

## MODELISATION DES RELATIONS EFFORT-CAPTURE PAR LES ESPERANCES CONDITIONNELLES.

### Inférences statistiques et normalisation des données par anamorphoses. Application à l'estimation de puissances de pêche en fonction des captures.

Nicolas Bez<sup>(1)</sup>, Jean-Claude Mahé<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Centre de Géostatistique, ENSMP, Rue St Honoré, 77305 Fontainebleau (France)

<sup>(2)</sup>IFREMER, B.P. 4240, 97500 Saint-Pierre et Miquelon (France)

---

#### RESUME

Se basant sur la dépendance fonctionnelle entre captures commerciales et efforts de pêche, les puissances de pêche globales sont estimées par le rapport des espérances conditionnelles des efforts connaissant les captures qui sont, au sens de l'écart quadratique moyen, les meilleures estimations des efforts par une fonction des captures. Les données expérimentales, constituées en variables aléatoires, sont normalisées par des transformations d'anamorphoses. Ces dernières sont décomposées en série de polynômes d'Hermite pondérés par des coefficients dont l'estimation permet l'inférence des lois de probabilité des variables. En supposant que les couples de variables aléatoires normalisées sont bi-gaussiens, les propriétés des polynômes d'Hermite sont mises à profit pour estimer les espérances conditionnelles  $E[E|C]$  ainsi que les puissances de pêche globales relatives. La démarche procède d'un aller et retour entre des données brutes et normalisées avec un contrôle graphique du comportement des données à chaque étape du modèle. Le choix d'utiliser les régressions  $E[E|C]$  plutôt que  $E[C|E]$  est discuté en terme de qualité des données (biais, déclaration à la tonne près et forte dispersion des captures ; bonne précision et homogénéité relative des déclarations d'effort). Des résultats pertinents apparaissent quant à la valeur et la forme des puissances de pêche en fonction des captures.

#### ABSTRACT

Based on a functional dependence between commercial catches and fishing efforts, global fishing powers are estimated as the ratio of expected values of efforts knowing catches which are, from the point of view of the mean square error, the best estimations of efforts through a function of catches. Experimental data, considered as random variables, are normalized using anamorphoses functions. These functions are expressed by a set of Hermite's polynomials weighted by coefficients which estimations allow the inference of the variables distributions. Assuming that the couples of random variables are bi-normal, the properties of the Hermite's polynomials are used to estimate the expected values  $E[E|C]$  and the global relative fishing powers. The proceeding lies on a back and forth transformation between raw and normalized data with graphical control of their behaviour at each step of the model. The choice between the two regressions  $E[E|C]$  or  $E[C|E]$  is discussed in terms of quality of the data (bias, high dispersion and rounding to the nearest ton of the catches data - good precision and relative homogeneity of the effort data). Relevant results are obtained in the values and shapes of the fishing powers as function of catches.

## INTRODUCTION

La gestion des stocks halieutiques fait implicitement référence à une relation entre la mortalité par pêche des espèces cibles et l'effort déployé par les pêcheurs pour leurs captures. Cette relation fondamentale est souvent complexe (Laurec et Le Guen, 1981) et la situation idéale où la mortalité par pêche serait simplement proportionnelle à l'effort nominal existe peu dans la pratique. La définition d'un effort, dit effectif, vise à se rapprocher de la mortalité par pêche en corrigeant l'effort nominal. Il reste qu'une quantité de travail fixée n'a pas la même incidence sur le stock selon les navires. Ces variations sont associées à la notion de puissances de pêche et doivent être prises en compte dans les relations entre effort et mortalité par pêche.

Les puissances de pêche sont définies par la "comparaison des captures obtenues dans des situations analogues" (Laurec et Le Guen, 1981). Pour des captures réalisées dans des conditions identiques d'abondance, on parle de puissances de pêche locales. Dans la pratique, on ne dispose jamais de données obtenues rigoureusement dans les mêmes conditions (même endroit et même moment). L'estimation des puissances locales n'est donc possible qu'en utilisant des modèles appropriés qui décrivent la répartition spatiale des espèces cibles (variogrammes par exemple). A l'aide de ces modèles, il est envisageable de comparer des captures obtenues au même moment en différents points de l'espace et d'obtenir une estimation des puissances de pêche locales (Laurec, 1977).

Une autre solution consiste à comparer les prises par unité d'effort (PUE) moyennes disponibles sur des strates spatio-temporelles. Dans la mesure où l'abondance de l'espèce cible peut être supposée constante au sein de chaque strate, la comparaison des PUE moyennes fournit une approximation des puissances de pêche locales. Dans le cas contraire, soit parce que les fluctuations d'abondances sont trop importantes, soit parce que les strates sont trop grandes, on parle de puissance de pêche globales. Cette distinction entre puissances locales et globales qui porte sur l'échelle des comparaisons de PUE, s'exprime aussi en termes d'effort de pêche et d'accessibilité du poisson (Gascuel, 1994).

Pour extraire une estimation de puissance de pêche des PUE disponibles pour  $S$  strates et  $N$  bateaux, on a habituellement recours aux modèles multiplicatifs. Ces modèles supposent que les PUE s'expriment par le produit d'une puissance de pêche et d'un indice d'abondance par strate (modèles multiplicatifs à deux facteurs ; Robson, 1966) ou par le produit des trois facteurs puissance de pêche, abondance et indice annuel (Laurec et Fonteneau, 1979 ; Gavaris, 1980). Dans ce cadre, les estimations résultent d'une régression linéaire multiple des  $N \times S$  PUE dans un espace à  $N + S$  dimensions. Les puissances sont ensuite interprétées par des variables de type longueurs des navires, puissances motrices, âge du navire...

L'existence de relations différentes selon les navires entre captures et efforts amène à penser que les efficacités relatives des bateaux ne sont pas constantes quelque soit la valeur de l'effort. On peut envisager, par exemple, qu'un chalutier augmente en moyenne ses PUE avec l'effort quand un autre, dans la même strate, les diminue ; la puissance de pêche relative du premier chalutier augmentant avec l'effort. La

détermination de puissance de pêche par un coefficient peut ne pas suffire. On propose de construire des puissances de pêche qui s'expriment par une fonction des efforts, ou encore, par une fonction des captures comme c'est le cas ici.

Les puissances de pêche seront définies par le rapport des efforts de pêche de deux navires nécessaires à l'obtention, en moyenne, d'un même niveau de capture. Un chalutier sera de ce point de vue, d'autant moins efficace qu'il lui faudra plus de temps pour capturer une quantité de poissons donnée. Cette approche nécessite de connaître, pour chacun des navires, la dépendance fonctionnelle entre capture et effort. Pour cela, on propose l'utilisation des espérances conditionnelles dont l'une des propriétés est d'être, au sens de l'écart quadratique moyen, la meilleure estimation d'une variable par la fonction d'une autre variable.

Le modèle est construit en trois étapes. Une phase mono-variable de normalisation des données, une phase bi-variable d'estimation des espérances conditionnelles dont on prendra le rapport dans la dernière phase. Une application à la flottille de Saint-Pierre et Miquelon est proposée ensuite.

## 1 - MODELE D'ESTIMATION DES FONCTIONS PUISSANCES DE PECHE

### 1.1 - Phase monovariante : normalisations par anamorphoses et inférences statistiques

#### - Définition des anamorphoses

Pour un bateau "k", chaque couple d'observations de capture et d'effort est considéré comme une réalisation  $(c_{ki}, e_{ki})$  d'un couple de variable aléatoire  $(C_k, E_k)$ . On suppose que ces réalisations sont indépendantes, ce qui amène à négliger d'éventuelles corrélations spatio-temporelles entre les captures  $c_{ki}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) d'un côté et les efforts  $e_{ki}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) de l'autre. De plus, on suppose que les fonctions de répartition des variables aléatoires  $C_k$  et  $E_k$  sont inversibles et, qu'il n'y a pas d'interaction entre les navires ; c'est-à-dire que les couples  $(C_k, E_k)$  sont indépendants :

$$\text{Cov}(E_k, E_{k'}) = \text{Cov}(C_k, C_{k'}) = \text{Cov}(C_k, E_{k'}) = 0 \quad \text{pour } k \neq k'$$

(lorsque l'indice k n'est pas nécessaire, il sera omis).

