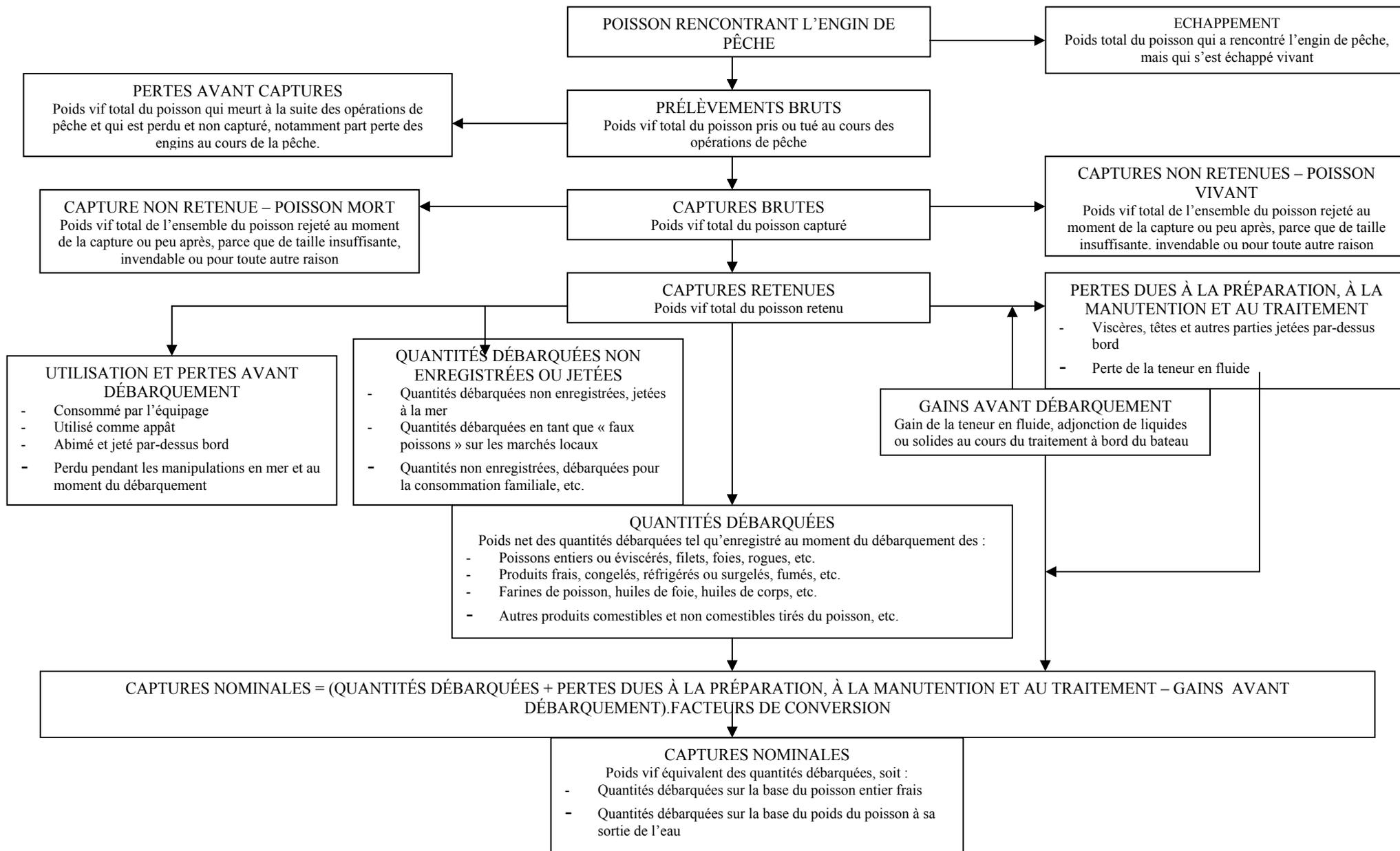


Figure 4.2.1. Concepts relatifs à l'estimation des captures nominales. Diagramme explicatif.

4.2.1 Notions de base de l'échantillonnage

Échantillonnage scientifique

L'échantillonnage est essentiel lorsque nous souhaitons décrire ou faire des inférences sur une population qui est trop grande pour permettre l'observation de chaque individu qui en fait partie. L'échantillonnage scientifique exige l'existence d'un rapport entre la population et l'échantillon. Il existe à cet effet deux théories (Thompson, 1992) :

- L'échantillonnage basé sur un plan qui consiste en une règle probabiliste visant à sélectionner les individus à observer ; par exemple, l'échantillonnage aléatoire simple.
- L'échantillonnage basé sur un modèle dans lequel la population est un concept hypothétique basé sur un modèle mathématique dont les paramètres sont estimés à partir des individus observés ; le modèle inclut des erreurs aléatoires, e ; exemple : $Age = f(Taille) + e$.

L'échantillonnage basé sur un plan permet d'estimer des statistiques descriptives comme la moyenne, la variance et les distributions de fréquence en l'absence de postulats sur la population. Ces statistiques sont non-biaisées par le plan, c'est-à-dire qu'on s'attend à ce qu'elles se situent autour de la valeur vraie lors d'un échantillonnage répété en vertu du plan d'échantillonnage probabiliste. Par contre, l'échantillonnage basé sur un modèle permet d'ajuster le modèle en l'absence de postulats sur l'échantillonnage. Les paramètres estimés sont non-biaisés par le modèle, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas biaisés si le modèle est vrai et complet.

Dans la pratique, ces deux philosophies exigent de faire des compromis étant donné que l'échantillonnage de probabilité est rarement idéal et qu'aucun modèle ne fait jamais l'objet d'une confiance totale (Burnham et Anderson, 2002). Ceci dit, un échantillon aléatoire permet d'habitude d'ajuster un modèle, tandis qu'un échantillon pris pour optimiser l'ajustement d'un modèle risque d'être biaisé et inefficace pour estimer des statistiques descriptives. En outre, le plan d'échantillonnage reste plus ou moins sous le contrôle de l'échantillonneur en fonction des contraintes pratiques, tandis que la connaissance partielle des importantes variables indépendantes requises pour modéliser une pêcherie sans biais est probablement difficile à rectifier pour un modélisateur. Bien que la modélisation soit un important outil de recherche pour la science halieutique, quand il s'agit de collecter des statistiques de base sur les pêcheries de thonidés, on préconisera une approche basée sur un plan qui se fonde sur la meilleure approximation pratique à un schéma d'échantillonnage de probabilité.

La population

La population à échantillonner et la nature de chacun de ses membres, appelés *unités d'échantillonnage*, doivent être soigneusement examinées avant d'établir un schéma d'échantillonnage de la pêcherie parce qu'il est probable que la *population observable*¹ soit un sous-ensemble de la *population étudiée*. Pour les études d'une flottille de pêche, la population étudiée peut comprendre tous les bateaux de la flottille, mais la population observable peut se limiter aux bateaux qui sont accessibles dans les ports environnants. Pour les études biologiques, la population étudiée peut comprendre tous les poissons du stock, mais la population observable peut se limiter à la part accessible des débarquements totaux du stock. Sachant qu'il n'est pas possible d'échantillonner la population étudiée, il faut postuler un lien entre celle-ci et la population observable. Pour les flottilles de pêche, par exemple, l'hypothèse selon laquelle la partie non observée de la flottille se comporterait de la même façon que la partie observable fournirait le lien en question et n'exigerait qu'un facteur d'extrapolation pour convertir les estimations de l'étude en estimations de la population étudiée. Pour l'échantillonnage biologique, les débarquements observables, L , peuvent être mis en rapport avec le stock, W , par une fonction de capturabilité, q , de la taille, l , et de l'effort de pêche, E :

$$L_l = q(l).E.W_l$$

Un tel modèle postule que la pêche est aléatoire par rapport aux poissons (Hilborn et Walters, 1992, p. 177). Dans les deux exemples, les postulats sont forts et peuvent susciter la controverse. La population étudiée, le sous-ensemble observable et le lien postulé entre ceux-ci doivent être établis de façon explicite dans n'importe

¹ La « population observable » est considérée comme un terme plus explicite que le « cadre d'échantillonnage » de la théorie d'échantillonnage.

quel rapport d'échantillonnage. Dans le texte qui suit, le mot « observable » désignera, si ce n'est pas déjà indiqué, la « population ».

Randomisation (tirage au hasard)

Les statisticiens préconisent la sélection aléatoire d'unités d'échantillonnage de sorte que l'estimation des paramètres pour la population puisse être justifiée par la théorie de probabilité. Ceci est cependant souvent très difficile à réaliser dans la pratique. Les mérites de la défense de la randomisation (des tirages aléatoires) peuvent être expliqués de façon intuitive de la manière suivante. Considérons la tâche relativement simple que représente l'estimation de la taille moyenne des poissons dans les débarquements d'un bateau de pêche en utilisant l'échantillonnage aléatoire simple. La constitution des débarquements aura été affectée par de nombreuses influences telles que les lieux de pêche, la saison, le temps, l'équipage qui aura sélectionné les prises, etc. Si l'échantillon est prélevé dans un lieu restreint parmi l'ensemble des débarquements, il ne pourra refléter qu'une partie d'une ou de quelques opérations de pêche réalisées dans des circonstances limitées et, par conséquent, la taille moyenne de cet échantillon pourra être très différente de la taille moyenne (inconnue) de l'ensemble des débarquements. En outre, la variabilité au sein d'un échantillon restreint sera probablement plus faible que dans cet ensemble, ce qui signifie que la variance et les limites de confiance autour de la moyenne estimée seront sous-estimées et donneront une fausse impression de précision. En échantillonnant les poissons autant que possible dans des lieux choisis de façon aléatoire dans la totalité de la population ciblée, on peut s'attendre à ce que les facteurs influençant la taille des poissons présents auront les mêmes effets proportionnels sur l'échantillon. En termes statistiques, le tirage aléatoire fournit des estimations non-biaisées (par le plan) de la moyenne et de la variance. La section 4.2.4 examine la façon d'obtenir les conditions les plus proches de l'échantillonnage au hasard dans différentes situations pratiques.

Information

L'échantillonnage de la pêche étant généralement une opération coûteuse, il est vital de recueillir et de conserver toutes les informations possibles pour chaque unité d'échantillonnage. L'information qu'une seule unité d'échantillonnage peut apporter sur la population dépend :

- Du nombre de variables mesurées dans l'unité d'échantillonnage. Ainsi, on peut mesurer à la fois la taille, l'âge et la maturité sur chacun des poissons issus d'une prise, même si la taille est souvent la seule variable facilement disponible.
- Des liens entre ces variables. Par exemple, la maturité du poisson est associée à l'âge. Les valeurs observées des différentes variables doivent être « emmagasinées » ensemble et analysées comme étant un vecteur pour chaque unité d'échantillonnage de sorte à conserver ces liens, par exemple, à des fins de modélisation. Si ce n'est pas le cas, ces informations seront perdues.
- De la précision de la mesure. Cette question est plus importante pour certaines variables que pour d'autres. Par exemple, l'effort de pêche est difficile à mesurer sur un certain type de bateau ; le stade de maturité peut être difficile à déterminer de façon précise pour un poisson. Idéalement, la précision des mesures sera estimée dans les cas difficiles par différentes personnes qui prendront des mesures indépendantes des mêmes variables sur la même série d'unités d'échantillonnage. Une grande variance des mesures peut annuler les vertus d'un plan d'échantillonnage réalisé avec des moyens coûteux et beaucoup d'efforts.
- Du fait que l'unité d'échantillonnage a été choisie de façon aléatoire ou suite à une sélection consciente. Dans ce dernier cas, certaines des informations fournies par l'unité d'échantillonnage font référence à la méthode de sélection, c'est-à-dire au biais, et non à la population. Une estimation est « non biaisée » si la moyenne obtenue après de nombreuses répétitions de l'échantillonnage est égale à la valeur vraie de la population. Le biais n'est pas nécessairement mauvais s'il est constant et il s'agit souvent d'un postulat nécessaire dans les études halieutiques.
- De la variance, σ^2 , des unités d'échantillonnage dans la population ; l'information fournie par une unité d'échantillonnage est proportionnelle à $1/\sigma^2$. σ^2 est estimée par la variance de l'échantillon, s^2 .

L'information fournie au sujet de la population par un échantillon de $n > 1$ unités d'échantillonnage dépend :

- Du fait que les unités d'échantillonnage ont été prélevées de façon indépendante ou selon un protocole de collecte pré-établi. La variance de la moyenne de l'échantillon est estimée par s^2/n où n est le nombre d'unités d'échantillonnage dans l'échantillon, mais ceci n'est vrai que si les unités d'échantillonnage ont été prélevées de façon indépendante. Les unités d'échantillonnage qui sont proches les unes des autres dans l'espace ou dans le temps ont tendance à être plus semblables que les unités d'échantillonnage qui sont distantes. Il s'ensuit que les unités d'échantillonnage qui sont collectées selon un protocole précis fourniront des informations concernant ce protocole et non sur la population étudiée. C'est pour cette même raison qu'il est probable que les unités d'échantillonnage extraites de compartiments d'une population soient plus semblables au sein de ces compartiments qu'entre différents compartiments. Les populations compartimentées sont habituelles, comme en témoignent les poissons disposés à la criée par bateau, parfois aussi par catégorie de taille, les bateaux utilisant un port particulier ou les sorties de pêche réalisées pendant un trimestre. Les schémas d'échantillonnage statistique tels que l'échantillonnage stratifié et à plusieurs degrés visent à isoler la variance au sein des compartiments ; les unités d'échantillonnage sont déterminées de façon indépendante et aléatoire au sein de ceux-ci. [Les modélisateurs doivent utiliser des modèles mixtes pour estimer les variances au sein des compartiments (Pinheiro et Bates, 2000).]