Les données sont normalisées par des transformations d'anamorphose qui assurent de façon bijective la correspondance entre les valeurs prises par une variable aléatoire continue de loi quelconque inversible et les valeurs, de même fréquence cumulée, d'une variable aléatoire gaussienne centrée réduite de fonction aléatoire notée G.

Les fonctions d'anamorphose notées  $\Phi_C$  et  $\Phi_E$ , correspondent à la transformation des variables normalisées  $C_{tr}$  et  $E_{tr}$  en variables de départ C et E. Les fonctions inverses sont notées  $\phi_C$  et  $\phi_E$ . L'expression analytique de fonctions d'anamorphose est donnée par :

$$(1) \quad \Phi_E(e_{tr}) = F_E^{-1} \circ G(e_{tr}) = e \quad \text{avec} \quad F_E(e) = G(e_{tr})$$

Une variable aléatoire étant entièrement déterminée par sa fonction d'anamorphose, l'inférence statistique qui consiste généralement en la détermination des fonctions  $F_C$  et  $F_E$  porte ici sur les fonctions d'anamorphoses. Ces dernières sont, par construction, des fonctions de carré intégrable pour la loi de Gauss, et peuvent à ce titre se décomposer en série de polynômes d'Hermite (Cramer, 1966) :

$$(2) \quad H_n(x) = g^{(n)}(x) / g(x) \text{ où } g \text{ représente la densité de Gauss centrée réduite}$$

$$(3) \quad \Phi_E(e_{tr}) = \sum_{n=0}^{+\infty} \{\Phi_{E,n}/n!\} \cdot H_n(e_{tr})$$

L'inférence des lois de probabilités des variables aléatoires C et E, ramenée dans un premier temps à celles des fonctions d'anamorphoses, aboutit finalement à la détermination des coefficients  $\Phi_{E,n}$  et  $\Phi_{C,n}$ .

Les fonctions inverses  $\phi_C$  et  $\phi_E$  ne peuvent pas être développées en séries de polynômes d'Hermite car elles ne sont pas systématiquement de carré intégrable pour la loi de Gauss. Cependant, en tant que fonctions continues, elles peuvent être approchées par une fonction polynomiale de type :

$$(4) \quad \phi_E(e) = \sum_{n=0}^{+\infty} \phi_{E,n} \cdot e^n$$

**- Construction expérimentale des anamorphoses.**

Soit  $f_i$  les fréquences cumulées d'apparition des valeurs expérimentales  $e_i$  (pour la variable E par exemple) rangées par ordre croissant. Elles correspondent, au rang près, aux valeurs de la fonction de répartition empirique  $F^*_E(e_i)$  définies par la probabilité d'obtenir une valeur strictement inférieure à  $e_i$  :

$$F^*_E(e_i) = P\{E < e_i\} \approx f_{i-1}$$

Par définition, les anamorphoses sont construites en associant à toute valeur  $e_i$ , une valeur gaussienne  $e_{i,tr}$  de même fonction de répartition. En outre, pour la plus petite valeur d'effort  $e_1$ ,  $F^*_E(e_1) = 0$  et la valeur gaussienne correspondante  $e_{1,tr}$  serait  $-\infty$ . L'indétermination peut être levée en "associant à une valeur  $e_i$ , toute valeur gaussienne  $e_{i,tr}$  appartenant à l'intervalle  $[e_{i,tr}; e_{i+1,tr}]$ " (Lantuéjoul et Rivoirard, 1984).

Cette valeur est choisie de façon homogène en prenant la moyenne pondérée de l'intervalle :

$$(5) \quad e_{i,tr} = \frac{\int_{e_{i,tr}}^{e_{i+1,tr}} x g(x) dx}{\int_{e_{i,tr}}^{e_{i+1,tr}} g(x) dx} = \frac{\int_{e_{i,tr}}^{e_{i+1,tr}} x g(x) dx}{G(e_{i,tr}) - G(e_{i+1,tr})} = \frac{-e_{i,tr}^{1/2} - e_{i+1,tr}^{1/2}}{(2\pi)^{1/2} (G(e_{i+1,tr}) - G(e_{i,tr}))}$$

### - Estimation des coefficients $\Phi_n$

Dans le cadre théorique d'une variable aléatoire continue de loi, et par conséquent de fonction d'anamorphose  $\Phi$  connue, les coefficients  $\Phi_n$  sont définis par :

$$(6) \quad \Phi_n = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(x) \cdot H_n(x) \cdot g(x) dx$$

La fonction  $\Phi$  est inconnue en pratique. On en connaît cependant une estimation qui est constante sur les intervalles de type  $[e_{i, \text{tr}} ; e_{i+1, \text{tr}}[$  et les coefficients  $\Phi_{E,n}$  sont estimés par (Lantuéjoul et Rivoirard, 1984) :

$$(7) \quad \Phi_{E,n}^* = \sum_{i=2}^{+\infty} (e_{i-1} - e_i) \cdot (1/n^{1/2}) \cdot H_{n-1}(e_{i, \text{tr}}) \cdot g(e_{i, \text{tr}}) \quad \text{pour } n \text{ non nul}$$

$$(8) \quad \Phi_{E,0}^* = E^*[E] \quad (\text{moyenne empirique des efforts})$$

Dans la pratique, les développements en série des anamorphoses sont tronqués. Le nombre de polynômes entrant dans le développement doit cependant être suffisant pour modéliser correctement les anamorphoses empiriques et rendre compte de la variabilité des données expérimentales. La variance de  $E$  est donnée par :

$$(9) \quad \text{Var}\{E\} = \text{Var}\{\Phi_E(E_{\text{tr}})\} = \sum_{n=1}^{+\infty} \Phi_{E,n}^2 / n!$$

Ainsi, le pourcentage que représente la somme pondérée des carrés des premiers pondérateurs  $\Phi_n$  par rapport à la variance des données expérimentales permet de choisir la hauteur de la troncature.

### - Estimation des coefficients $\Phi_n$

Les coefficients  $\phi_n$  du développement des fonctions d'anamorphose inverses, sont déterminés par l'ajustement, selon les moindres carrés, d'un polynôme du sixième degré aux valeurs expérimentales.

## 1.2 - Phase bi-variable : estimations des espérances conditionnelles $E[E|C]$ .

Dans cette partie, on suppose que le couple de variables aléatoires  $(C_{\text{tr}} ; E_{\text{tr}})$  est bi-gaussien de coefficient de corrélation  $\rho$  (il ne suffit pas que chacune des variables soit gaussienne pour que la loi du couple soit également gaussienne). On montre (Cramér, 1966) que l'expression analytique de l'espérance conditionnelle est alors :

$$(10) \quad E[E | C] = E[\Phi_E(E_{\text{tr}}) | \Phi_C(C_{\text{tr}})] = \sum_{n=0}^{+\infty} \{\Phi_{E,n} / n!\} \cdot \rho^n \cdot H_n(\phi_C(C))$$

Cette expression dépend des pondérateurs de l'anamorphose des efforts, du coefficient de corrélation  $\rho$  entre les variables transformées, et des pondérateurs de l'anamorphose inverse des captures. On la note synthétiquement :  $E[E | C] = \Phi_{E,\rho} \circ \phi_C$  (C)

Sa démonstration est basée sur le fait que l'espérance mathématique est un opérateur linéaire ( $E[\sum H_n(E)] = \sum (E[H_n(E)])$ ), sur l'orthogonalité des polynômes d'Hermite pour la loi de Gauss (Cramér, 1966) et sur le caractère bijectif des anamorphoses.

Ainsi, si le couple  $(C_{tr}, E_{tr})$  peut raisonnablement être considéré comme bi-gaussien, la connaissance des deux anamorphoses et du coefficient de corrélation, entraîne celle de l'espérance conditionnelle.

La bi-normalité du couple  $(C_{tr}, E_{tr})$  est appréciée par l'allure du nuage de corrélation qui doit s'inscrire dans une ellipse (proche d'un cercle en absence de corrélation) ainsi que par la linéarité des valeurs moyennes  $E_{tr}$  par classe de valeurs de  $C_{tr}$ , et inversement. On utilise des classes régulières de 0,5 unité et des regroupements en classes de mêmes densités (tranches de 25 observations). Dans les cas favorables, les variables étant centrées et normées, le coefficient de corrélation  $\rho$  est estimé par la pente de la droite de régression calculée selon les moindres carrés sur l'ensemble des données anamorphosées.

### 1.3 - Estimation des Fonctions Puissance De Pêche (F.P.D.P.).

L'ensemble des couples captures-efforts sont notés  $(C_k, E_k)$  pour le bateau k;  $C_0$  et  $E_0$  pour le navire choisi comme référence. Les puissances de pêche relatives en tant que fonctions des captures sont estimées par le rapport des espérances conditionnelles correspondantes :

$$(11) \quad \Delta_k(c) = \frac{E[E_0 | C_0 = c]}{E[E_k | C_k = c]} = \frac{\Phi_{E_0,\rho_0} \circ \phi_{C_0}(c)}{\Phi_{E_k,\rho_k} \circ \phi_{C_k}(c)}$$

## 2 - APPLICATION A LA FLOTTILLE DE SAINT-PIERRE ET MIQUELON EN 1991

Les données sont extraites de la base de données de la station IFREMER/Saint-Pierre et Miquelon. Les captures sont estimées à partir des statistiques de débarquement désagrégées dans l'espace et dans le temps proportionnellement aux déclarations portées sur les log-books. Seules les captures de morues des traits ciblés sur cette espèce ont été retenues. L'étude concerne la subdivision 3Ps de la NAFO (Northwest Atlantic Fisheries Organization) pour l'année 1991. Les temps de traîne sont supposés exacts et repris tels qu'indiqués dans les "log-books". L'armement Interpêche, basé sur l'archipel, comprenait cette année là sept chalutiers (cinq "pêche fraîche" (PF) et deux congélateurs (C)). Certains sont identiques du point de vue des

critères utilisés pour analyser les puissances de pêche des navires (Tabl.1) : le Saint-Denis (PF) et le Saint-Pierre (C) ou encore la Goëlette (PF) et la Normande (PF). En 1991, les captures des deux chalutiers de Miquelon (Marmouset et Côte St-Jacques) étaient transformées en morues salées.

Les captures sont comprises entre 0 et 40000 kg. Selon les navires, leurs moyennes oscillent entre 3030 kg (Marmouset) et 5500 kg (Saint-Denis), leurs médianes entre 2000 et 4500 kg. Sur l'ensemble des chalutiers, 2 % des plus fortes captures assurent 10 % du total des prises. Les efforts de pêche sont distribués de façon plus homogènes entre 0 et 6 heures de traîne, leurs moyennes variant entre 3,07 (Saint-Pierre) et 3,58 heures (Normande). Le nombre de points entrant dans la construction des nuages de corrélation varie entre 471 (Marmouset) et 566 (Saint-Pierre). L'organisation générale des nuages en forme de dôme se retrouve pour chaque navire (Fig.1) : les fortes captures (supérieures à 10000 kg) étant associées en majorité à des efforts de pêche moyens (2 à 5 heures).

Nom	Type	Date de construction	Longueur totale hors tout (m)	Puissance motrice (KW)	Jauge brute (tonneaux)
Marmouset	Pêche fraîche	1971	50	1325	634
Côte St Jacques	Pêche fraîche	1972	48.8	1472	451.7
Goëlette	Pêche fraîche	1974	46.3	1472	690
Normande	Pêche fraîche	1974	46.3	1472	690
Bretagne	Congélateur	1983	50	1808	771
Saint Denis	Pêche fraîche	1989	50	2208	837.1
Saint Pierre	Congélateur	1989	50	2208	837.1

Tableau 1 : Caractéristiques des chalutiers de Saint Pierre et Miquelon

### 2.1 - Normalisation des données expérimentales - Inférences des lois de probabilité.

Les anamorphoses empiriques des efforts (Fig.2) s'organisent autour d'une tendance linéaire marquée. Elles sont légèrement concaves aux extrémités et convexes pour les valeurs intermédiaires de l'intervalle  $[-1,5,1,5]$ . Leur ajustement par une somme de dix polynômes d'Hermite rend compte au moins de 95 % de la variance expérimentale des efforts de chaque navire (Tabl.2). Le deuxième polynôme (de degré 1), en explique 90,9 à 98,4 %. Les degrés suivants du développement permettent une amélioration de la qualité de l'inférence des lois de probabilité des variables aléatoires  $E_k$  de 1,6 % en moyenne pour  $H_2$  et 0,03 % pour  $H_3$ .

		φ0	φ1	φ2	φ3	φ4	φ5	φ6	φ7	φ8	φ9	φ3	φ4	φ5	φ6	φ7	φ8	φ9
Bretagne	Capture	4572.9	-4247	2150.6	-375	-1334	2014.2	641.19	-7018	5453.6	28882	-2.145	0.0015	-3E-07	4E-11	-3E-15	9E-20	-1E-24
	% variance	-	72.14	81.39	81.49	81.78	81.92	81.92	81.96	81.96	81.97	-3.574	3.1374	-1.725	0.5095	-0.061	0.002	6E-05
	Effort	3.22	-1.113	-0.095	0.04	0.219	0.0474	-0.348	-0.041	-0.119	0.1023	-2.086	0.0012	-2E-07	3E-11	-1E-15	4E-20	-5E-23
Saint - Pierre	Capture	4856	-4394	2119.5	-379.4	-1121	1648.4	376.63	-5493	3533.7	21871	-3.342	4.2336	-3.755	1.7408	-0.401	0.0464	-0.002
	% variance	-	76.93	85.88	85.98	86.18	86.27	86.28	86.30	86.31	86.31	-1.981	0.0017	-1E-07	5E-11	-4E-15	1E-19	-1E-24
	Effort	3.0752	-1.068	-0.15	0.0287	0.2281	0.2168	-0.367	-0.937	0.0945	4.1103	-3.378	1.4768	0.1011	-0.415	0.1749	-0.027	0.0015
Marnauzeac	Capture	3033.2	-2757	1468.1	-620.6	18.216	176.81	97.519	-498.04	-5052	9523.9	-1.475	0.001	-2E-07	1E-11	-6E-16	1E-20	-9E-26
	% variance	-	67.14	76.66	77.22	77.22	77.23	77.23	77.23	77.23	77.24	-3.517	2.2233	-0.694	0.0701	0.0284	-0.007	0.0005
	Effort	3.526	-1.023	-0.128	-0.028	0.1704	0.198	-0.312	-0.43	0.6748	1.1639	-1.746	0.0008	-1E-07	7E-12	-3E-16	4E-21	-3E-26
Côte St-Jacques	Capture	3532	-3806	2468.3	-1386	176.14	1363.4	-2776	1545.3	5980.5	-15887	-4.839	5.1728	-4.041	2.0158	-0.602	0.1019	-0.007
	% variance	-	61.69	73.94	75.39	75.29	75.36	75.40	75.40	75.41	75.41	-1.568	0.0009	-1E-07	9E-12	-4E-16	7E-21	-5E-26
	Effort	3.28	-1.136	-0.07	0.0939	0.1113	0.006	-0.317	0.1358	1.2662	-2.094	-5.358	7.4477	-6.739	3.4676	-0.995	0.1503	-0.009
Gosletie	Capture	4528.6	-4919	3257.1	-1766	-397.8	3288	-1105	-3799	20394	-12971	-1.431	0.0011	-2E-07	3E-11	-1E-15	4E-20	-4E-25
	% variance	-	62.07	75.67	77.01	77.02	77.26	77.32	77.32	77.35	77.35	-3.394	1.7343	-0.915	0.4507	-0.147	0.028	-0.002
	Effort	3.4746	-0.864	-0.239	-0.004	0.2537	0.232	-0.415	-0.74	0.6619	2.0548	-1.746	0.0008	-1E-07	7E-12	-3E-16	4E-21	-3E-26
Normandie	Capture	3841.9	-4060	2176.3	-412	-857.5	590.91	1278.5	-1532	-5444	15150	-4.839	5.1728	-4.041	2.0158	-0.602	0.1019	-0.007
	% variance	-	72.28	82.67	82.80	82.93	82.94	82.95	82.95	82.96	82.96	-1.746	0.0008	-1E-07	7E-12	-3E-16	4E-21	-3E-26
	Effort	3.5809	-0.801	-0.222	-0.052	0.1971	0.124	-0.086	-0.139	-0.37	0.0098	-4.839	5.1728	-4.041	2.0158	-0.602	0.1019	-0.007
Saint - Denis	Capture	5499.9	-5199	2721.2	-1100	267.08	-20.17	-1469	6765.3	-8887	-26187	-1.746	0.0008	-1E-07	7E-12	-3E-16	4E-21	-3E-26
	% variance	-	70.97	80.69	81.22	81.22	81.22	81.22	81.26	81.26	81.27	-4.839	5.1728	-4.041	2.0158	-0.602	0.1019	-0.007
	Effort	3.165	-0.746	-0.163	-0.013	0.145	0.1307	-0.04	-0.277	1.295	0.8814	-1.746	0.0008	-1E-07	7E-12	-3E-16	4E-21	-3E-26

Tableau 2 : Coefficients  $\phi_n$  du développement en somme de polynômes d'Hermite des fonctions d'anamorphoses expérimentales - Pourcentage de la variance empirique prise en charge par la modélisation - Pondérateurs  $\phi_n$  de l'ajustement des anamorphoses inverses par un polynôme de degré 6.