Pour déterminer le nombre, n , d'unités d'échantillonnage à inclure dans un échantillon, on prendra d'habitude le n le plus élevé possible en fonction du personnel et des ressources disponibles pour réaliser l'échantillonnage. L'adoption d'une méthode plus scientifique implique de déterminer la précision minimale acceptable et le niveau de confiance nécessaire pour déterminer si la précision a été atteinte. Ces valeurs peuvent ensuite être appliquées à des formules de la taille d'échantillonnage, par exemple Thompson (1992, chapitre 4 ; voir encadré ci-dessous) en postulant que toutes les unités d'échantillonnage sont prélevées de façon indépendante.

Estimation de la taille de l'échantillon (basé sur Thompson (1992))

Un paramètre d'une population θ (par ex. la moyenne de la population) doit être estimé en utilisant un estimateur $\bar{\theta}$. L'objectif est d'obtenir une estimation proche de la valeur vraie à une haute probabilité.

Si l'estimateur $\bar{\theta}$ est un estimateur non biaisé normalement distribué de θ , alors $\frac{\bar{\theta} - \theta}{\sqrt{\text{var}(\bar{\theta})}}$ a une

distribution normale. Si l'on utilise z pour indiquer le point $\alpha/2$ supérieur de la distribution standard normale,

$$P\left(\frac{|\bar{\theta} - \theta|}{\sqrt{\text{var}(\bar{\theta})}} > z\right) = P(|\bar{\theta} - \theta| > z\sqrt{\text{var}(\bar{\theta})}) = \alpha$$

La variance de l'estimateur $\bar{\theta}$ diminue en augmentant la taille de l'échantillon n , de sorte que si la taille de l'échantillon est augmentée suffisamment, $z\sqrt{\text{var}(\bar{\theta})} \leq d$, où d est la différence maximale acceptable entre l'estimation et la valeur vraie.

Quand on estime une moyenne de population avec un échantillonnage aléatoire, la moyenne de l'échantillon \bar{y} est un estimateur non biaisé de la moyenne de la population μ avec une variance

$\text{var}(\bar{y}) = \frac{(N-n)\sigma^2}{Nn}$, où N est la taille de la population, n la taille de l'échantillon et σ^2 la variance de la population. En posant

$$z\sqrt{\left(\frac{N-n}{N}\right)\frac{\sigma^2}{n}} = d$$

et en obtenant n , on obtient la taille nécessaire de l'échantillon :

$$n = \frac{1}{\left(\frac{d^2}{z^2\sigma^2} + \frac{1}{N}\right)} = \frac{1}{\frac{1}{n_0} + \frac{1}{N}}$$

où

$$n_0 = \frac{z^2\sigma^2}{d^2}$$

Si la taille de la population N est grande par rapport à la taille de l'échantillon n , de sorte que le facteur de correction de la population finie peut être ignoré, la formule de la taille de l'échantillon est simplifiée à n_0 .

Pour les plans d'échantillonnage plus complexes que l'échantillonnage aléatoire simple, on peut généralement sélectionner la taille de l'échantillon de la même façon en déterminant la taille de l'échantillon de sorte que la demi-largeur de l'intervalle de confiance soit égale à la distance indiquée.

Nous essayons, par exemple, d'identifier la taille de l'échantillon nécessaire pour estimer la taille moyenne d'une population de thonidés avec un taux d'erreur de moins d'un cm (dif. entre la vraie moyenne et son estimation) avec une confiance de 95% ($\alpha=0,05$). La variance issue des échantillons antérieurs qui est censée représenter la distribution de la population est de 52,2cm. Étant donné la taille importante de la population, on peut utiliser la formule pour n_0 qui donnera :

$$n_0 = \frac{(1.960^2) * 52.2}{1^2} = 200.53 \sim 201$$

où la constante 1.960 est le point $\alpha=0,025$ supérieur de la distribution standard normale.

Si l'erreur relative (r), la différence entre l'estimation et la valeur vraie, divisée par la valeur vraie, est significative, le critère suivant doit être suivi :

$$p\left(\left|\frac{\bar{\theta}-\theta}{\theta}\right|>r\right)<\alpha$$

Pour estimer la moyenne de la population μ dans $r\mu$ de la valeur vraie avec la probabilité $1-\alpha$, la formule de la taille de l'échantillon est :

$$n = \frac{1}{\left(\frac{r^2 \mu^2}{z^2 \sigma^2} + \frac{1}{N}\right)}$$

Si γ représente le coefficient de variation pour la population, c.à.d. $\gamma = \frac{\sigma}{\mu}$, la formule de la taille

de l'échantillon peut être écrite comme suit :

$$n = \frac{1}{\left(\frac{r^2}{z^2 \gamma^2} + \frac{1}{N}\right)}$$

Par conséquent, le coefficient de variation est la quantité de population dont dépend la taille de l'échantillon lorsque la précision relative doit être contrôlée.

Malheureusement, les personnes qui demandent des données des pêcheries se refusent en général à indiquer un degré de précision et de confiance au-dessous du « meilleur niveau possible », de sorte que l'approche pragmatique – qui représente par ailleurs beaucoup moins de travail – est probablement la plus appréciée, en particulier parce que les pêcheries importantes sont rarement suréchantillonnées. Il existe toutefois une question plus importante et qui concerne la façon de distribuer les ressources d'échantillonnage parmi les différentes sources d'information telles que les livres de bord, les débarquements et l'échantillonnage des prises en mer. Ceci dépend des coûts relatifs et de la précision disponible, des utilisations auxquelles sont destinées les données combinées et de l'indépendance maintenue dans les différents jeux de données. Il n'existe pas de formule facile qui soit capable de résoudre le problème de façon générique et chaque cas devra probablement faire l'objet d'un projet de recherche. Beare *et al.* (2002) ont donné un exemple de ce type de projet en utilisant la méthode du ré-échantillonnage par « bootstrap » (connue également sous le nom de Cyrano en Français) avec différents niveaux d'erreur aléatoire pour déterminer l'influence des indices d'abondance sur l'évaluation du stock.

4.2.2 Plans d'échantillonnage

Thompson (1992) décrit un large éventail de plans d'échantillonnages statistiques avec leurs formules d'estimations correspondantes. De leur côté, Cochran (1977), Raj (1968), et Sukhatme et Sukhatme (1970) ont également rédigé d'excellents documents relatifs à l'échantillonnage. Dans le cas présent, l'objectif est d'introduire des plans d'échantillonnage qui peuvent être facilement utilisés dans les travaux sur les pêcheries. Le paragraphe final de cette section traite de l'optimisation des échantillonnages.

Échantillonnage aléatoire simple sans remplacement

L'échantillonnage aléatoire simple (EAS) signifie que chacune des n unités d'échantillonnage différentes prélevées dans une population N a la même probabilité d'être choisie. On utilise une table de numéros générés au hasard ou, dans de nombreuses circonstances la meilleure simulation pratique de celle-ci, pour prendre des unités d'échantillonnage « sans remplacement », c'est-à-dire qu'aucune unité ne pourra figurer plus d'une fois dans un échantillon. L'EAS peut être utilisé sur des populations entières, sur des sous-ensembles prédéterminés de celles-ci, comme dans les strates d'échantillonnage, ou au sein de degrés hiérarchiques d'un plan d'échantillonnage à plusieurs degrés (voir plus bas). L'EAS est un plan d'échantillonnage raisonnable lorsqu'il n'existe pas d'information préalable sur les valeurs probables de la variable étudiée dans les différentes unités d'échantillonnage. Si ces informations existent et sont réputées fiables, on pourra les utiliser pour concevoir d'autres schémas d'échantillonnage qui donneront une meilleure précision de l'estimateur recherché. L'EAS est satisfaisant lorsque la variation de la variable dans le temps ou dans l'espace ne représente pas d'intérêt. Il

présente le gros avantage d'être facile à mettre en oeuvre et de produire aisément des estimations. Les échantillons aléatoires simples sont souvent adéquats pour ajuster les modèles ou pour la « post-stratification » après l'échantillonnage s'il est nécessaire d'examiner les résultats à travers certaines variables comme l'âge ou le sexe.

Échantillonnage aléatoire simple avec remplacement

L'échantillonnage aléatoire simple « avec remplacement » signifie qu'une unité d'échantillonnage individuelle est remplacée dans la population chaque fois qu'elle est prélevée pour l'échantillon. Une unité d'échantillonnage peut donc apparaître plus d'une fois dans un échantillon quelconque. Dans l'EAS avec remplacement, chaque séquence possible de n unités d'échantillonnage a une probabilité égale. Ceci n'est généralement pas suffisant, mais c'est utile lorsqu'on recherche la possibilité d'avoir des observations répétées dans une unité d'échantillonnage individuelle, par exemple, pour prélever des sorties multiples sur un bateau à des fins d'observation.

Échantillonnage avec probabilité proportionnelle à la taille

Des informations a priori indiquent parfois que certaines « grandes » unités d'échantillonnage peuvent donner une valeur plus élevée de la variable étudiée que des « petites » unités d'échantillonnage. Par exemple, on peut s'attendre à ce que les grands bateaux de pêche prennent plus de poissons que les petits bateaux. Dans le cas de l'échantillonnage avec probabilité proportionnelle à la taille (PPT), chaque unité d'échantillonnage se voit assigner une probabilité d'être sélectionnée qui est proportionnelle à la valeur attendue de la variable étudiée. Une façon simple de sélectionner un échantillon avec une probabilité proportionnelle à la taille est de constituer une liste de toutes les unités d'échantillonnage dans la population avec leurs probabilités assignées. Les probabilités cumulatives de zéro à un sont inscrites dans une colonne supplémentaire. On tire des nombres aléatoires uniformes de 0 à 1 que l'on fait correspondre avec les probabilités cumulatives afin de trouver l'unité d'échantillonnage sélectionnée suivante. L'échantillonnage avec probabilité proportionnelle à la taille est plus - ou même beaucoup plus - efficace que l'EAS, mais uniquement si l'information a priori qui est utilisée pour assigner les probabilités de sélection est fiable. Si ce n'est pas le cas, elle peut être moins efficace (Cotter *et al.*, 2002) et peut ne pas valoir la peine. Des formules spéciales d'estimation sont nécessaires pour corriger la probabilité proportionnelle à la taille quant au biais de l'échantillonnage en faveur des « grandes » unités d'échantillonnage. La probabilité proportionnelle à la taille est une alternative à la stratification des unités d'échantillonnage par la taille et peut être plus facile à utiliser.

Échantillonnage systématique

Ce schéma prévoit une distance ou un nombre fixe d'unités d'échantillonnage entre chaque unité d'échantillonnage sélectionnée pour l'échantillon. Par exemple, les zones de l'échantillonnage sont disposées sur un quadrillage à une ou plusieurs dimensions. Ce schéma a fait l'objet de nombreuses applications en océanographie lorsque l'on veut obtenir une distribution de l'effort d'observation dans l'espace et/ou le temps, par exemple en prenant une mesure toutes les x heures, en échantillonnant les poissons sur un quadrillage à 2 points géographiques, etc. L'estimation des moyennes et des variances à partir d'échantillons systématiques utilise souvent les formules de l'EAS sans remplacement, mais ce processus comporte des risques de biais en raison du modèle de l'échantillon :

- Les tendances ou oscillations dans la variable étudiée peuvent signifier que le quadrillage de l'échantillonnage donne des valeurs plus hautes que basses ou vice-versa.
- La périodicité dans la variable d'une longueur d'onde comparable à l'intervalle du quadrillage peut signifier que la plupart des observations se produisent dans la partie supérieure ou inférieure des oscillations. Ce type de biais est appelé « repliement » (aliasing).

Si c'est possible, on sélectionnera au hasard le point de départ et l'orientation du quadrillage dans la région étudiée. En général, les échantillons systématiques sont bons pour modéliser les dimensions temporelles ou spatiales d'un quadrillage, mais ceci présente un risque. En effet, il est bien connu que les arrangements des nombres purement aléatoires sur un axe linéaire suggèrent souvent la présence de tendances (Kendall, 1976, par. 3.17) de sorte que toute modélisation de tendances apparentes sur un quadrillage doit être étayée par de solides raisons a priori avant d'inclure les variables indépendantes.

Échantillonnage stratifié

Les échantillonneurs segmentent souvent une population en « strates » d'échantillonnage géographiques, temporelles, biologiques (par ex. la taille) ou de mode de pêche (par ex. les DCP par opposition au banc libre). Ils peuvent le faire pour deux raisons :

- Pour distribuer l'effort d'observation de façon égale dans l'espace et dans le temps.
- Pour utiliser des informations a priori au sujet de la variation de la variable étudiée afin d'améliorer l'efficacité du sondage pour estimer une moyenne et une variance globales.