Les anamorphoses des captures (Fig.3) ont des allures de courbes concaves et présentent de fortes irrégularités pour les grandes valeurs de captures normalisées ( $> 1,5$ ). Leur ajustement par une somme de 10 polynômes d'Hermite permet de rendre compte de 75,4 à 83 % de la variance empirique des captures, soit 17 % de moins que pour les efforts (Tabl. 2). Le gain moyen apporté par le troisième polynôme d'Hermite ( $H_2$ ) est 10,6 %. Il est de 0,59 % pour  $H_3$  et 0,09 % pour  $H_4$ .

## 2.2 - Bi-normalité des couples de variables aléatoires normalisées.

Les nuages de corrélation des chalutiers Bretagne, Saint-Denis et Saint-Pierre s'inscrivent globalement dans une ellipse indiquant une corrélation entre les captures et l'effort de ces navires (Fig.4). L'axe de l'ellipse a dans le cas du Saint-Denis une pente négative. Pour les autres chalutiers (Côte Saint-Jacques, Goélette, Marmouset, Normandie) le nuage de corrélation forme approximativement un cercle ou, tout au moins ne fait pas apparaître d'orientation préférentielle.

Les efforts moyens par classes de captures présentent de faibles fluctuations autour d'une tendance linéaire nette proche des axes (Fig. 5). Les captures moyennes par classes d'effort ont des variations importantes. Basées sur un regroupement en classes régulières, leurs évolutions sont globalement linéaires en dehors des classes extrêmes qui ont un effet déstructurant.

Les pentes estimées par les différentes régressions linéaires sont comprises entre -0,15 et 0,31 (Fig.5). Elles sont légèrement négatives pour la Normandie (-0,05) et le Saint-Denis (-0,1). Pour le reste, le coefficient de corrélation des variables normalisées est estimé à 0,31 pour la Bretagne ainsi que le Saint-Pierre, 0,21 et 0,17 pour le Marmouset et la Côte Saint-Jacques.

## 2.3 - Espérances conditionnelles et puissances de pêche en fonction des captures

L'espérance conditionnelle qui présente le plus de variation en fonction des captures est observée pour la Bretagne dont on estime qu'il passe de 2 heures et demi en moyenne pour des captures presque nulles à 4 heures pour capturer 20000 Kg (Fig.6). Deux autres chalutiers présentent la même forme d'espérance conditionnelle : le Saint-Pierre par valeurs inférieures et le Marmouset, par valeurs supérieures. Les quatre bateaux restant constituent deux groupes. L'espérance conditionnelle du Saint-Denis est décroissante de 3,3 à 3 heures pour des captures allant de 0 à 20000 Kg, ainsi que celle de la Normandie dont l'effort moyen est supérieur d'une demi-heure par rapport au précédent. Les espérances conditionnelles estimées du Côte Saint-Jacques et de la Goélette sont sensiblement égales.

Tous bateaux confondus, les estimations des Fonctions Puissances De Pêche relatives au Bretagne évoluent entre 0,6 et 1,4. Elles sont croissantes entre 0 et 20000 Kg (Fig. 7). Ainsi, chaque chalutier augmente sa puissance de pêche par rapport au

Bretagne quand les captures augmentent. En dehors du Saint-Pierre dont la puissance de pêche est toujours supérieure à celle du Bretagne, les chalutiers ont une efficacité de pêche inférieure au bateau de référence pour les petites captures (< 2500 Kg). Les trois navires Normande, Goélette et Côte Saint-Jacques ont quantitativement et qualitativement les mêmes Fonctions Puissances De Pêche relatives passant de 1 à 1,15 pour des captures allant de 5000 à 15000 Kg. Les Fonctions Puissances De Pêche du Marmouset et du Saint-Pierre évoluent de la même façon respectivement en-dessous et au-dessus du Bretagne. Enfin, le Saint-Denis est le chalutier le plus efficace au delà de 4000 Kg. Sa puissance de pêche relative vaut 1,4 pour 20000 Kg.

### 3 - DISCUSSION

#### 3.1 - Les hypothèses implicites du modèle.

Le modèle concerne des variables aléatoires continues de lois quelconques inversibles. Dans la mesure où "les observations de captures et d'efforts ont une variabilité incontrôlable" (Richards et Schnute, 1992), c'est-à-dire que les actions de pêche sont de durée variable et qu'elles conduisent à des résultats fluctuants, on peut raisonnablement considérer que les données expérimentales sont les réalisations de variables aléatoires. Ces réalisations sont supposées indépendantes en négligeant les corrélations spatio-temporelles des captures d'une part et des efforts d'autre part. Cependant, la morue (espèce-cible) ayant un comportement grégaire, il est probable que les captures sont corrélées dans l'espace et le temps, tout du moins à l'échelle de travail de cette étude.

La continuité physique des captures pourtant réelle (tous les niveaux de captures entre 100 et 10<sup>1</sup> kg par exemple sont observables), n'apparaît pas dans les déclarations qui se font à la tonne près. De même, les temps de pêche correspondent généralement à des heures "rondes" donnant l'impression d'une variable discrète. On peut donc considérer que les indications des log-books sont des versions discrètes de variables fondamentalement continues.

Les fonctions de répartition des variables aléatoires sont inversibles si elles sont continues et strictement monotones. Ceci est contrôlable graphiquement par l'absence de "palier" ou de "saut". Enfin, en négligeant l'ensemble des phénomènes de coopérations et de compétitions qui apparaissent généralement dans les pêcheries, on peut supposer que les couples de variables aléatoires sont indépendants.

#### 3.2 - Qualités des données. Quelles régression choisir : $E[E|C]$ ou $E[C|E]$ ?

Contrairement aux efforts, les captures estimées *de visu* à la tonne près sont entachées d'erreurs. La comptabilisation de l'ensemble des prises d'une marée (15 jours pour les "pêche fraîche" et un mois pour les congélateurs) permet d'estimer le rapport qui existe entre la somme des déclarations et le cumul des prises effectives (les

rejets ne sont pas pris en compte). Ce rapport est ensuite affecté aux déclarations de sorte que les données sont bonnes en moyenne par marée. Par ce procédé, les quelques valeurs extrêmes de captures sont multipliées par le même coefficient que l'ensemble des données. Les queues de distribution sont donc modifiées. Toute transformation tendant à limiter l'influence de ces quelques valeurs de queues de distribution est, de ce point de vue, souhaitable : la normalisation par anamorphose remplit entre autre cet objectif.

Compte tenu de la qualité respective des données, il apparaît plus judicieux de faire intervenir les captures au travers d'un regroupement en classes plutôt que pour l'estimation d'une moyenne. On préférera donc observer la relation entre les variables, au travers de l'évolution des efforts moyens par classe de capture. D'autant plus que les coefficients de variation par classe sont deux fois plus forts pour les captures que pour les efforts. Les moyennes d'effort étant alors plus représentatives des observations au sens où la dispersion des données autour des tendances centrales est plus faible et homogène.