La première raison est habituelle et valide à de nombreuses fins pratiques, mais n'est pas nécessairement efficace du point de vue statistique pour estimer une valeur moyenne. En général, les échantillons sont collectés dans chaque strate par EAS ou par la meilleure approximation à celui-ci. Pour garantir la meilleure efficacité statistique, il faut que les limites des strates soient placées de sorte que les variances à l'intérieur des strates soient aussi petites que possible ; en d'autres termes, il faut placer les limites à l'endroit où se produisent les discontinuités ou les gradients les plus élevés dans la variable étudiée. L'efficacité est également affectée par les tailles d'échantillon assignées à chaque strate. La répartition proportionnelle assigne un nombre égal d'observations par unité d'espace ou de temps. C'est souvent un choix sensé lorsque la stratification est réalisée pour la première raison citée. La répartition optimale assigne des observations à chaque strate en fonction de sa taille et de l'écart-type au sein de la strate. Ceci a du sens lorsque la stratification est réalisée pour satisfaire le deuxième objectif.

Les plans d'échantillonnage aléatoire stratifié exigent qu'au moins deux unités d'échantillonnage soient situées dans chaque strate pour pouvoir estimer la variance globale. Dans la pratique, on constate cependant que deux unités d'échantillonnage ne donnent pas une estimation fiable de la variance à l'intérieur d'une strate, même si elle peut être estimée, et il est préférable de disposer de beaucoup plus d'unités d'échantillonnage. Il se pourrait alors que l'exigence d'estimer une variance provoque un suréchantillonnage des strates les moins variables, ce qui serait inefficace et coûteux. En conclusion, on peut estimer que les strates sont un luxe : lorsqu'on possède des ressources limitées pour réaliser l'échantillonnage on réduira leur nombre au minimum et on se contentera d'un nombre plus réduit d'informations géographiques et/ou temporelles. Les estimations seront alors plus précises et fiables.

Échantillonnage à plusieurs degrés

Les scientifiques de la pêche rencontrent souvent des populations structurées de façon hiérarchique ; c'est le cas, par exemple, des poissons issus de prises provenant de sorties réalisées par des bateaux dans une flottille. Une telle population de poissons pourrait, en principe, être échantillonnée selon la méthode de l'EAS en ignorant la structure hiérarchique, mais c'est souvent peu pratique, par exemple, si les observateurs doivent passer d'un bateau à un autre en mer pour échantillonner différentes prises. Une procédure plus appropriée consiste à sélectionner d'abord un échantillon d'une unité d'échantillonnage « primaire » (u.e.p.) au niveau le plus élevé, puis un échantillon d'une unité d'échantillonnage « secondaire » (u.e.s.) de chacune des unités d'échantillonnage principales sélectionnées, puis un échantillon d'une unité d'échantillonnage « tertiaire » (u.e.t.) de chaque unité d'échantillonnage secondaire, et ainsi de suite. Dans le cas de l'exemple donné (et en ignorant les questions pratiques examinées ci-dessous pour les relevés des observateurs), on sélectionnerait d'abord un échantillon des bateaux (u.e.p.), puis un échantillon des sorties (u.e.s.) réalisées par chaque bateau sélectionné, puis un échantillon des prises (u.e.t.) parmi celles qui ont été réalisées durant chaque sortie sélectionnée. L'échantillonnage réalisé de cette façon permet de disposer de formules standard pour estimer la moyenne et la variance à chaque niveau. Il existe également une théorie pour examiner la variance à chaque niveau et pour ajuster les répartitions des échantillons dans les niveaux pour améliorer l'efficacité, mais ces améliorations ne seront pas nécessairement pratiques dans un contexte halieutique.

Optimisation de l'échantillonnage

L'échantillonnage, réalisé dans les pêcheries et ailleurs, est une activité coûteuse et de gros efforts ont été déployés pour maximiser la quantité d'informations obtenues par l'observation en modifiant les plans d'échantillonnage, les répartitions des échantillons et les formules d'estimation. L'application de ces méthodes dans un contexte halieutique peut cependant être décevante, principalement parce que le programme de prospection des échantillons est souvent largement conditionné par des facteurs géographiques et logistiques et, ensuite, parce que les prospections de pêche tendent à concerner plus d'une espèce. Une prospection qui s'avère

optimale pour une espèce donnée peut être absolument inefficace pour une autre espèce en raison de distributions géographiques différentes, etc. Une approche à variables multiples pourrait être possible en utilisant un composant principal au lieu du résultat pour une seule espèce afin d'optimiser la prospection. Cependant, lorsque une autre espèce devient relativement plus importante, on risque de constater un manque cruel d'information. La facilité et la fiabilité d'application sont des facteurs qui tendent à avoir plus d'importance que l'efficacité statistique dans la conception des relevés de pêche.

On recommande d'effectuer des essais de d'échantillonnages intensifs (échantillons continus de grande taille) ou au contraire d'échantillons répétés de plus petite taille pour évaluer la qualité de l'échantillonnage. L'utilisation de ce type d'essais permet de postuler que la perception de la population n'est pas affectée par le type d'échantillonnage.

4.2.3 Estimation de la précision

Une statistique estimée de façon précise est considérée ici comme une statistique qui se situe tout près d'une valeur fixée dans un échantillonnage répété. Une statistique estimée avec exactitude est une statistique qui se situe tout près de la valeur vraie de la population dans un échantillonnage répété (voir également la section 4.1.1). Par conséquent, la variance de l'échantillon de la statistique estime la précision ; elle n'estime l'exactitude que si l'échantillon et la formule d'estimation sont sans biais. L'erreur quadratique moyenne est la variance de l'échantillon plus le carré du biais. Elle estime l'exactitude, mais comme le biais est rarement estimable dans les travaux sur les pêcheries, elle est peu utilisée et on lui préfère le concept de précision mesuré comme $1/(\text{variance de l'échantillon})$.

La variance de l'échantillon est estimable dans de nombreux cas à partir des formules analytiques données dans des textes sur l'échantillonnage. Un postulat important est le fait que chaque observation est réalisée de façon indépendante (voir la section 4.2.1), ce qui est d'habitude le cas si l'échantillonnage est réalisé de façon aléatoire et selon un plan d'échantillonnage statistique établi. Si ce n'est pas le cas, il est probable que les formules analytiques surestimeront la précision de l'échantillon étant donné que la dépendance entre les observations réduit les degrés de liberté réels utilisés comme diviseur dans les estimateurs de la variance.

La plupart des formules d'échantillonnage postulent que les nombres d'individus dans l'échantillon et dans la population sont connus de façon exacte. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de prendre en compte leur variance (var) lorsqu'on extrapole une moyenne pour un échantillon à une estimation du total d'une population. Si le facteur d'extrapolation est connu de façon exacte et x est une variable aléatoire, un résultat de base issu des statistiques mathématiques donnera

$$\text{var}(kx) = k^2 \cdot \text{var}(x) .$$

Dans les travaux des pêcheries, la présomption de connaissance exacte du facteur d'extrapolation pourrait être trop optimiste dans certains cas. La formule d'estimation correspondante lorsque k est également une variable aléatoire indépendante de x est (Goodman, 1960)

$$\text{var}(kx) = k^2 \cdot \text{var}(x) + x^2 \cdot \text{var}(k) - \text{var}(k) \cdot \text{var}(x) .$$

On trouve un exemple de facteurs d'extrapolation incertains dans les relevés des observateurs lorsqu'une seule prise est échantillonnée et qu'il faut estimer les volumes relatifs de l'échantillon et de la prise. La variance de l'estimation dans la prise totale exigerait alors l'utilisation d'un second estimateur. Des formules plus compliquées doivent être utilisées lorsque k et x ne sont pas indépendants (Goodman, 1962 ; Bohrnstedt et Goldberger, 1969).

Il se peut que les formules analytiques ne soient pas applicables ou soient difficiles à utiliser pour les statistiques issues d'un processus d'estimation compliqué ; c'est le cas notamment des nombres par âge basés sur une clef d'identification âge-longueur qui implique l'échantillonnage pour la taille, puis le sous-échantillonnage pour l'âge (voir la section 4.3.6). Une approche rudimentaire mais efficace de ce problème vise à comparer le nombre et l'indépendance des observations qui contribuent à chaque estimation. Ainsi, par exemple, le nombre de pièces dures lues par âge pourrait être utilisé pour évaluer la précision relative des nombres estimés de poissons aux différents âges, en particulier si les pièces dures ont été collectées lors de plusieurs sorties de pêche dans différentes régions. Ceci dit, dans les travaux scientifiques formels, on appliquera la méthode bootstrap.

Le bootstrap est une méthode informatisée qui consiste à effectuer un échantillonnage répété avec remplacement des éléments d'un échantillon existant en postulant que cet échantillon est une bonne représentation de la population. C'est ce qu'on appelle le ré-échantillonnage (Efron et Tibshirani, 1993 ; Davison et Hinkley, 1997). Le « bootstrapping » d'une clef d'identification âge-longueur créée par un double échantillonnage est un processus en deux temps : on commence par bootstrapper l'échantillon de taille, puis on sélectionne pour chaque pseudo-échantillon créé un échantillon d'âge à partir des otolithes disponibles dans chaque classe d'âge. Le ré-échantillonnage devrait suivre de préférence le véritable processus d'échantillonnage dans tous ses aspects. La sauvegarde des statistiques étudiées à chaque répétition du processus de ré-échantillonnage donnera une distribution de fréquence qui permettra d'estimer les variances et les intervalles de confiance associés. La programmation de ce type de bootstrap peut être compliquée et son exécution peut prendre un temps considérable, notamment dans le cas des grands échantillons. Il est inutile d'entreprendre ces travaux si l'on pense que l'échantillon original est sérieusement biaisé à cause d'un facteur spatial, temporel ou autre.

4.2.4 Sources d'information

Notre capacité à évaluer et à prévoir l'évolution des stocks de poisson, d'une part, et à comprendre les migrations et les processus qui déterminent leur soutenabilité, d'autre part, dépend des connaissances que nous possédons sur les pêcheries et sur la biologie des espèces ciblées dans les différentes parties de l'océan. Le total des débarquements et de l'effort réalisé chaque année par une flottille doit souvent être estimé à l'aide d'un processus d'échantillonnage étant donné que la collecte des données de toutes les sorties (recensement) est trop coûteuse ou peu pratique. Les informations biologiques doivent également être obtenues en échantillonnant les pêcheries car les relevés provenant des bateaux de recherche indépendants des pêcheries ne sont généralement pas rentables du point de vue financier à l'échelle de l'océan Atlantique. Cette section décrit trois méthodes dépendant des pêcheries pour collecter des informations sur celles-ci et sur la biologie des espèces voisines des thonidés : les livres de bord, l'échantillonnage des débarquements et les relevés des observateurs. Les autres sources d'information dignes d'être mentionnées sont les conserveries et les organisations de pêche sportive.

Il faut tenir compte des limitations de l'information dépendant des pêcheries (Paloheimo et Dickie, 1964 ; Hilborn et Walters, 1992 ; Swain et Sinclair, 1994 ; Rose et Kulka, 1999) étant donné que les pêcheurs ont tendance à rechercher les secteurs connus comme étant des lieux de fortes concentrations de poissons plutôt que d'agir comme des échantillonneurs aléatoires du stock. Ils peuvent donc obtenir une CPUE élevée, même lorsque les stocks sont limités. En outre, la capacité de capture des bateaux individuels tend à s'accroître avec le temps dans la mesure où ceux-ci sont équipés de moteurs de plus en plus puissants et d'un meilleur équipement de détection des poissons. La capacité de capture de la flottille dans l'ensemble peut également augmenter du fait de ces changements, notamment si de vieux bateaux sont remplacés par de nouveaux navires ; inversement, elle peut diminuer suite à une perte de bateaux pour des raisons économiques.

Que l'on applique ou non les procédures d'échantillonnage décrites ci-dessous, il est indispensable de consigner dans de brefs documents appelés « Procédures Opérationnelles Standard » (SOP) les méthodes d'échantillonnage, les formules et les modèles qui seront utilisés dans la pratique. Une personne pourra ainsi prendre le relais d'une autre dans la collecte des données sans que la procédure doive être modifiée ou, si les procédures doivent être actualisées pour une raison quelconque, on conservera un registre des changements réalisés et de leur date, ce qui pourra avoir une importance cruciale dans l'évaluation des séries temporelles. Les SOP doivent être mises à la disposition des groupes scientifiques de l'ICCAT de sorte à permettre une meilleure évaluation de la valeur scientifique des résultats de l'échantillonnage.

Livres de bord

La plupart des capitaines des senneurs, des palangriers et des canneurs utiliseront des livres de bord pour enregistrer les circonstances de chaque sortie et les captures obtenues (voir **Annexe 1**). Ils apprécieront la possibilité d'utiliser un modèle adapté dans le but de mieux contrôler la pêche, en particulier si ce modèle est élaboré avec leur collaboration et avec celle de toutes les personnes concernées. Un modèle adéquat de livre de bord devrait fournir des informations peu coûteuses sur les quantités de poissons retenus à bord pour être débarqués, sur l'effort de pêche, sur les débarquements par unité d'effort (LPUE), sur les stratégies de pêche et sur les bateaux de pêche. Ces livres de bord peuvent également être utilisés pour collecter d'autres données utiles concernant notamment les quantités de poissons rejetés et, par conséquent, la capture² par unité d'effort (CPUE). Ce point est examiné plus loin dans la section 4.4.

² « Capture » représente ici les poissons retenus à bord + rejetés. Les « débarquements » peuvent être un sous-ensemble des poissons retenus si certains sont consommés à bord, transbordés ou rejetés par la suite pour faire de la place à des poissons ayant une plus grande valeur.