Sous couvert de bi-normalité des couples, les espérances conditionnelles sont construites par un "aller-retour" entre les données brutes et les données normalisées. Plus précisément, elles font appel à la fonction  $\phi$  d'une variable (aller) et à la fonction  $\Phi$  de l'autre (retour). L'ajustement des fonctions  $\phi$  par un polynôme du sixième degré selon les moindres carrés est sensiblement de la même qualité pour les efforts et les captures. Par contre, les écarts de pourcentage de variance expliquée par la modélisation (Tabl. 2), indiquent que l'ajustement des anamorphoses empiriques est de meilleure qualité pour les efforts que pour les captures. Ces dernières présentent des irrégularités importantes vers les captures élevées (Fig. 3) que les anamorphoses ne parviennent pas à prendre en charge. En outre, des ajustements basés sur une vingtaine de polynômes d'Hermite n'ont pu améliorer sensiblement la qualité de la modélisation. L'inférence statistique de  $E[E|C]$  apparaît ainsi plus pertinente que celle de  $E[C|E]$ . Concernant une autre flottille, Richards et Schnute (1992) arrivent à la même conclusion.

### 3.3 - Bi-normalité des couples ( $C_{k,t}, E_{k,t}$ ).

En dehors de quelques points marginaux parmi les 500 environ que comptent les nuages de corrélation, les 7 couples de variables aléatoires anamorphosées ne semblent pas s'écarter notablement de la bi-normalité puisque les nuages de corrélation s'inscrivent dans des ellipses. Les moyennes par classes s'organisent globalement de façon linéaires pour ce qui concerne la régression des efforts normalisés en fonction des captures normalisées. On constate cependant un effet déstructurant des dernières classes régulières, mais la forte majorité des observations, une fois transformées, semble se comporter de façon bi-gaussienne. L'hypothèse est plus difficile à justifier lorsqu'elle se base sur l'évolution des captures moyennes par classes d'efforts normalisés. Les variations numériques sont importantes, les tendances peu claires et les dernières classes souvent en opposition.

Le choix du bateau de référence est probablement inopportun. Le Bretagne est en effet le bateau dont l'espérance conditionnelle est la plus fluctuante. Le choix ne justifie cependant pas le fait que les résultats de cette étude ont pu être comparés à ceux proposés par le modèle de Robson utilisant également le Bretagne comme bateau de référence (Bez et Moguedet, 1992).

En formulant l'hypothèse de binormalité des couples de variables aléatoires transformées, on décide de faire porter la notion de puissances de pêche sur le comportement le plus fréquent des navires. C'est-à-dire qu'on choisit de ne pas accorder trop d'importance à l'information portée par les valeurs extrêmes. Parmi elles, les plus fortes valeurs de capture représentent 2 % des observations et assurent 10 % du total des prises en moyenne pour les 7 bateaux. On aurait pu choisir de définir les puissances de pêche par la comparaison du comportement des navires dans ces conditions "exceptionnelles" mais très peu nombreuses bien qu'importantes pour le résultat commercial des flottilles. Cependant, les réserves émises quant à la qualité des données de captures, sont un argument pour une approche basée sur un plus grand nombre d'observations.

Le plus fort coefficient de corrélation entre variables anamorphosées est 0,31 pour deux des 7 chalutiers de la flottille. Pour les cinq autres, il varie entre 0,2 et -0,1 indiquant une très faible corrélation entre les variables normalisées  $E_{tr}$  et  $C_{tr}$ . Dans la construction des espérances conditionnelles, ces coefficients de corrélations interviennent élevés à la puissance "n". C'est une des raisons pour laquelle il ne sert à rien d'ajuster les anamorphoses par une somme trop importante de polynômes d'Hermite. Les gains de qualité des inférences sont en effet limités au delà du cinquième polynôme, car la faiblesse des coefficients de corrélation limite rapidement l'importance des polynômes.

### 3.4 - Les Fonctions Puissance De Pêche (F.P.D.P.)

L'inférence des espérances conditionnelles est basée, par construction, sur les propriétés statistiques des couples  $(C_{tr}, E_{tr})$  et non sur la modélisation des moyennes d'effort par classe de capture. Il apparaît également qu'il n'a pas été besoin de spécifier la nature des lois de probabilité des variables aléatoires C et E. Par ailleurs, la variance des variables aléatoires étant évaluée par la somme de quantités positives, elle s'approche par valeurs inférieures de la variance empirique des données. Dès lors, il y a systématiquement sous-estimation des moments d'ordre 2 et, par conséquent, il faut s'attendre à un effet de "lissage" des résultats.

L'estimation des puissances de pêche par une fonction des captures devrait conduire à la construction d'un estimateur du type  $FPDP(c) = E[ E_k/E_0 | C_k=C_0=c ]$ . L'estimateur construit ici est  $\Delta_k(c) = E[ E_k | C_k=c ] / E[ E_0 | C_0=c ]$ . L'espérance d'un rapport étant approchée par le rapport des espérances, l'estimation est biaisée. On interprétera donc les résultats comme des ordres de grandeurs plutôt que comme des estimations précises.

Les puissances de pêches varient entre 0,6 et 1,4 et n'ont pas toutes la même forme. La comparaison globale des CPUE (modèles multiplicatifs), sans discrimination du niveau des captures, englobe donc des situations diverses d'efficacités de pêche. Ceci illustre l'utilité d'exprimer les puissances de pêche par des fonctions.

Quelques interprétations des F.P.D.P. sont possibles à l'aide des critères habituels : activité de pêche (pêche fraîche, congélateur, saleur), puissance motrice, jauge brute, année de construction,... Seuls deux bateaux sont identiques du point de vue de ces quatre critères : la Normande et la Goélette. Il est assez satisfaisant de constater que leurs F.P.D.P. sont similaires. Le Saint-Pierre et le Saint-Denis, identiques également mais respectivement congélateur et pêche fraîche, ont des espérances conditionnelles et des puissances de pêche divergentes. Au vu de ces deux exemples, il semblerait que la nature de l'activité de pêche, toute chose égale par ailleurs (tout du moins les 3 critères retenus) modifie sensiblement les F.P.D.P. C'est là un point important. La modélisation des F.P.D.P. permet d'extraire une information sur des comportements en fonction des types de pêche. La question classique de la détermination de puissance de pêche porte sur la comparaison d'unités de pêche en vue de la standardisation des efforts et rejette "a priori" toute idée d'"interaction" entre ces unités. Les F.P.D.P. pourraient être de ce point de vue une forme de modélisation d'interactions.

Le Marmouset (saleur) est le moins efficace des bateaux au-delà de 2000 Kg. Le salage des morues décale l'intérêt des pêcheurs vers des individus de tailles supérieures. Ceci les amène probablement à rejeter plus de poissons que les autres chalutiers. Les statistiques ne prenant pas en compte les rejets, leur puissance de pêche est alors plus faible.

Cependant, le Côte Saint-Jacques, autre saleur, est aussi efficace que les "pêche fraîche" Normande et Goélette. Deux d'entre eux sont identiques et pratiquent la même pêche. Le troisième a une puissance théorique (Laurec et Le Guen, 1981) et un type d'activité (saleur) différents. Ainsi, les valeurs numériques des FPDP ne permettent pas de dégager un effet "métier" ou un effet "puissance motrice". La forme des FPDP serait de ce point de vue plus pertinente.

En dessous de 2500 Kg, le Bretagne et le Saint-Pierre ont des puissances de pêche importantes (1 à 1,05) par rapport aux cinq autres chalutiers (Fig. 7). Se trouvent ainsi distingués les deux congélateurs des cinq "pêche fraîche". L'interprétation de ce décalage fait appel aux stratégies de pêche, notion incluse dans les puissances de pêche globales. Les congélateurs traitent l'ensemble de leurs prises à bord et recherchent un approvisionnement régulier des chaînes de transformation avec du poisson de qualité. Le poisson s'abîmant rapidement dans les filets, la qualité peut être obtenue par des temps de traîne limités. Ainsi, la stratégie des congélateurs les conduit à réaliser plus de petits traits et plus sûrs quand l'abondance est forte, d'où de meilleures CPUE vers les petites captures.

## CONCLUSION

La normalisation par anamorphose est une méthode générale et exigeante en développements informatiques. Elle assure cependant, sous couvert de bi-normalité, un retour rigoureux vers les données brutes après que les inférences statistiques aient été faites, dans de meilleures conditions d'ailleurs, sur les données normalisées. L'importance des traitements informatiques n'est pas fondamentalement un handicap puisque ce modèle permet d'observer en permanence le comportement des données aux hypothèses successives. Partant du principe souvent admis que les captures sont indépendantes, la seule hypothèse réellement contraignante concerne le caractère bi-gaussien des couples de variables aléatoires normalisées. La force de ce modèle est aussi sa faiblesse puisque la bi-normalité est rarement strictement satisfaite compte tenu du comportement des valeurs extrêmes de captures et d'effort.

Dans la mesure où le nombre d'observations le permettrait, il est possible d'estimer des puissances de pêche progressivement locales en procédant à l'inférence des espérances conditionnelles à effort, zone et période fixés. Il est probable qu'un découpage en strates spatio-temporelles comprenant chacune une cinquantaine de traits de chalut permette l'estimation de telles puissances de pêche.

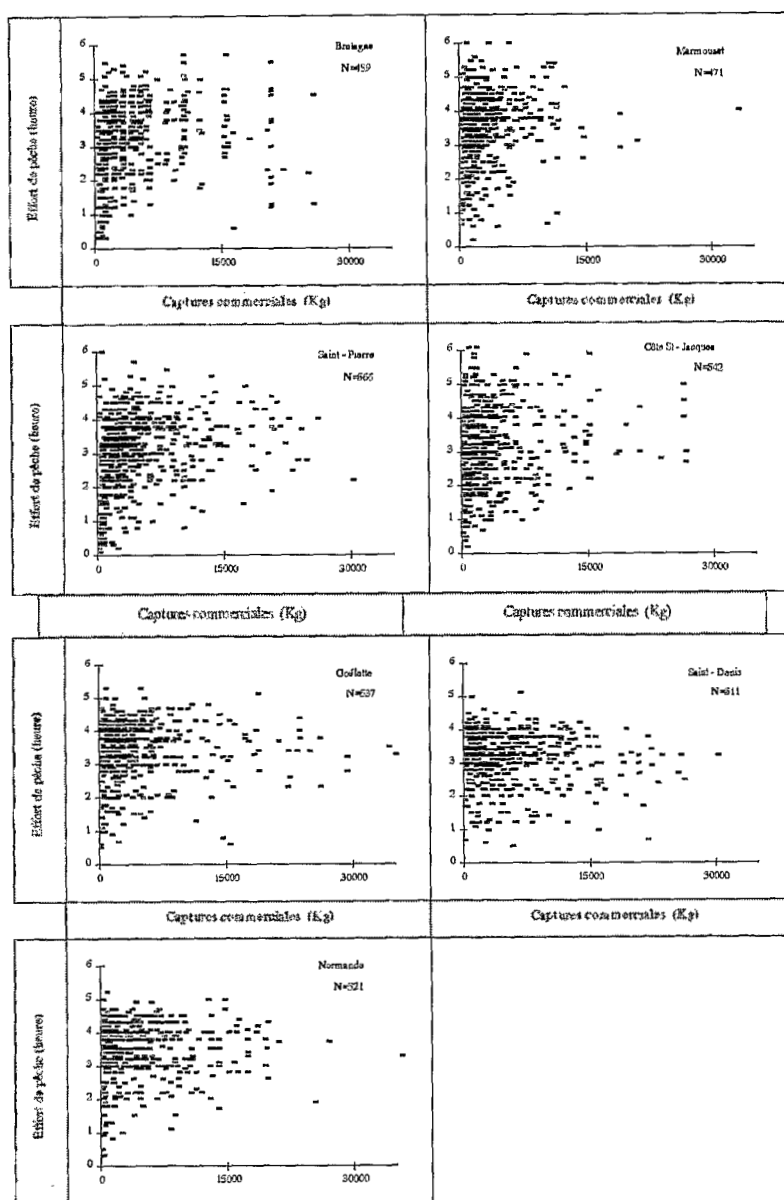
Par ailleurs, ayant estimé les lois de probabilité des variables par la modélisation des anamorphoses, on peut envisager de construire un coefficient de puissance de pêche en pondérant les FPDP par les fréquences d'apparition de chaque niveau de capture. Ce calcul présenterait l'avantage de prendre en compte des situations opposées d'efficacité de pêche avec leur fréquence d'apparition. Que ce soit les fonctions ou les coefficients, le renouvellement des estimations pour d'autres années devrait permettre de juger de la permanence des tendances observées quant aux puissances de pêche de navires n'exerçant pas le même métier (congélateur/pêche fraîche).

Rappelons enfin, que l'analyse ne porte que sur les traits de chalut "morue spécifique". Elle ne vaut donc que pour une partie de l'activité de ces navires. Il est probable que des changements interviendraient pour d'autres espèces cibles.

**Remerciements** : Nous tenons à remercier F. Laloë pour sa contribution attentive à la rédaction de cet article, et M. Gil pour la dactylographie.

## REFERENCES

- Bez N., Ph. Moguedet, 1992. Comparison of the relative fishing powers of St-Pierre and Miquelon trawlers from 1986 to 1991 in the NAFO Subdivision 3 Ps. Limits in the use of a multiplicative model (Robson, 1966). *NAFO SCR. Doc.* 92/34, 22 p.
- Cramér H., 1966. *Mathematical methods of statistics*. Marston Morse and A.W. Tucker Ed., 575 p.
- Gascuel D., 1994. Efforts et puissances de pêches: redéfinition des concepts et exemple d'application. 1er Forum Halieumétrique de Rennes. Gascuel, Durand et Fonteneau Editeurs. Présent document.
- Gavaris S., 1980. Use of a multiplicative model to estimate catch rate and effort from commercial data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **37**, 2272-2275.
- Lantuéjoul Ch., J. Rivoirard, 1984. Une méthode de détermination d'anamorphose. N-916, Centre de Fontainebleau, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Laurec A., 1977. Analyse et estimation des puissances de pêche. *J. Cons. Int. Explor. Mer*, **37** (2), 173-185.
- Laurec A., A. Fonteneau, 1979. Estimation de l'abondance d'une classe d'âge : utilisation des CPUE de plusieurs engins, en différentes zones et saisons. *Res. Doc. CICTA*, 8 (1), 79-100.
- Laurec A., J.C. Le Guen, 1981. Caractérisation et quantification de l'exploitation. *In* : Dynamique des populations marines exploitées, Centre National pour l'Exploitation des Océans, Brest, 30-43.
- Richards L.J., J.T. Schnute, 1992. Statistical models for estimating CPUE from catch and effort data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **44**, 1315-1327.
- Rivoirard J., 1991. Introduction au krigeage disjonctif et à la géostatistique non-linéaire (2ème édition). C-139, Centre de Fontainebleau, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Robson D.S., 1966. Estimation of the Relative Fishing Power of Individual Ships. *ICNAF Res. Bull.*, **3**, 5-14.
- Saporta G., 1990. Probabilités, analyse des données et statistiques. Technip Ed., Paris, 493 p.



**Figure 1 :** Etude des corrélations entre les captures commerciales (Kg) et les efforts de pêche (heure) par trait de chalut ciblé sur la morue et par navire. Subdivision 3 Ps de la NAFO - 1991