Le succès d'un système de livre de bord dépend en partie des attitudes manifestées à son égard. Il est indispensable que le capitaine comprenne parfaitement le fonctionnement et l'objectif du livre de bord. Il peut être nécessaire, à cet effet, de prévoir un entretien personnel et éventuellement une petite séance de formation, notamment sur l'identification des espèces. Par ailleurs, il faut également que les autorités halieutiques veillent à ce que tous les livres de bord soient remplis car les gens perdent facilement tout intérêt lorsque les informations présentées sont ignorées. Un examen et un entretien régulier avec les capitaines peuvent contribuer à éviter les erreurs récurrentes ou les ambiguïtés, tandis qu'un retour d'informations utiles peut alimenter l'intérêt et servir de contrôle des erreurs. Ce retour d'informations peut être présenté pour chaque sortie ou sous forme de rapport annuel comprenant des données regroupées concernant les activités et les débarquements de toute la flottille. L'installation du système de livre de bord sur un ordinateur portable afin qu'il soit utilisé par les capitaines peut être bénéfique pour tout le monde s'il réduit le travail de transcription, qui se prête aux erreurs, et si le capitaine peut y résumer ou décrire de façon adéquate des détails concernant des activités halieutiques antérieures.

Un système de livre de bord, même s'il est bien conçu, sera cependant peu utile s'il existe des contraintes légales aux enregistrements du capitaine, notamment à cause des quotas de débarquement ou des zones de pêche réglementée. Il est possible que la promesse selon laquelle ces données seront confidentielles ne puisse pas être défendable dans une procédure judiciaire et qu'il faille demander une assistance légale dans ce cas avant de remettre ces données. Il peut également y avoir des contraintes commerciales qui empêchent un capitaine de déclarer les lieux de pêche et les captures. Le non-respect de l'exactitude et de l'identification des espèces est un autre problème potentiel que peut poser un schéma de livre de bord au même titre que l'omission des poissons qui sont rejetés ou consommés en mer. En l'absence de données d'échantillonnage concernant les poissons non débarqués, les enquêtes sur les politiques de rejet, sur les tailles minimales acceptables et sur la consommation de poisson pourraient améliorer considérablement la valeur scientifique des données consignées sur les livres de bord.

Il se peut qu'il ne soit pas possible d'installer un livre de bord sur chaque bateau dans une flottille en raison notamment du refus de collaboration, de la distance géographique par rapport à un port ou du caractère artisanal de la pêcherie. Un biais peut se produire alors si, pour une raison quelconque, des bateaux non munis de livres de bord opèrent d'une façon différente de ceux qui en sont équipés. Il peut également y avoir des limites pratiques quant aux nombres de livres de bord qui peuvent être relevés et utilisés. Ceci représente cependant un problème d'échantillonnage, même si une partie importante des sorties réalisées y est enregistrée. Un certain tirage aléatoire des bateaux sélectionnés, en opérant des changements fréquents, contribuerait à réduire la présence d'inférences biaisées dans l'ensemble de la flottille qui pourraient provenir de l'enregistrement répété du même sous-ensemble de bateaux. Quelle que soit la raison de la couverture incomplète des livres de bord d'une pêcherie, il est nécessaire d'extrapoler les résultats des bateaux observés à l'ensemble de la flottille pour estimer le total des débarquements et de l'effort (mais pas pour estimer la LPUE moyenne). L'estimation et l'extrapolation sont examinées dans la section 4.2.6.

Après avoir démontré l'utilité d'un système de livre de bord, on veillera à ce que chaque livre de bord enregistre une seule fois **pour chaque sortie** :

- L'identification du bateau, du capitaine et de l'armateur.
- Les détails du bateau comprenant le type, la nationalité du pavillon, le tonnage brut, la puissance des moteurs (de préférence celle qui est transmise à l'arbre d'hélice, en excluant la puissance utilisée pour les générateurs, la réfrigération, les treuils) ; la longueur (en précisant s'il s'agit de la longueur hors tout ou de la longueur réglementaire) ; la capacité de stockage des poissons ; le nombre de membres de l'équipage destinés à la pêche et les temps de travail de chaque équipe (s'ils diffèrent de ceux destinés à la manipulation des prises).
- La date, l'heure et le port de départ et d'arrivée, y compris les haltes réalisées pendant la sortie.
- Le temps perdu à cause de pannes, de mauvais temps ou autres interruptions.
- Les détails des transbordements ou débarquements de poissons réalisés pendant la sortie.
- Les spécifications de l'équipement de détection de poissons disponibles à bord.
- Les détails généraux de l'engin de pêche, c'est-à-dire en excluant les modifications réalisées d'une opération à l'autre. Pour les filets, ceci inclura les dimensions des mailles (en spécifiant s'il s'agit de la dimension entre chaque nœud ou maille étendue), le type de fil et le mode construction et, si possible, un plan du filet. Pour la palangre, les détails généraux comprendront le nombre total d'hameçons, le

nombre d'hameçons entre chaque flotteur, le type d'hameçon et un diagramme général des dimensions de la palangre.

- Les détails généraux des techniques de pêche, y compris les opérations de lancer et halage, les profondeurs habituelles de pêche, les durées d'immersion, les limitations des conditions climatiques sur la pêche.
- Les espèces visées pendant la sortie et les critères utilisés par l'équipage pour rejeter ou conserver les poissons d'espèces différentes, par exemple les tailles minimales des débarquements.
- Les noms des espèces de poisson qui seront identifiées dans le relevé de la prise si elles sont capturées et de celles qui risquent d'être mélangées parce qu'elles sont difficiles à séparer ou parce que le marché ne requiert pas leur séparation. [Les noms vernaculaires prêtant parfois à confusion (ex. bonito pour le listao), il faudra vérifier les identités des espèces et les inscrire sous leur nom latin dans les registres conservés par les autorités halieutiques. Voir la section 4.2.5.]
- Les méthodes utilisées pour estimer les quantités de poissons retenus (et, si possible, des poissons rejetés).

Une partie importante de ces détails pourra être simplement recopiée d'une sortie à l'autre.

Les livres de bord doivent enregistrer **chaque jour** durant la sortie (indépendamment qu'elle ait donné lieu ou non à une capture) la date, la position à midi, le lieu de la pêche, les activités, le temps passé à naviguer, à détecter les poissons et à pêcher, la quantité de l'effort de pêche utilisé et la prise par espèce.

Les livres de bord doivent enregistrer lors de **chaque opération**, indépendamment qu'elle ait donné lieu ou non à une capture :

- L'engin déployé (s'il varie d'une opération à l'autre). Les détails donnés doivent permettre de calculer une mesure utile de l'effort de pêche réel pour chaque opération.
- Les positions et les durées du lancer et du halage, plus les points intermédiaires si le bateau n'a pas voyagé directement entre les deux.
- Les dommages occasionnés à l'engin pendant la pêche.
- Le temps et l'état de la mer. Les variables océanographiques convenues avec les autorités halieutiques en fonction des capteurs disponibles.
- Les quantités retenues à bord de chaque espèce et des espèces mélangées, exprimées en nombres et en poids.
- Et, si elles sont disponibles, les estimations des quantités rejetées de chaque espèce et des espèces mélangées.

Les livres de bord doivent enregistrer **à la fin de chaque sortie** :

- Le temps total exprimé dans les unités établies (par ex. heures, jours de travail, périodes de 24 heures, etc.) consacré à la prospection et à la pêche.
- La quantité totale débarquée telle qu'elle est enregistrée par une balance commerciale, de préférence par espèce et toutes espèces confondues.

Il faudra vérifier, à la fin de la sortie, si la quantité totale déclarée comme ayant été débarquée pour la vente commerciale correspond aux quantités totales retenues dans chaque opération. Une erreur systématique d'estimation peut facilement se produire, à plus forte raison si aucun appareil de pesage n'est utilisé à bord. Si c'est le cas, les registres des livres de bord des quantités journalières retenues devront être ajustés de façon proportionnelle de sorte que leur somme corresponde au poids total débarqué (moins les quantités qui ont été consciemment perdues pendant la sortie). Le facteur d'ajustement en question doit être consigné avec les données. Une autre manière d'améliorer la valeur scientifique des données des livres de bord après le débarquement est d'ajouter des détails sur les compositions par espèce de chaque prise. Ceci est possible si les espèces sont séparées et si leurs poids sont enregistrés de façon séparée dans le cadre du processus commercial.

Les journées pendant lesquelles un bateau a cherché du poisson sans parvenir à en capturer doivent être considérées comme des jours de pêche. On croit souvent par erreur que les jours de pêche sont uniquement ceux qui ont donné lieu à des captures. Or, la recherche de poissons est un type d'activité halieutique. Il faut par

conséquent concevoir le livre de bord dans ce sens et ajouter des instructions permettant de déclarer les activités réalisées, c'est-à-dire expliquer ce que les bateaux de pêche ont fait les jours où ils n'ont pas obtenu de capture. Le fait que le bateau ait dérivé à cause du mauvais temps ou de la panne d'un engin, qu'il se soit déplacé d'un lieu de pêche à un autre ou qu'il ait cherché un banc de poissons n'est pas considéré de la même façon dans le calcul des jours de pêche. Une autre mesure de l'effort, qui est souvent utilisée pour les petits bateaux de pêche, est le « temps de prospection », c'est-à-dire la quantité de temps par jour que le bateau passe à chercher activement des poissons. Le « temps de prospection » est calculé en soustrayant le temps de croisière du « jour de pêche ». Ces données peuvent être prises directement du livre de bord par les observateurs ou peuvent être estimées à partir des données de ces derniers. De nouvelles mesures de l'effort de pêche ont été introduites là où des DCP sont utilisés. Elles comprennent le nombre d'opérations, le nombre d'opérations ayant donné lieu à une prise et le volume moyen des prises de l'opération. Toutes ces mesures doivent être transcrites avec le type d'engin.

Les données d'effort doivent être déclarées en nombre d'hameçons pour la palangre et en jours de pêche pour les pêcheries de surface. Le nombre d'hameçons entre les flotteurs est également utilisé comme unité d'effort dans le cas des pêcheries plurispécifiques. Si ce n'est pas réalisable, on choisira l'unité d'effort de sorte à refléter l'effort qui est réalisé directement pour produire la prise correspondante. Les unités d'effort recommandées sont indiquées ci-dessous dans un ordre décroissant de préférence pour chaque type d'engin.

Palangre :

1. Nombre total d'hameçons réels utilisés (à l'exception de ceux qui n'ont pas servi de façon efficace à la pêche)
2. Nombre total d'hameçons utilisés
3. Nombre total d'opérations des palangres
4. Nombre total de bateaux-journées de pêche
5. Nombre total de bateaux-journées de mer (en dehors du port)
6. Nombre d'hameçons entre flotteurs
7. Nombre total de sorties (croisières) réalisées
8. Nombre total de bateaux ayant effectivement participé à la pêche

Canne et hameçon (canneur)

1. Nombre total de bateaux-journées de pêche (y compris les jours de prospection, avec ou sans prise de poisson). Le nombre de bateaux-journées de l'appât doit être exclu, mais peut être signalé séparément pour évaluer les stocks d'appât.
2. Nombre total de bateaux-journées de mer
3. Nombre total de cannes utilisées, c'est-à-dire le nombre de membres d'équipage pêchant à la canne
4. Nombre total de sorties (croisières) réalisées
5. Nombre total de bateaux ayant effectivement participé à la pêche

Senne tournante, filet tournant, filet soulevé, senne, filet maillant, chalut

1. Nombre total de bateaux-journées de pêche (comprenant tous les jours, avec ou sans prise de poisson)
2. Nombre total de bateaux-journées de mer
3. Nombre total de jours de prospection (à l'exception du temps passé pour lancer et haler le filet)
4. Nombre total de sorties (croisières) réalisées
5. Nombre total de bateaux ayant effectivement participé à la pêche

Ligne traînante, ligne à main

1. Nombre total d'hameçons- (ou lignes-) journées de pêche
2. Nombre total de bateaux-journées de pêche

3. Nombre total de bateaux-journées de mer
4. Nombre total de sorties (croisières) réalisées
5. Nombre total de bateaux ayant effectivement participé à la pêche

Madragues

1. Nombre total de madragues-journées (nombre de madragues multiplié par nombre de journées de mer)
2. Nombre total de madragues mouillées

Pêche sous DCP

1. Nombre total d'opérations
2. Nombre total d'opérations positives

Débarquements

Il peut être nécessaire d'échantillonner les poissons débarqués pour estimer le total des débarquements réalisés par une flottille de pêche. Cette opération peut également fournir des informations utiles sur les compositions par taille et âge, sur le poids par taille, sur la maturité par taille et sur d'autres caractéristiques biologiques d'un stock même si ceci peut impliquer l'obligation d'acheter des poissons disséqués ou abîmés d'une certaine façon durant l'observation. Cette section aborde l'échantillonnage réalisé durant les différentes phases de débarquement. L'estimation et/ou l'extrapolation au total des débarquements de la flottille ou aux débarquements pour une strate spatio-temporelle sont traitées à la section 4.2.6.