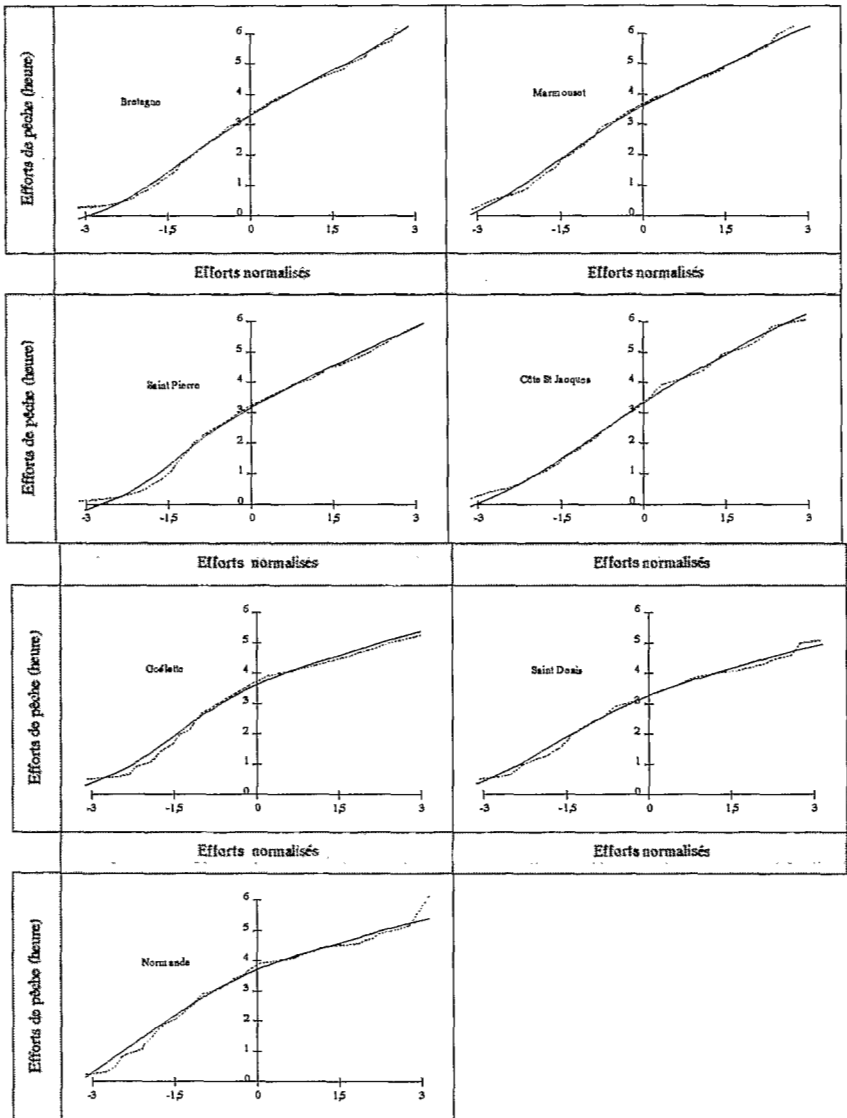


Figure 2 : Anamorphoses empiriques des efforts - Inférences statistiques par l'ajustement d'une somme de polynômes d'Hermite de degré 0 à 9.

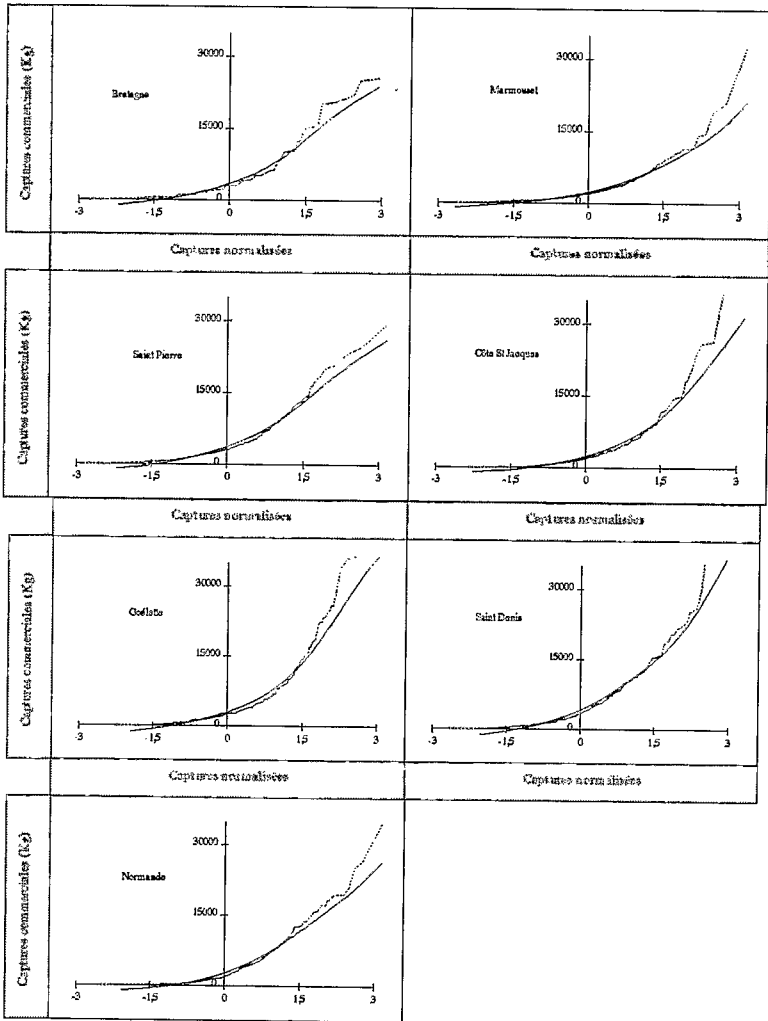
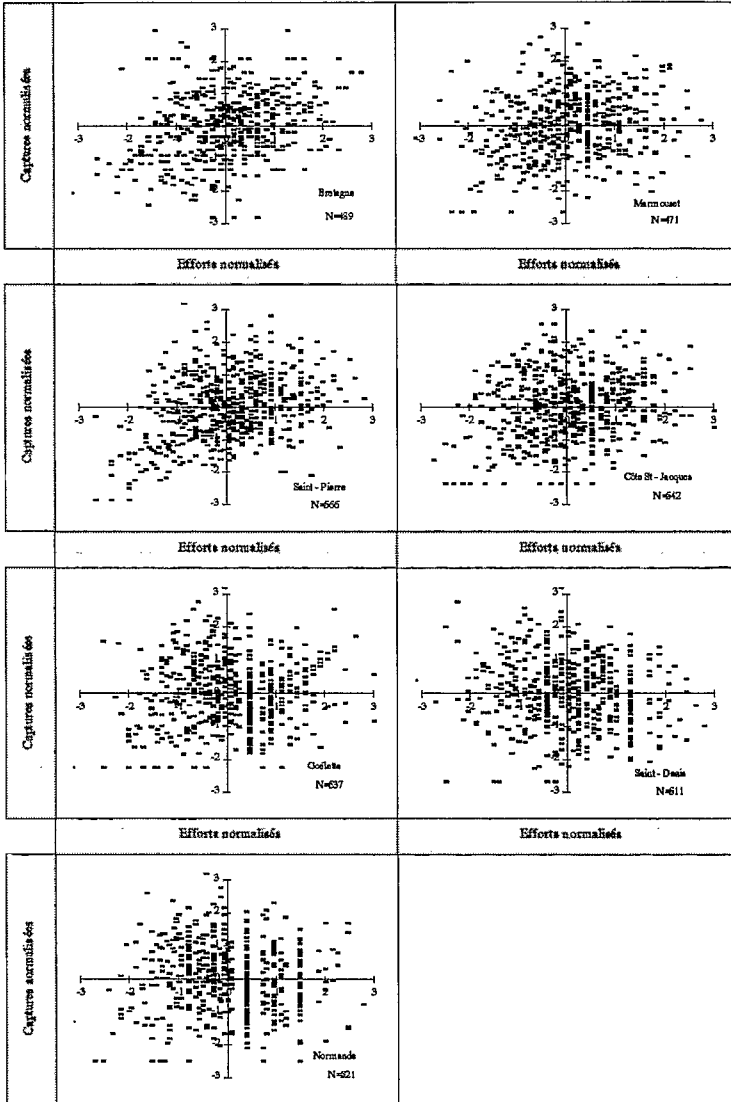
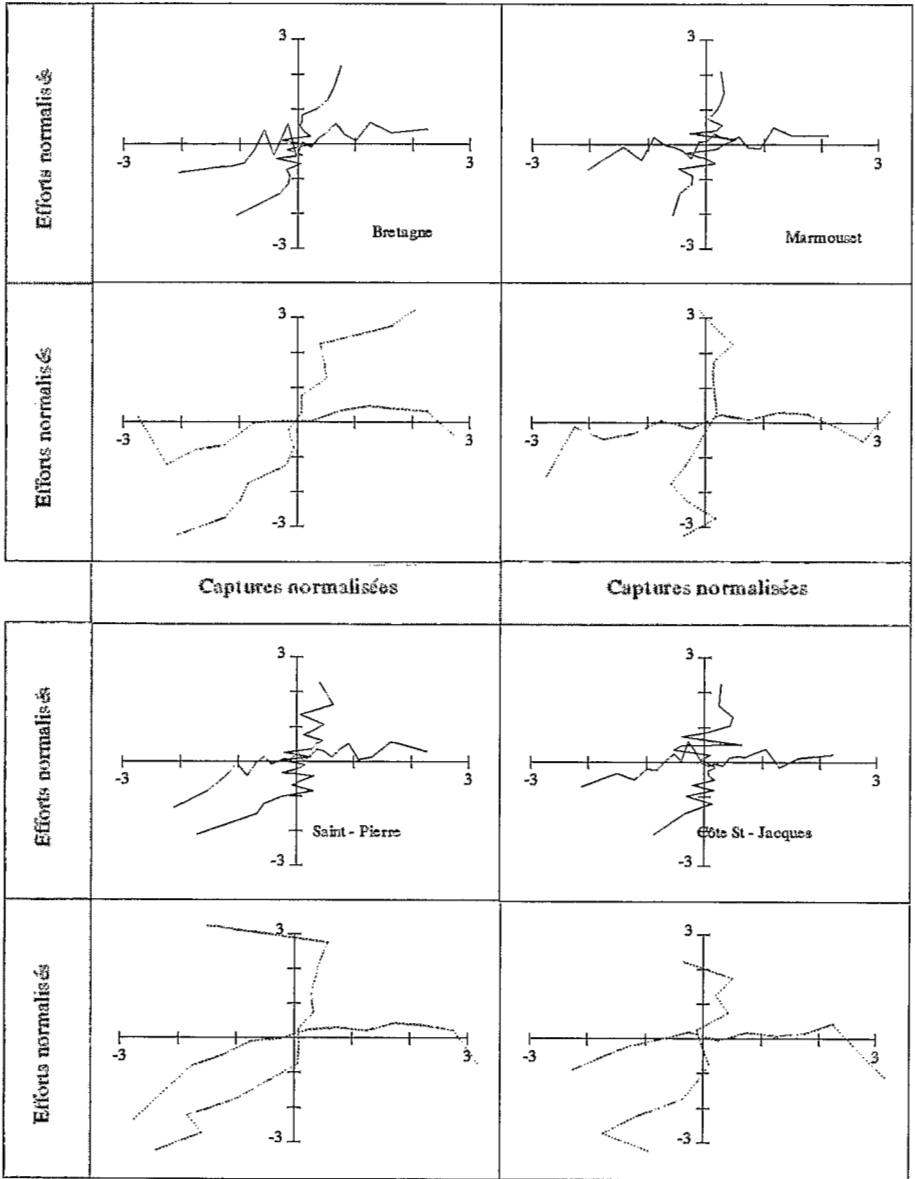