Il existe une série de biais potentiels dans l'examen des débarquements (par opposition aux captures) qui doivent être rappelés, à savoir :

- Les poissons capturés sont généralement conservés jusqu'à la fin de la sortie et peuvent être débarqués dans un port très éloigné de l'endroit où ils ont été pêchés (en particulier dans le cas des pêcheries industrialisées). Dans ce cas, la zone et la date du débarquement peuvent différer de celles de la prise. Par exemple, certaines captures réalisées dans l'océan Atlantique peuvent être débarquées dans des ports de l'océan Pacifique ou Indien l'année suivant celle de la prise.
- Les poissons peuvent être manipulés dans une certaine mesure à bord des bateaux (ex. préparés en filets, éviscérés et sans branchies, congelés ou même mis en boîte).
- Les poissons peuvent être consommés en mer par l'équipage ou jetés par-dessus bord.

La première considération est de savoir si l'échantillonnage porte sur une flottille, sur un stock ou sur une strate spatio-temporelle. Ceci définira la « population étudiée » (cf. la section 4.2.1). Dans la pratique, seuls les poissons débarqués - ou un sous-ensemble de ces derniers - peuvent être échantillonnés et forment ainsi la « population observable ». Les modèles à assumer pour associer les poissons observables au total des débarquements et, par conséquent, aux poissons de la population étudiée doivent être examinés et documentés dans une Procédure Opérationnelle Standard (SOP) avant d'entreprendre un échantillonnage coûteux. Les modèles pouvant être appliqués dans cette association sont les suivants :

- « Les débarquements observables par unité d'effort sont les mêmes que les débarquements totaux par unité d'effort ». L'effort peut donc être utilisé comme facteur d'extension.
- « Tous les poissons > X cm ont été retenus », ce qui implique que les débarquements = prises au-dessus de X cm.
- Un modèle élaboré utilisé pour évaluer le stock à partir des données des débarquements.

N'importe quel biais dans ces modèles postulés s'ajouteront aux biais existant dans l'échantillonnage des débarquements de sorte qu'il faudra les vérifier de façon régulière et, si possible, essayer de minimiser leur importance, notamment en cherchant à accéder à des débarquements jusqu'alors inaccessibles ou en mettant sur pied un programme d'observateurs pour estimer les rejets (voir également le **Tableau 4.2.1**).

Les poissons débarqués sont observables soit sur un bateau de pêche avant qu'ils ne soient déchargés, soit à bord de quai avant qu'ils ne soient livrés aux acheteurs, soit à la criée du port avant qu'ils ne soient vendus. Si on a le choix, le meilleur endroit pour réaliser l'échantillonnage sera celui qui offrira à l'échantillonneur le meilleur

accès aux poissons et le plus de temps pour travailler avant que les poissons ne soient déplacés. L'observation à d'autres endroits, comme sur un cargo utilisé pour transborder le poisson au port, probablement à partir de plusieurs bateaux de pêche, peut ne pas valoir la peine si les origines du poisson sont incertaines. Les débarquements constituent un sous-ensemble des captures totales s'il y a eu des rejets en mer ou si des poissons ont été transbordés ou consommés en mer. En l'absence de données d'échantillonnage, il faudra chercher à obtenir des informations sur la destination des poissons qui n'ont pas été débarqués.

La méthode de sélection des phases de débarquements à inclure dans un échantillon doit être déterminée avant de commencer le programme d'échantillonnage de sorte qu'elle puisse être utilisée de façon cohérente. Le problème est qu'on ne sait pas à l'avance combien de débarquements auront lieu ni à quel moment. En effet, le calendrier choisi pour les débarquements peut être influencé par la saison, par le temps, par le jour de la semaine, par le lieu de pêche, par l'identité du capitaine et par une série d'autres facteurs potentiels. L'arrivée systématique à un port en vue d'effectuer un échantillonnage un mercredi sur deux, par exemple, pourrait provoquer le biais de l'un ou de plusieurs de ces facteurs. Le choix au hasard des jours d'échantillonnage dans une période d'échantillonnage, comme un trimestre de l'année, réduit les possibilités de biais, si ce n'est que les bateaux faisant de petites sorties (et des débarquements fréquents) seront plus souvent présents que ceux qui font des longues sorties. Il s'ensuit que les stocks des eaux côtières seront probablement mieux représentés dans les échantillons que les stocks des eaux lointaines. Il faut souligner à cet égard l'importance de l'identité de la population étudiée (cf. 4.2.1). En effet, s'il s'agit des « débarquements totaux de la flottille », la sélection aléatoire des jours d'échantillonnage sera une option raisonnable étant donné que les sorties de courte et longue distance devraient être représentées dans l'échantillon de la même façon qu'elles se produisent dans la population. Si, par contre, il s'agit du « stock total de poissons », et que l'on estime qu'une grande partie du stock se trouve dans les eaux lointaines, la présence fréquente des sorties courtes dans un échantillon représenterait un biais. L'échantillonnage orienté sur le stock présente un autre inconvénient résultant de la confusion entre, d'une part, les effets de l'engin et du bateau et, d'autre part, la position géographique. C'est pour ces raisons que cette approche devrait être évitée dans la mesure du possible.

Une autre option possible pour effectuer un échantillonnage aléatoire des débarquements d'une flottille serait de faire une sélection aléatoire de bateaux avec remplacement provenant d'une liste de toute la flottille, tel qu'il est suggéré plus loin dans le cadre des enquêtes des observateurs, à condition qu'on puisse organiser de façon pratique l'accès à des bateaux spécifiques durant leur débarquement. Cette option est plus difficile à mettre en oeuvre, mais serait meilleure si les débarquements de certains bateaux restent beaucoup plus longtemps au port que d'autres, un facteur qui biaiserait l'échantillonnage fondé sur les visites établies de façon aléatoire dans le temps. La stratification et la probabilité proportionnelle à la taille (cf. 4.1.2) fondée sur les dimensions et les activités des bateaux sont d'autres options envisageables pour échantillonner les débarquements. La population étudiée et le plan d'échantillonnage doivent tous deux être documentés dans une POS.

Les débarquements peuvent être disponibles aux fins d'échantillonnage sous plusieurs formes différentes. Les poissons peuvent être en vrac, c'est-à-dire en tas ou comme une masse dans la/les cuve(s) d'un navire, ou être disposés dans des caisses ou d'autres conteneurs. Il peut y avoir une seule espèce ou plusieurs espèces mélangées. Il peut également s'agir de poissons de différentes tailles ou catégories de fraîcheur. Les indications qui suivent visent à couvrir la plupart des circonstances qui peuvent se présenter :

- Échantillonnage de poissons en masse :

Il n'existe aucune garantie qu'une grande quantité ou une cuve de poissons soumis à l'échantillonnage soit mélangé de façon homogène ; de fait, ce sera plutôt le contraire. L'idéal serait que l'échantillonnage donne à chaque poisson une chance égale d'être inclus dans l'échantillon, mais ceci est rarement le cas dans la pratique à cause des restrictions concernant l'accès physique, le temps disponible et d'autres types de difficultés. Ainsi, pour maximiser la précision de la moyenne de l'échantillon, il faut que ce dernier soit composé de sous-ensembles de poisson pris à différents endroits de la charge, par exemple au centre et à toutes les extrémités, en surface et dans le fond. Si ceci n'est pas faisable, l'échantillonneur devra trouver d'autres moyens pratiques pour minimiser son influence sur le choix de chaque poisson de sorte que toutes les classes possibles soient représentées dans l'échantillon dans des proportions semblables à celles dans lesquelles elles se trouvent dans la masse. Les classes de poisson qui risquent d'être surreprésentées pour des raisons humaines sont les grandes, les petites, les « représentatives », celles qui attirent l'attention et celles qui ne sont pas en vue mais qui sont recherchées. Pour améliorer davantage la précision, il faudrait que le nombre de poissons inclus dans un échantillon soit élevé, mais uniquement si les poissons sont sélectionnés de façon indépendante. Le temps passé à réaliser de nombreuses mesures sur un vaste échantillon provenant d'un seul endroit de la masse serait probablement mieux utilisé si l'on essayait

d'obtenir des poissons de différents endroits en se contentant d'un échantillon plus réduit. Le nombre de poissons qui devra être prélevé dans un échantillon est commenté plus loin dans le texte.

- Espèces mélangées :

Les données des pêcheries sont rarement utiles à moins qu'elles ne soient associées à des espèces connues. Lorsqu'on est confronté à un mélange d'espèces à échantillonner, la première chose à faire est d'estimer les proportions de chaque espèce. Le mélange sera souvent présenté sous la forme d'une masse. Les commentaires énoncés plus haut sur la précision de l'échantillon s'appliqueront également dans ce cas, mais il faudra probablement prélever des sous-ensembles plus grands de poissons à chaque point de la masse afin de minimiser l'influence inconsciente de l'échantillonneur sur les espèces à inclure. Chaque sous-ensemble devrait avoir une dimension semblable. Ainsi, l'estimation de la proportion de l'espèce s dans la masse sera indiquée par les nombres, n_s , d'individus de cette espèce dans l'échantillon composé, divisés par le nombre, N , d'individus de toutes les espèces. L'échantillon peut être approprié pour estimer ensuite les caractéristiques biologiques des espèces communes, mais pas des espèces rares. Si c'est nécessaire, on prélèvera des échantillons supplémentaires, monospécifiques, en cherchant une fois encore chaque espèce à différents endroits de la masse. Les questions relatives à l'échantillonnage des prises plurispécifiques sont abordées ci-dessous en détail.

Dans certains cas, la complexité de la prise requiert un plan d'échantillonnage compliqué. C'est notamment le cas de la pêcherie de senneurs visant les thonidés tropicaux. Ces pêcheries représentent souvent une combinaison d'espèces et de types de pêche dans lesquels la déclaration des prises par espèce peut également dépendre largement de la taille des poissons. Une description de la procédure d'échantillonnage simultané pour cette pêcherie particulière est donnée plus loin comme exemple d'échantillonnage combiné. Cette procédure permet d'obtenir la composition par espèce et la distribution par taille des captures.

Dans les océans Atlantique et Indien, on a élaboré des stratégies d'échantillonnage pour les thonidés tropicaux se trouvant dans des senneurs au port (Sarralde *et al.*, 2005). Les captures plurispécifiques sont particulièrement communes lorsqu'on pratique la pêche sous DCP. Les strates se basent sur la localisation géographique des prises, sur le temps et sur l'association (ex. DCP, bancs libres), qui sont tous identifiés à partir du livre de bord et du plan des cuves. Il est préférable d'échantillonner une cuve contenant des poissons provenant d'opérations correspondant à une seule strate (situation, temps et type de banc). Dans des cas exceptionnels, selon le volume de l'échantillonnage et les prévisions faites, on considérera valide l'échantillonnage de cuves dans lesquels les opérations ne correspondront pas à une même zone géographique ou à une même strate temporelle, mais qui seront proches dans l'espace (moins de 5° de différence) ou dans le temps (moins de 15 jours de différence). Ceci dit, on ne réalisera **jamais** l'échantillonnage de cuves contenant des poissons issus de différentes associations. L'échantillonnage ne devra pas être concentré ni dans le temps (il faut échantillonner tous les mois d'un trimestre) ni dans l'espace (il faut échantillonner toutes les zones). On recommande de réaliser de 15 à 25 échantillonnages pour chaque strate.

On pourra commencer l'échantillonnage après avoir sélectionné les cuves prioritaires à échantillonner. On recommande la présence d'au moins deux personnes dans cette opération, l'une pour sélectionner et mesurer, l'autre pour inscrire les données sur les formulaires appropriés. On choisira un endroit sûr pour réaliser l'échantillonnage, on s'assurera que le déchargement se déroulera sans entrave et que l'accès aux poissons sera aisé et sûr. On peut effectuer l'échantillonnage à l'endroit où les poissons sont déchargés via le pont (moyennant l'accord du capitaine), sur le convoyeur à bande ou à l'endroit où les grands poissons sont séparés des petits poissons afin qu'ils soient mesurés séparément, en s'assurant qu'aucune présélection n'est réalisée.

L'échantillonnage de différentes parties d'une cuve (ex. le haut ou le fond) peut donner une composition différente par espèce. Pour éviter ce problème, l'échantillonnage de chaque cuve devra toujours être réalisé en deux phases, ou via un sous-échantillonnage. La première phase devra être réalisée peu de temps après l'ouverture de la cuve et la seconde plusieurs heures plus tard, mais avant la fin du déchargement.

Si le déchargement implique une sélection quelconque des espèces (par espèce ou par poids), l'échantillonneur devra prélever l'échantillon directement de la cuve. S'il n'y a pas eu de sélection, l'échantillonnage pourra être réalisé pendant le déchargement, mais toujours de façon aléatoire.

Si la cuve ne contient que des grands poissons (>70 cm), on mesurera 100 individus dans chaque phase (200 au total). Tous les individus (toutes espèces confondues) devront être pris au hasard jusqu'à ce que le nombre optimal soit atteint.

Si la cuve ne contient que des petits poissons (<70 cm), on prendra 300 individus (toutes espèces confondues) pendant la première phase de l'échantillonnage. S'il s'agit de listao, d'auxide ou de thonine, on mesurera les 25 premiers individus par espèce et on comptera le reste. S'il s'agit de thon obèse, d'albacore ou de germon, on mesurera tous les individus. Pendant la seconde phase, on mesurera et/ou comptera 200 individus selon le même procédé.

Si la cuve contient un mélange de petits et grands individus, il faudra mesurer et/ou compter un total de 300 individus (toutes espèces confondues) lors de la première phase. S'il s'agit de listao, d'auxide ou de thonine, on mesurera les 25 premiers individus par espèce et on comptera le reste. S'il s'agit de thon obèse, d'albacore ou de germon, on mesurera toutes les espèces jusqu'à ce que le nombre recommandé soit atteint. Pendant la seconde phase, on mesurera et/ou comptera 200 individus selon le même procédé. Il est indispensable de connaître le poids des deux catégories de poissons (supérieur et inférieur à 10 kg) dans la cuve. L'**Annexe 2** inclut le manuel d'échantillonnage des thons tropicaux pour les océans Atlantique et Indien.

L'échantillonnage des canneurs peut être réalisé selon la même méthode que pour les senneurs. Dans ce cas, l'unité d'échantillonnage est tout le bateau plutôt qu'une seule cuve. En général, on ne fera qu'un seul échantillonnage à moins qu'il ne s'agisse d'un grand bateau auquel cas on prélèvera deux échantillons. Si la prise est sélectionnée par taille, par espèce ou par catégorie commerciale avant le déchargement ou si elle est accessible aux échantillonneurs, on n'échantillonnera qu'une partie des poissons. On obtiendra ainsi un échantillonnage aléatoire de toutes les catégories présentes. Le nombre de catégories constituant la prise définira le nombre d'échantillons. Il faudra indiquer le poids de chaque catégorie.

A titre d'exemple, il se peut qu'on décharge le poisson frais (provenant des sorties les plus récentes) d'un côté du bateau et le poisson congelé de l'autre. Il faudra donc faire deux échantillonnages, l'un sur le poisson frais et l'autre sur le poisson congelé. Il faudra ici aussi connaître le poids des deux débarquements.

Les prises de plusieurs bateaux peuvent parfois être mélangées, par exemple lorsque des canneurs transbordent des poissons à des senneurs ou à des navires de commerce. Dans ce cas, on ne dispose d'aucune information sur la zone et sur le type de pêche. Il faudra donc réaliser un seul échantillonnage de l'ensemble du bateau.

- Poissons stockés dans des conteneurs :

Lorsque des débarquements ont été stockés dans des conteneurs, par exemple dans des caisses, il faudra échantillonner les propres conteneurs. Il est relativement facile de mettre en place un plan d'échantillonnage aléatoire basé sur des rangées ou des zones de stockage en utilisant des nombres aléatoires pour prélever le conteneur suivant et faire les mesures. Il se peut que les très grands conteneurs doivent être échantillonnés comme une masse (voir plus haut), ce qui ajoutera une phase dans le plan d'échantillonnage à plusieurs degrés (voir 4.2.2). Les poissons stockés dans des conteneurs peuvent être congelés, éviscérés, sans tête, etc. Il faut indiquer leur état et appliquer des facteurs de conversion pour estimer la condition du poisson quand il était vivant. Les facteurs de conversion qui peuvent être utiles dans les statistiques des thonidés sont indiqués à l'**Appendice 4**.

- Poissons classés par catégorie :

Les poissons classés par catégorie ou degré de fraîcheur seront probablement stockés dans des conteneurs. Ces conteneurs doivent être échantillonnés selon le procédé décrit plus haut. Il est évident qu'un échantillon qui omet une ou plusieurs catégories contiendra un important biais potentiel de sorte qu'il faudra s'assurer de la disponibilité de toutes les catégories avant de commencer les observations. Par ailleurs, il faut connaître les poids ou volumes totaux de chaque catégorie dans les débarquements afin que les résultats de chacune de celles-ci puissent être pondérés de façon appropriée dans une estimation concernant le total des débarquements.

- Pêcheries artisanales :

L'échantillonnage des prises obtenues par les pêcheries artisanales aura lieu principalement à l'endroit du débarquement ou sur la criée. En général, l'échantillonnage réalisé sur la criée réduira la précision des informations sur le lieu de pêche, mais les pêcheries artisanales opèrent d'habitude à proximité des côtes. On

pourra interroger les pêcheurs pour obtenir l'information voulue sur les techniques et les lieux de pêche. L'échantillonnage physique des prises artisanales exigera uniquement la modification des formulaires d'échantillonnage décrits plus haut. L'unité d'échantillonnage sera à l'échelle du bateau.

- Pêcheries (sportives) de prise et remise à l'eau :

Les pêcheries pratiquant la prise et remise à l'eau constituent une source additionnelle d'informations sur les taux de capture qui peut être importante dans certains pays. Les méthodes utilisées pour collecter ces informations sont décrites chez Guthrie *et al.* (1991). Par définition, l'échantillonnage biologique des pêcheries (sportives) pratiquant la prise et remise à l'eau ne peut être réalisée qu'à bord des bateaux. L'échantillonnage se conformera par conséquent à la technique qui est décrite pour les observateurs (voir infra). On signalera cependant que, sachant que les échantillons sont remis à l'eau et que la mortalité est négligeable, il existe un danger - faible mais réel - d'échantillonner deux fois le même individu s'il est capturé par la suite par une pêcherie commerciale. On recommande d'utiliser les pêcheries sportives pour le marquage et autres études biologiques (voir les sections 4.6 et 4.7).

Après avoir obtenu un échantillon de la façon la plus aléatoire possible, l'étape suivante consiste souvent à estimer les caractéristiques biologiques étudiées. Une distribution fréquence-taille (LFD) est d'habitude la première priorité pour chaque espèce (voir également la section 4.3.1). Le nombre de poissons qui doivent être mesurés dépend du nombre de modes (pics) existant dans la LFD. Dans le cas des petites tailles, ils représenteront probablement des classes d'âge successives, bien que la sélectivité des tailles de la technique de pêche affectera leurs fréquences relatives. On devra mesurer un nombre suffisant de poissons pour définir tous les modes présents. Dans la pratique, ceci signifie qu'il faudra mesurer des poissons jusqu'à ce que les modes soient identifiés, puis mesurer par exemple un autre tiers de l'échantillon existant pour voir si des modes supplémentaires apparaissent. Une définition claire de tous les modes sera d'une grande utilité pour distinguer différentes classes d'âge. Quand on voit clairement qu'il n'y a qu'un ou deux modes, un petit échantillon d'environ 50 poissons peut suffire. Lorsqu'il y a beaucoup de modes, il faudra sans doute mesurer au moins 300 poissons. Le fait d'ajuster ainsi la taille de l'échantillon en fonction des résultats obtenus exige que l'échantillon aléatoire initial contienne un excédent de poissons et soit mélangé de façon homogène. Une alternative serait de prélever des échantillons additionnels de poissons à partir des débarquements en suivant exactement le même procédé que pour le premier échantillon.

Certaines caractéristiques biologiques varient selon la taille du poisson. Il existe trois options pour estimer leur relation :

1. Estimer les caractéristiques de tous les poissons dans l'échantillon original.
2. Extraire un sous-échantillon de poissons de chaque ensemble de classes d'âge et estimer les caractéristiques uniquement³ pour ces poissons.
3. Extraire un sous-échantillon sans tenir compte de la taille et ajuster un modèle.

L'option (1) fournit l'échantillon le plus grand, mais requiert du temps et des installations pour traiter chaque poisson. Par ailleurs, les tailles les plus fréquentes pourraient être relativement surreprésentées. Smith (1989) a proposé une analyse statistique des options (1) et (2) concernant l'estimation de la composition par âge.

Les options (2) et (3) sont appropriées lorsque le sous-échantillonnage est restreint. L'option (2) est souvent utilisée pour développer des clefs d'identification âge-longueur (voir la section 4.3.6, et Westrheim et Ricker, 1978 ; Lai, 1993) en utilisant des pièces dures portant des marques annuelles (voir la section 4.9). Elle peut également être utilisée pour estimer la maturité ou le poids par longueur (voir la section 4.8). Les sous-échantillons devraient être sélectionnés de façon aléatoire dans chaque classe de taille mais, dans la pratique et pour autant que la caractéristique à estimer ne soit pas visible et n'influence pas l'échantillonneur (comme, par exemple, dans le cas de l'âge et de la maturité), les premiers poissons qu'on prélèvera de chaque classe de taille seront adéquats pour l'échantillon. Le fait de prendre un nombre fixe de poissons dans le sous-échantillon de chaque classe de taille est relativement facile à faire, mais n'est pas nécessairement la méthode la plus efficace (Kimura, 1977; Lai, 1993). Dans le cas de l'option (2), on estime une proportion par taille ou moyenne par taille séparée pour chaque classe de taille. Il n'y a pas de modèle ni de postulat majeur, mais le nombre important de valeurs à estimer peut donner une faible précision de l'échantillonnage, en particulier si les tailles du sous-échantillon sont petites. Le double échantillonnage pratiqué dans cette option complique l'analyse statistique visant à estimer les erreurs-types.

³ Thompson (1992, p143) qualifie cette option de « double échantillonnage pour stratification ».

L'option (3) exige qu'on veille à ce que le choix des poissons pour le sous-échantillon ne soit pas influencé par leur taille. L'ajustement d'un modèle pourrait requérir l'estimation d'un nombre plus limité de paramètres que l'estimation de valeurs moyennes pour de nombreuses classes d'âge (option 2), ce qui permettrait de réaliser l'estimation de façon plus précise. Les inconvénients de cette option sont qu'il faut postuler un modèle et que les groupes de tailles rares seront probablement peu représentés dans le sous-échantillon.

Observateurs

Les observateurs qui se trouvent à bord des bateaux de pêche peuvent fournir des données de grande qualité sur les quantités de la plupart ou de toutes les espèces retenues et rejetées, sur l'effort de pêche, sur les techniques de pêche, sur les stratégies et, dans certain cas, sur les caractéristiques biologiques telles que les distributions fréquence-taille (voir la section 4.10). Ils peuvent également promouvoir de bonnes communications entre les scientifiques et l'industrie. Les observateurs peuvent (ou non) jouer un rôle dans l'application des réglementations de pêche. D'un point de vue strictement scientifique, il vaut mieux qu'ils ne le fassent pas de sorte que le capitaine pêche normalement sans crainte d'être sanctionné. Les observateurs peuvent (ou non) avoir le droit d'embarquer à bord d'un bateau de pêche. S'ils ne l'ont pas, la population observable des bateaux peut être restreinte à ceux dont le capitaine et l'armateur acceptent de collaborer, ce qui pourrait entraîner un biais. Les programmes d'observateurs sont généralement coûteux parce que les observateurs doivent posséder une formation scientifique et passer de longues périodes en mer. Les observateurs doivent être supervisés au moins durant leur première sortie afin de s'assurer qu'ils identifient correctement les espèces et qu'ils effectuent l'échantillonnage biologique de façon adéquate. Ils doivent également suivre une formation en sécurité maritime et, en particulier, dans le domaine de la pêche (Luo *et al.*, 1999).

Un nombre limité de pêcheries exige la présence d'un observateur à bord de tous les bateaux. Mais, en général, les observateurs doivent choisir les bateaux et les sorties auxquelles ils vont participer pour collecter le plus d'informations possibles sur la pêche et les stocks de poissons. La « population étudiée » est mieux définie en termes de flottilles de bateaux de pêche. Pour la définir en termes de stocks de poissons, il faudrait sélectionner les sorties de sorte à échantillonner de façon égale les différentes zones géographiques occupées par le stock, ce qui représente une tâche difficile si la flottille vise certaines parties du stock, si les bateaux changent de destination pendant une sortie ou s'ils utilisent différents engins provoquant ainsi une confusion entre les variations dues à l'engin et celles dues aux nouvelles strates géographiques. Une autre complication réside dans le fait que les sorties avec observateurs que doit réaliser un bateau ne sont généralement pas connues à l'avance à cause des interférences causées par le mauvais temps, par des problèmes mécaniques, par des mauvaises prévisions de pêche, etc. Les enquêtes des observateurs suivent nécessairement une structure hiérarchisée, étant donné que les opérations (captures) s'inscrivent dans des sorties faites par des bateaux, mais des difficultés d'ordre logistique pourraient empêcher l'application d'un système d'échantillonnage à plusieurs degrés.

La première condition dans un programme d'échantillonnage avec observateurs est de disposer d'une liste de tous les bateaux de la flottille étudiée. Il se peut que l'obtention d'une liste complète exige la réalisation de recherches spéciales. Cette liste devra être actualisée avant chaque période d'échantillonnage afin de tenir compte des changements réalisés dans la flottille.

En deuxième lieu, il faut chercher des informations sur le type, la puissance et la dimension des différents bateaux, ainsi que sur l'historique de leurs activités, de leurs débarquements et de leurs prises. Ces informations doivent être examinées afin de décider s'il existe suffisamment de données fiables pour utiliser un plan d'échantillonnage stratifié ou à probabilité proportionnelle à la taille, en fonction d'un indicateur de la capacité de pêche de chaque bateau. Une enquête de ce type serait plus efficace qu'un EAS à condition que ces informations permettent de prévoir correctement les campagnes en mer à venir, en particulier pour la période d'échantillonnage suivante.