Figure 3 : Anamorphoses empiriques des captures - Inférences statistiques par l'ajustement d'une somme de polynômes d'Hermite de degré 0 à 9.



**Figure 4 :** Etude des corrélations entre les captures normalisées et les efforts de pêche normalisés par navire et par trait de chalut ciblé sur la morue - Subdivision 3 Ps de la NAFO - 1991.



**Figure 5 :** Espérances conditionnelles empiriques des variables normalisées -  
 ——— Valeurs moyennes des variables normalisées par classe de même densité (25 observations)  
 - - - - - Valeurs moyennes des variables normalisées par classe régulières de 0.5 unité  
 Pente des droites de régression développées sur l'ensemble du nuage de corrélation ( $r$ ).

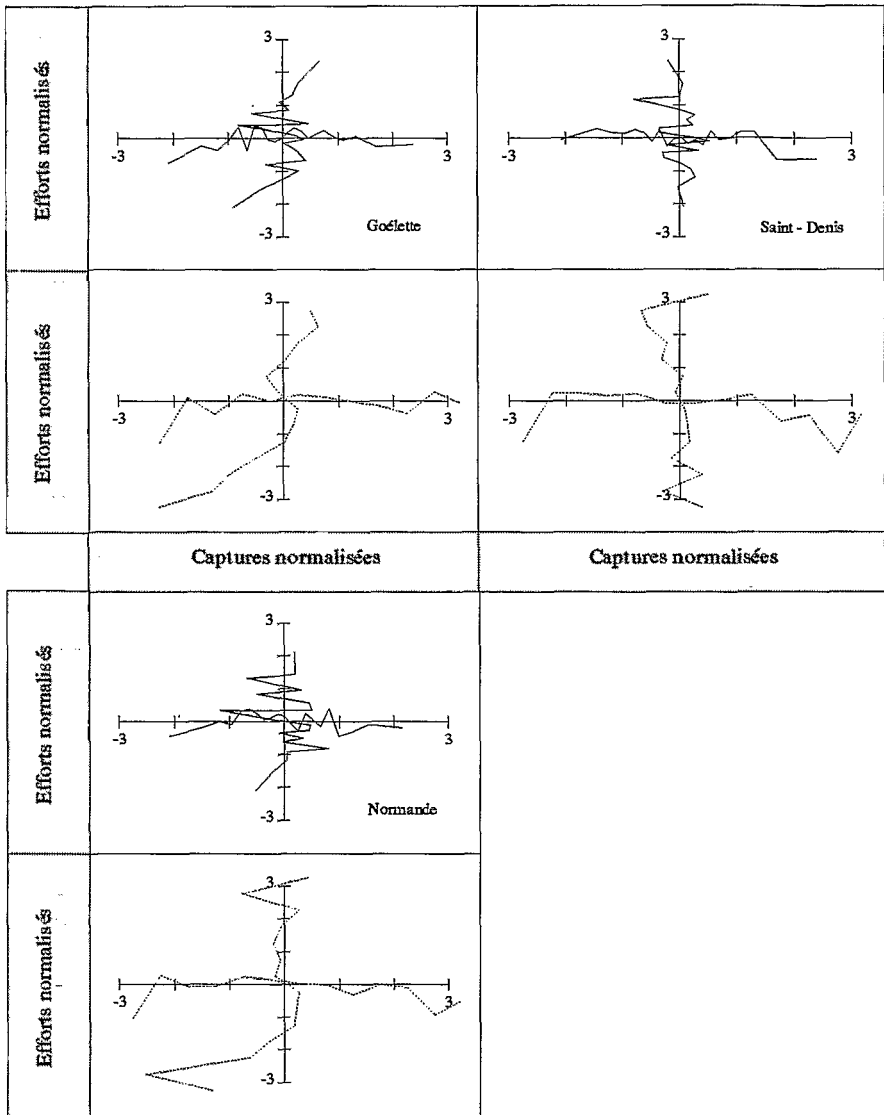


Figure 5 (suite).

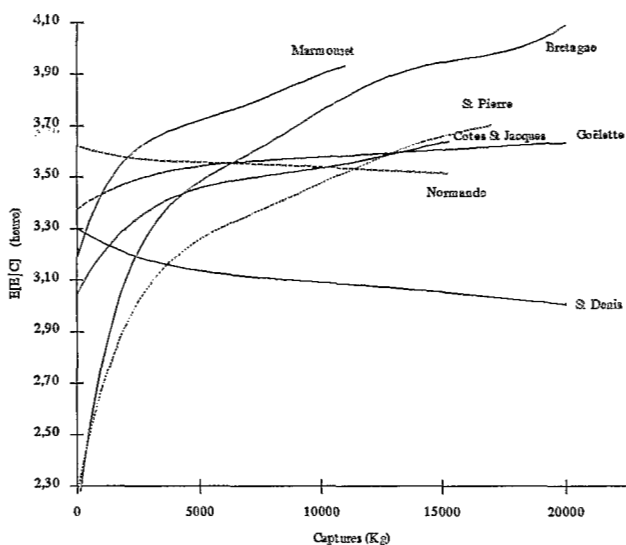


Figure 6 : Espérances conditionnelles des efforts connaissant les captures

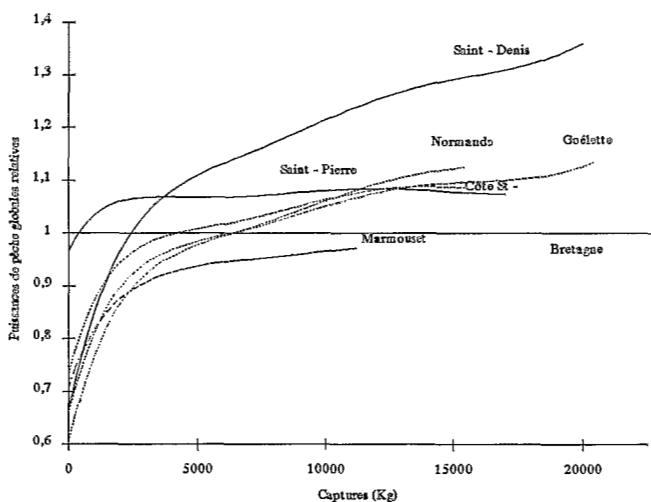


Figure 7 : Puissances de pêche globales relatives au Bretagne exprimées en fonction des captures