En troisième lieu, il faut décider si l'on va observer un échantillon de bateaux (unité principale d'échantillonnage) comprenant plusieurs sorties (unité secondaire d'échantillonnage) réalisées sur chacun d'eux pendant la période d'échantillonnage ou si l'on va essayer d'observer des sorties de pêche choisies au hasard parmi toutes celles qui ont été réalisées par la flottille. La première option impliquerait un plan d'échantillonnage à deux degrés qui permettrait d'estimer une variance entre les sorties et entre les bateaux ; la seconde impliquerait un échantillonnage aléatoire simple pour les sorties. L'EAS est probablement la meilleure solution dans le cas des grandes flottilles diverses et en présence d'un nombre relativement réduit d'observateurs, parce que la variation entre sorties sur différents bateaux sera probablement plus grande que la variation existant entre des sorties sur le même bateau ; c'est pour cette raison qu'il est souhaitable de faire des observations sur le nombre le plus élevé possible de bateaux. Si l'on dispose d'un nombre suffisant d'observateurs pour effectuer

des observations répétées de bateaux pendant une période d'échantillonnage ou si l'on ne peut observer qu'un nombre limité de bateaux d'une flottille, il se peut que l'échantillonnage des bateaux et des sorties soit plus intéressant lorsqu'il est réalisé suivant un plan à deux degrés en observant toutes les unités principales d'échantillonnage sur plusieurs sorties.

On peut organiser un EAS des sorties en numérotant tous les bateaux dans la flottille de 1 à V . L'utilisation de nombres aléatoires de 1 à V permet de tirer des bateaux de la liste « avec remplacement », c'est-à-dire que le même bateau peut apparaître plus d'une fois dans le tirage. Les observateurs essaient d'organiser leurs sorties dans l'ordre du tirage. Ainsi, les estimations réalisées lors des sorties peuvent être traitées comme des observations indépendantes des activités halieutiques de la flottille étant donné que chaque sortie a été sélectionnée et observée de façon indépendante. Les moyennes et les variances sont calculées à partir des estimations réalisées au niveau des sorties en utilisant les formules de l'EAS sans remplacement parce que, bien que les bateaux aient été sélectionnés avec remplacement, aucune sortie ne sera soumise plus d'une fois à l'échantillonnage. Ce plan d'échantillonnage peut être critiqué si l'on sait que certains bateaux passent plus de temps en mer que d'autres pendant la période d'échantillonnage. Dans ce cas, on pourrait utiliser un plan plus élaboré, comme la probabilité proportionnelle à la taille ou la stratification fondée sur l'activité. On pourrait organiser un échantillonnage à deux degrés comme pour l'EAS, mais peu de bateaux seraient tirés et on ferait un plus grand nombre d'observations sur chacun d'eux. Il est préférable d'établir au hasard les dates des sorties sur chaque bateau en fonction des contraintes d'ordre pratique.

Une procédure intuitive pour échantillonner des sorties consiste à se rendre dans les ports de pêche certains jours choisis au hasard pendant la période d'échantillonnage et à choisir le premier bateau qui prendra la mer. Ce plan peut être biaisé vers des bateaux qui passent plus de temps au port et, peut-être, vers ceux qui offrent les meilleures conditions en mer pour l'observateur. Ce plan n'est pas recommandé.

Une fois à bord, l'observateur recueillera des informations sur le bateau et sur l'activité de pêche en accordant une attention particulière aux données qui ne peuvent pas être estimées autrement comme les rejets et l'identification et la mesure des espèces accessoires. En ce qui concerne les espèces visées, l'observateur devra échantillonner le plus de prises possibles (sans toutefois compromettre la sécurité de l'équipage). Les poissons retenus à bord et rejetés devront être enregistrés séparément. Si l'on ne peut échantillonner que des sous-ensembles de prises, on le fera à différentes heures du jour et on essaiera d'inclure des prises de chaque zone de pêche visitée. Chaque capture peut faire l'objet d'un échantillonnage, auquel cas il faudra également estimer un facteur d'extrapolation pour extrapoler l'échantillon à une estimation de la capture totale. Ceci peut être obtenu à partir de volumes relatifs ou pour des temps relatifs sur un convoyeur à bande, etc. L'échantillonnage de la prise doit suivre les procédures décrites plus haut pour l'échantillonnage des débarquements. L'observateur doit enregistrer l'effort de pêche pour chaque opération y compris celles qui n'auront pas été échantillonnées ; une autre solution, moins satisfaisante, consiste à indiquer au moins le nombre des opérations non échantillonnées à partir des informations contenues dans le livre de bord. On pourra alors extrapoler les résultats des prises échantillonnées pour estimer les résultats de toutes les prises obtenues durant la sortie.

4.2.5 Problèmes potentiels dans les statistiques de la prise annuelle totale

Le **Tableau 4.2.1** présente les problèmes typiques concernant la collecte des statistiques de Tâche 1 au sein de l'ICCAT et les solutions possibles.

Tableau 4.2.1. Problèmes concernant les statistiques de Tâche 1.

Problèmes	Exemples	Solutions
<i>Ventilation des espèces</i>		
1. Les espèces sont déclarées ensemble. Paiement du même prix par unité de poids.	<ul style="list-style-type: none"> - Pêcheries des îles portugaises - Pêcheries de surface de l'Atlantique Est tropical (flottille française/ivoirienne/sénégalaise, Japon, Corée, E.S., etc. - Pêcherie de senneurs ex-Soviétique (tous thonidés confondus) 	<ul style="list-style-type: none"> - Encourager, éduquer, instruire et/ou obliger les pêcheurs à déclarer les captures par espèce - Faire un échantillonnage et examiner la composition par espèce de l'échantillon afin d'estimer la composition par espèce des captures
2. Erreur d'identification ou espèces non identifiables. Absence d'une clef d'identification simple et claire.	<ul style="list-style-type: none"> - Jeune albacore contre thon obèse 	<ul style="list-style-type: none"> - Trouver une clef simple et informer les pêcheurs - Faire un échantillonnage pour estimer la composition totale par espèce
3. Confusion dans les noms vernaculaires locaux.	<ul style="list-style-type: none"> - Noms espagnols du germon (bonito), de l'albacore (atún) - Noms japonais, coréens et chinois pour les makaires (makaire noir appelé localement makaire blanc, makaire bleu appelé makaire noir) - Noms portugais des thonidés (germon, thon obèse classés par taille, mais non par espèce) 	<ul style="list-style-type: none"> - Impliquer les biologistes dans l'Office central des statistiques de sorte que les responsables des statistiques se rendent compte des problèmes et identifient correctement les espèces déclarées sous des noms locaux - Former le personnel local des statistiques et les pêcheurs afin qu'ils utilisent les noms corrects dans les rapports
4. Groupes d'espèces déclarées ensemble. Absence de colonne dans les formulaires pour déclarer certaines espèces.	<ul style="list-style-type: none"> - Nombreux pays dans lesquels les pêcheries de thonidés ont peu d'importance ou une espèce a moins d'importance qu'une autre 	<ul style="list-style-type: none"> - Ajouter une colonne sur le formulaire pour consigner les espèces en question
<i>Couverture inadéquate</i>		
1. Des débarquements manquent dans certains ports. Le système d'enquête ne les couvre pas.	<ul style="list-style-type: none"> - Nombreux pays 	<ul style="list-style-type: none"> - Étendre le système des enquêtes - Visiter ces ports de façon occasionnelle pour estimer les débarquements
2. Certaines flottilles (probablement très localisées) manquent.	<ul style="list-style-type: none"> - Nombreux pays 	<ul style="list-style-type: none"> - Extrapoler les prises à une couverture de 100% en utilisant le rapport entre le nombre de bateaux couverts et non couverts
3. Les débarquements dans des ports étrangers ne sont pas couverts.	<ul style="list-style-type: none"> - Flottilles panaméennes 	<ul style="list-style-type: none"> - Obliger légalement les capitaines des bateaux à déclarer les captures
4. La prise a été destinée à la consommation familiale ou n'a pas été vendue à la criée.	<ul style="list-style-type: none"> - Pratiquement tous les pays 	<ul style="list-style-type: none"> - Faire une étude de l'échantillon pour estimer le volume
5. La prise est vendue comme faux-poisson sur le marché local.		<ul style="list-style-type: none"> - Faire une enquête à travers le personnel non gouvernemental pour faire des estimations
6. La prise est classée et déclarée avec des espèces autres que des thonidés.	<ul style="list-style-type: none"> - Nombreux pays en Méditerranée, Afrique, Amérique du sud et dans la mer des Caraïbes 	<ul style="list-style-type: none"> - Établir un système (et format) pour déclarer les thonidés - Échantillonner des espèces mixtes
7. La prise est transbordée en mer d'un bateau de pêche à un autre ou à un cargo battant ou non le même pavillon.	<ul style="list-style-type: none"> - États-Unis, Espagne, Japon, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Obliger les capitaines à déclarer les prises quel que soit le débarquement ou le transbordement - Vérifier les chargements et

		transbordements étrangers dans les ports de débarquements (ex. Porto Rico)
8. La prise est débarquée dans une zone douanière d'où elle est exportée vers un pays étranger (souvent après avoir été mise en conserve).	- Nombreux ports africains - Bateaux sous pavillon étranger qui débarquent leurs prises aux îles Canaries	- Contrôler les débarquements dans des zones douanières (ne pas utiliser les statistiques douanières)
9. La prise est traitée sur le navire gigogne et est débarquée sous forme de conserve.	- Japon, ex-URSS	- Obliger les capitaines à déclarer les prises au lieu d'utiliser les statistiques des débarquements
Pavillons		
1. Double déclaration par le pays du pavillon, le pays qui concède les licences aux bateaux, l'importateur de la prise et/ou le pays où les poissons sont transbordés.	- Flottes de la Corée, du Panama, du Japon, du Ghana etc. qui débarquent leurs prises dans des ports africains	- Les personnes concernées doivent prendre conscience du problème - Chaque pays concerné doit déclarer les prises par pavillon - Le Secrétariat surveille le flux de poissons et de flottes
2. Absence d'information concernant des bateaux qui impliquent des armateurs, opérateurs, équipages, investisseurs, concédants de licences et registres de différentes nationalités.	- Bateaux sous pavillon panaméen	- Le gouvernement des opérateurs de bateaux pourrait encourager ou demander la déclaration des prises de ces bateaux battant pavillon étranger (les prises doivent être déclarées séparément par pavillon pour éviter toute confusion).

4.2.6 Estimation et extrapolation

Estimation de la population observable

L'estimation des moyennes, des totaux et des variances à travers l'étude des livres de bord, des débarquements ou des sorties de pêche, qui est réalisée par les observateurs, peut être obtenue en appliquant les formules standard d'estimation propres au plan d'échantillonnage utilisé pour tirer les échantillons. On a donné à la section 4.2.2 des exemples de plans d'échantillonnage statistique qui correspondent aux plans repris dans les ouvrages scientifiques sur ce thème. Les statistiques estimées s'appliquent dans ce cas à la population observable (cf. section 4.2.1) sans extrapolation supplémentaire. Le fait d'utiliser des formules inappropriées, comme par exemple les formules d'échantillonnage aléatoire simple pour une probabilité proportionnelle à la taille de l'échantillon, pourrait provoquer un biais dans les résultats. On donne ci-dessous quatre exemples qui doivent clarifier ces aspects dans le contexte halieutique :

- Supposons que n débarquements sont échantillonnés de façon plus ou moins aléatoire (EAS sans remplacement) à partir de N débarquements réalisés par la flottille pendant un trimestre d'une année, et qu'on estime le nombre total de poissons, y , et les distributions fréquence-taille pour chaque débarquement observé. La moyenne par débarquement est $\bar{y} = \sum y/n$ et le nombre total estimé de poissons débarqués pour la flottille est $Y = \bar{y}N$ (Thompson, 1992, eq. 8, chapitre 2). Le facteur d'extrapolation est donc N/n . Il peut également être utilisé pour extrapoler la LFD si c'est nécessaire.
- Supposons que n sorties de pêche ont été réalisées avec des observateurs à bord durant une année et que les sorties ont été sélectionnées sans remplacement parmi N sorties réalisées par la flottille de sorte que chaque sortie a eu une chance approximativement égale d'être observée. Le facteur d'extrapolation est N/n .

3. Par comparaison avec le point 2), supposons une enquête d'observateur dans laquelle v bateaux ont été sélectionnés au hasard sans remplacement parmi V bateaux de la flottille, et où l'on a observé une seule sortie sélectionnée de façon aléatoire sur chacun d'entre eux. En premier lieu, la quantité totale capturée durant l'année par chaque bateau observé est estimée en extrapolant la quantité observée pour la sortie par le nombre annuel de sorties de ce bateau. Ensuite, le total obtenu par la flottille est estimé en extrapolant les totaux annuels des bateaux par V/v .
4. Une enquête des livres de bord dans laquelle tous les bateaux n'ont pas pu être consignés pourrait être traitée comme dans l'exemple 3). Les résultats annuels pour les v bateaux consignés devront être pris directement des livres de bord. Ils devront être extrapolés par V/v pour tenir compte des bateaux manquants.

On peut affirmer que les estimateurs applicables aux plans d'échantillonnage standard sans postulat ne constituent pas la méthode la plus précise pour estimer la population observable lorsqu'on dispose d'informations auxiliaires de qualité. Ces informations auxiliaires sont introduites dans l'estimation à travers une modélisation qui utilise un estimateur par quotient ou un estimateur de régression (Thompson, 1992, chapitres 7 et 8). Ces deux méthodes sont légèrement biaisées par le plan, mais non par le modèle.

Dans l'exemple 1), supposons que le tonnage total, W , débarqué par la flottille est connu. On peut argumenter que les tonnages relatifs, w , des débarquements pour l'échantillon de n et pour l'ensemble de la flottille donnent un facteur d'extrapolation plus précis que les nombres de débarquements parce qu'ils offrent plus d'informations sur les activités de la flottille. Un quotient sera plus approprié qu'un estimateur de régression si zéro débarquement pèse toujours zéro tonne et si les nombres positifs débarqués sont proportionnels au tonnage. L'estimation par quotient des nombres totaux débarqués est $Y_{\text{ratio}} = W \cdot \sum y / \sum w$. Le facteur d'extrapolation est $W / \sum w$.

Dans l'exemple 2), un facteur d'extrapolation fondé sur les quantités de poissons débarqués par la flottille et retenus sur n sorties observées peut sembler plus précis qu'un facteur fondé sur des nombres relatifs de sorties. Ceci dit, l'extrapolation par débarquement présente des problèmes spécifiques :

- Si l'espèce n'a pas été débarquée, il n'y aura pas de facteur d'extrapolation à moins que l'on utilise la composition plurispécifique.
- Si les quantités retenues sur les sorties observées sont faibles, le facteur d'extrapolation sera très imprécis à cause du petit diviseur.
- Si les quantités débarquées sont exprimées en poids et les poissons retenus en nombres, il faudra appliquer une conversion qui pourrait provoquer une erreur supplémentaire.
- Si l'on pense que les débarquements peuvent contenir des erreurs, les données des observateurs seront contaminées par les mêmes erreurs.

On préférera souvent l'extrapolation par l'effort de pêche relatif pour les sorties d'observateur si l'on dispose de données adéquates. Ainsi, les données extrapolées seront indépendantes des données des débarquements qui peuvent être importantes pour modéliser le stock de poissons en utilisant ces deux types de données.

Dans l'exemple 3), on pourrait utiliser l'effort relatif pour remplacer le nombre total de sorties lorsqu'on estime le total annuel par bateau, tandis que la capacité de charge relative pourrait être utilisée au lieu de V/v .

Dans l'exemple 4) du livre de bord, un facteur d'extrapolation fondé sur le nombre de bateaux consignés et de la flottille totale n'utilise aucune information relative à la capacité de pêche des différents bateaux et, par conséquent, pourrait souvent être amélioré. D'autres estimateurs pourraient se fonder sur la capacité de charge, sur le TJB, sur les jours passés en mer ou sur une autre mesure de l'effort ou encore sur les quantités d'une ou de plusieurs espèces débarquées par les bateaux consignés et par l'ensemble de la flottille. Le choix dépendra souvent de l'information disponible et du fait que cette même information est ou non utilisée de façon associée dans une analyse de la pêcherie ou du stock.

Quelles que soient l'estimation et les formules d'extrapolation qui sont utilisées dans la préparation des estimations, elles doivent être documentées dans les Procédures Opérationnelles Standard (SOP) pour le plan d'échantillonnage.

Estimation de la population étudiée

Comme on l'a déjà indiqué à la section 4.2.1, la population observable sera probablement un sous-ensemble de la population étudiée dans de nombreuses situations pratiques associées à des pêcheries océaniques et il faudra postuler (et documenter dans une SOP) un rapport entre ces deux populations. Ce rapport peut être un simple facteur d'extrapolation ou un élément plus élaboré mais, dans les deux cas, l'estimation sera simplement un exercice de modélisation qui n'impliquera pas la théorie de l'échantillonnage basé sur un plan. Les modèles devront être révisés chaque fois que de nouvelles informations seront disponibles.

Un problème d'extrapolation, habituel mais indirect, se pose lorsque la population observable de l'échantillon constitue l'ensemble ou une partie de la flottille, mais que la population étudiée est le stock de poissons dans une région géographique pendant une période donnée, par exemple dans une « strate spatio-temporelle ». Deux questions se posent alors :

1. La flottille a-t-elle pêché dans la strate spatio-temporelle de sorte à obtenir un échantillon satisfaisant du stock qui y réside ?
2. A-t-elle appliqué une partie de l'effort de pêche au-dehors de cette strate ?

La question 1) requiert l'analyse des schémas de pêche et des engins utilisés. Si la flottille a distribué son effort de façon relativement uniforme dans la strate et a utilisé le même engin de pêche, l'échantillon obtenu sera de bonne qualité. Ceci dit, il est vraisemblable qu'une partie de la flottille se soit concentrée sur des zones relativement plus petites et ait utilisé des engins différents ayant des propriétés de sélectivité différentes. Il se peut également que les schémas de pêche aient varié en fonction des saisons. Les différentes solutions pour résoudre ce problème sont les suivantes :

- Un modèle pour estimer les effets de l'échantillonnage non uniforme (Campbell, 2004). Cela vaut la peine d'envisager une approche bayésienne étant donné que cela permettra d'ajuster les distributions a priori pour les paramètres importants utilisés dans le modèle afin de refléter l'incertitude de leurs valeurs.
- Sous-pondérer les résultats des petites zones soumises à une grosse exploitation de sorte qu'elles ne dominent pas dans les estimations d'une strate spatio-temporelle.
- Compléter les données manquantes de sous-zones et sous-périodes avec des données provenant de périodes antérieures ou de strates voisines.
- Ignorer toutes les irrégularités et procéder comme s'il s'agissait d'un échantillon aléatoire.

Toutes ces options impliquent un risque élevé de biais. En outre, le biais pourrait varier au cours du temps, ce qui provoquerait une distorsion de la série temporelle. Un autre danger est que les données provenant de certaines zones utiles soient utilisées plus d'une fois, ce qui causerait une dépendance entre les résultats et exagérerait les effets des erreurs. La solution retenue et les raisons justifiant ce choix doivent être documentés dans une SOP ou dans un rapport sur la procédure d'estimation.

La question 2) est d'habitude plus facile à traiter. La meilleure solution est de désagréger les données des sorties de pêche pour obtenir des données d'opérations individuelles qui peuvent être assignées à la strate correcte. Une solution plus rapide consiste à estimer pour chaque sortie la proportion de l'effort appliqué au sein de chaque strate.

Calcul de la fraction du poids total de la prise d'une opération de pêche représentée par l'échantillonnage

Comme il est indiqué dans la section concernant l'échantillonnage des prises plurispécifiques, l'unité d'échantillonnage assignée doit être représentative de l'opération de pêche. Si la prise d'une opération est transférée dans un ou plusieurs cuves d'un senneur, il faudra calculer la proportion que représente le poids contenu dans chaque cuve par rapport à la capture totale de cette opération. C'est ce qu'on appelle une prise pondérée (Sarralde *et al.*, 2005).

La proportion de capture qui a été échantillonnée ne peut pas être calculée avant que le bateau ne soit tout à fait déchargé car la prise de cette opération est répartie dans différentes cuves et, par conséquent, pourrait avoir été échantillonné plus d'une fois.

La prise pondérée de chaque opération, qui est définie par la date de la pêche et par le nombre d'opérations, peut être calculée de la façon suivante :

$$\text{Pondération} = \frac{W1}{W2} * TW$$

où W1 est le poids de l'opération ou des opérations dans la cuve, W2 est le poids de l'opération ou des opérations de tous les cuves échantillonnés et TW est le poids total de l'opération ou des opérations.

Par exemple, un bateau a pris lors d'une opération 90 t qui ont été stockés dans trois cuves. 40 t ont été placés dans la cuve 1, 30 t dans la cuve 2, et 20 t dans la cuve 3. Les cuves 2 et 3 ont été échantillonnées.

Pour la cuve 2, la pondération est : $(30/90)*90 = 30$ t.

Pour la cuve 3, la pondération est : $(20/90)*90 = 20$ t.

$30+20=50$.

Si l'opération a été échantillonnée une seule fois (parce que les contenus complets ont été vidés dans une seule cuve ou ont été divisés dans d'autres cuves qui n'ont pas été échantillonnées), la prise pondérée sera égale à la prise totale de l'opération (pondération = TW). Les échantillons pourront ensuite être extrapolés à la prise totale d'une opération en utilisant cette pondération.

4.2.7 Bibliographie

- BEARE, D., J. Castro, J. Cotter, O. van Keeken, L. Kell, A. Laurec, J.C. Mahé, S. Munich-Peterson, J.R. Nelson, G. Piet, J. Simmonds, D. Skagen and P.J. Sparre (2002). Evaluation of research surveys in relation to management advice (EVARES). Final report of FISH/2001/02-Lot 1, DGXIV Fisheries, European Commission, Brussels. Available from a.j.cotter@cefas.co.uk.
- BOHRNSTEDT, G.W. and A.S. Goldberger (1969). On the exact covariance of products of random variables. *Journal of the American Statistical Association* 64: 1439-1442.
- CAMPBELL, R.A. (2004). CPUE standardisation and the construction of indices of stock abundance in a spatially varying fishery using general linear models. *Fish. Res.* 70(2-3): 209-227.
- COCHRAN, W.G. (1977). *Sampling techniques*. New York, J. Wiley & Sons, Inc.
- COTTER, A.J.R., G.P. Course, S.T. Buckland, C. Garrod (2002). APPS sample survey of English fishing vessels to estimate discarding and retention of North Sea cod, haddock, and whiting. *Fish. Res.* 55: 25-35.
- LUO, Z.-j, T. Tanaka, F. Kimura, M. Miyasaka, G.P. Course, A.J.R. Cotter, R.O. Jolliffe, B.J. Kay, M.S. Rolfe (1999). Safe practices for sampling commercial trawler catches at sea. *Fish. Res.* 41: 99-104.
- DAVISON, A.C. and D.V. Hinkley (1997). *Bootstrap methods and their application*. Cambridge University Press, Cambridge UK
- EFRON, B. and R.J. Tibshirani (1993). *An introduction to the bootstrap*. London, Chapman & Hall

- GAERTNER, D., P. Pallarés, J. Ariz, A. Delgado de Molina, and V. Nordström-Fonteneau (2000). Estimation de la durée des calées chez les senneurs français et espagnols opérant dans l'océan Atlantique, à partir des observations scientifiques du programme européen sur le patudo (1997-1999). Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 51(1): 402-415
- GAERTNER, D., R. Pianet, J. Ariz, A. Delgado de Molina and P. Pallarés (2003). Estimates of incidental catches of billfishes taken by the European tuna purse seine fishery in the Atlantic Ocean (1991-2000). Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 55(2): 502-510.
- GOODMAN, L.A. (1960). On the exact variance of products. *Journal of the American Statistical Association* 55: 708-713.
- GOODMAN, L.A. (1962). The variance of the product of K random variables. *Journal of the American Statistical Association* 57: 54-60.
- GUTHRIE, D., J.M. Hoenig, M. Holliday, C.M. Jones, M.J. Mills, S.A. Moberly, K.H. Pollock, and D.R. Talhelm (eds.) (1991). *Creel and Angler Surveys in Fisheries Management*. American Fisheries Society Symposium 12.
- HILBORN, R. and C. Walters (1992). *Quantitative Fisheries Stock Assessment-Choice, Dynamics and Uncertainty*, Kluwer Academic Publishers, Boston. 570.
- KENDALL, M.A. (1976). *Time-series*. London, Charles Griffin and Co. Ltd. 197.
- KIMURA, D.K. (1977). Statistical assessment of the age-length key. *J. Fish. Res. Board Can.* 34: 317-324.
- LAI, H.-L. (1993). Optimal sampling design for using the age-length key to estimate age composition of a fish population. *Fish. Bull.* 92: 382-388.
- PALLARÉS, P. and P. Dewals (1998). Análisis de los datos obtenidos en una experiencia de muestreo intensivo de una cuba durante el desembarco. Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 48(2): 213-220.
- PALLARÉS, P. and Ch. Petit (1998). Tropical tunas: new sampling scheme and data processing strategy for estimating the composition of catches by species and sizes. Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 48(2): 230-246.
- PALLARÉS, P., A. Delgado de Molina, J. Ariz and J.C. Santana (2000). Revisión de las estadísticas españolas de túnidos tropicales (1991-1996), teniendo en cuenta el tipo de asociación de las pescas. Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 51(1): 378-386.
- PINHEIRO, J. C. and D. M. Bates (2000). *Mixed-effects models in S and S-plus*. New York, Springer. 528.
- RAJ, D. (1968). *Sampling theory*. New York, McGraw-Hill.
- ROSE, G.A. and D.W. Kulka (1999). Hyperaggregation of fish and fisheries: how catch-per-unit-effort increased as the northern cod (*Gadus morhua*) declined. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 56(Suppl. 1): 118-127.
- SARRALDE, R., A. Delgado de Molina, J. Ariz, J.C. Santana, P. Pallarés, R. Pianet, P. Dewals, A. Herve, R. Dedo and J.J. Areso (2005). Port sampling procedures for tropical tuna in the Atlantic and Indian Oceans. SCRS/2005/101.
- SMITH, P.J. (1989). Is two-phase sampling really better for estimating age composition? *Journal of the American Statistical Association* 84: 916-921.
- SUKHATME, P.V. and B.V. Sukhatme (1970). *Sampling theory of surveys with applications*. Ames, Iowa, USA, Iowa State University Press.
- SWAIN, D.P. and A.F. Sinclair (1994). Fish distribution and catchability: what is the appropriate measure of distributions? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 51: 1046-1054.
- THOMPSON, S. K. (1992). *Sampling*, John Wiley & Sons, Inc. 343.
- WESTRHEIM, S.J. and W.E. Ricker (1978). Bias in using an age-length key to estimate age-frequency distributions. *J. Fish. Res. Board Can.* 35(2): 184-189.