

Analyse de la dynamique spatiale de la Morue (*Gadus morhua* L.) dans le nord du golfe du Saint-Laurent au moyen des courbes d'agrégations géostatistiques.

Hacène Tamdrari^{1,2}, Martin Castonguay², Daniel Duplisea², et Jean-Claude Brêthes¹

1. Institut des sciences de la mer de Rimouski, 310 allée des Ursulines, C.P. 3300, Rimouski (Québec) G5L 3A1, Canada

2. Institut Maurice-Lamontagne, 850 route de la mer, C. P. 1000, Mont-Joli (Québec) G5H 3Z4, Canada



1. Introduction

Le stock de morue (*Gadus morhua* L.) du nord du golfe du Saint-Laurent (région 3Pn4RS), a connu un effondrement au début des années 1990. La biomasse reproductrice a diminué de 90% entre 1983 et 1993 (Fig.1).

À ce déclin est associé une contraction de la distribution géographique puisque la morue est devenue rare dans le secteur nord ouest de l'île Anticosti (zone 4S) et elle se concentre essentiellement le long de la côte ouest de Terre-Neuve (zone 4R).

Malgré les mesures de gestion présent par le MPO, Le stock de morue du nord du golfe ne montre pas de signe notable de rétablissement. L'augmentation de biomasse observée récemment se produit dans la division 4R.

Dans ce contexte et dans une perspective de reconstruction du stock, les questions suivantes se posent :

➤ Est-ce qu'une augmentation de biomasse continuera à être cantonnée dans 4R (la côte ouest de Terre-neuve) ou bien se produira-t-elle aussi, à terme, dans 4S (Côte Nord) ?

➤ Est-ce que la disparition possible de la composante 4S de la population sera compensée par un débordement de la biomasse de 4R ou bien devra-t-on attendre la résurgence de la sous-population locale ?

Pour répondre à ces questions, la dynamique spatiale de ce stock de morue est analysée à partir de la relation entre la densité locale et l'abondance de cette population au moyen des courbes d'agrégations géostatistiques et à des échelles spatio-temporelles différentes (échelle du nord du golfe du Saint-Laurent -4RS- et la Zone 4R). Le travail s'intéresse à la période comprise entre 1990 et 2008.

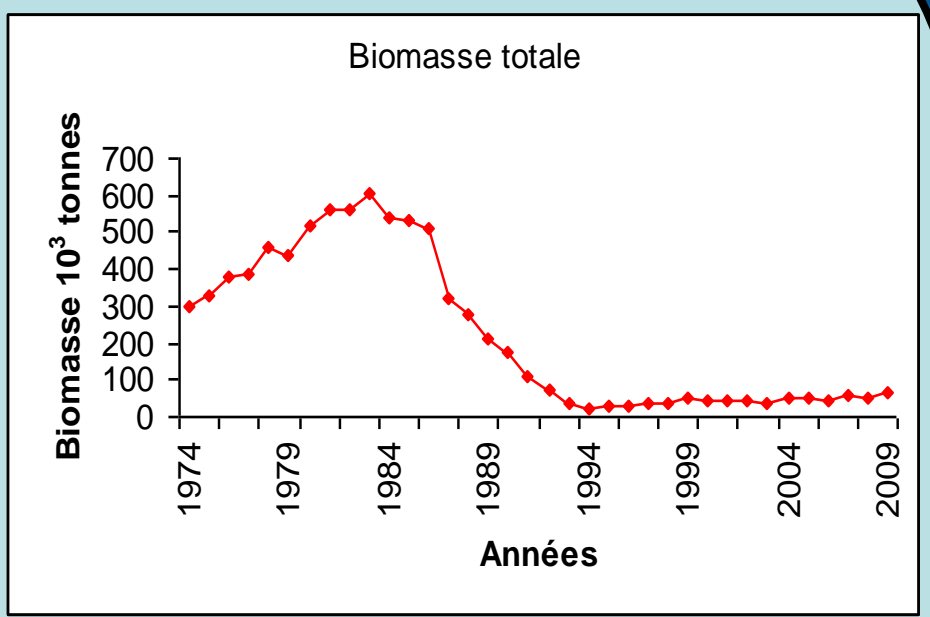


Fig.1. Biomasse totale estimée par la VPA.

2. Approche méthodologique

2.1 source de données

Les données proviennent des relevés scientifiques de chalutage de fond pour les poissons démersaux et la crevette nordique, effectuées chaque année par le ministère des Pêches et des Océans (MPO) dans le nord du golfe du Saint-Laurent. (Fig.2).

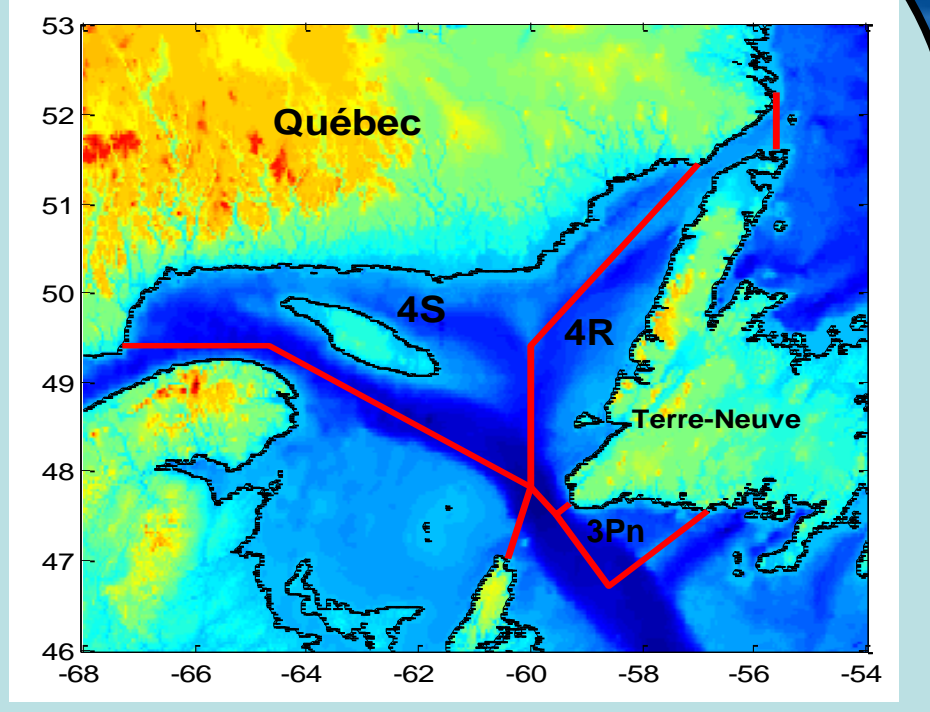


Fig.2. Les divisions 4RS de l'Organisation des Pêches de l'Atlantique Nord-Ouest (OPANO).

2.2 Analyse de la dynamique spatiale

La variété des dynamiques spatiales observées chez les espèces marines peut être illustrée par quatre modèles, qui décrivent les modes de répartition de la population locale et illustrent les changements de la densité par rapport à l'abondance totale (fig.3.).

La détermination de ces modèles repose sur des courbes représentant la biomasse et la proportion de la biomasse totale observées sur chaque unité de surface en fonction de la proportion de l'espace occupée par cette biomasse. Les courbes permettent de définir un indice de concentration (*Ssp*).

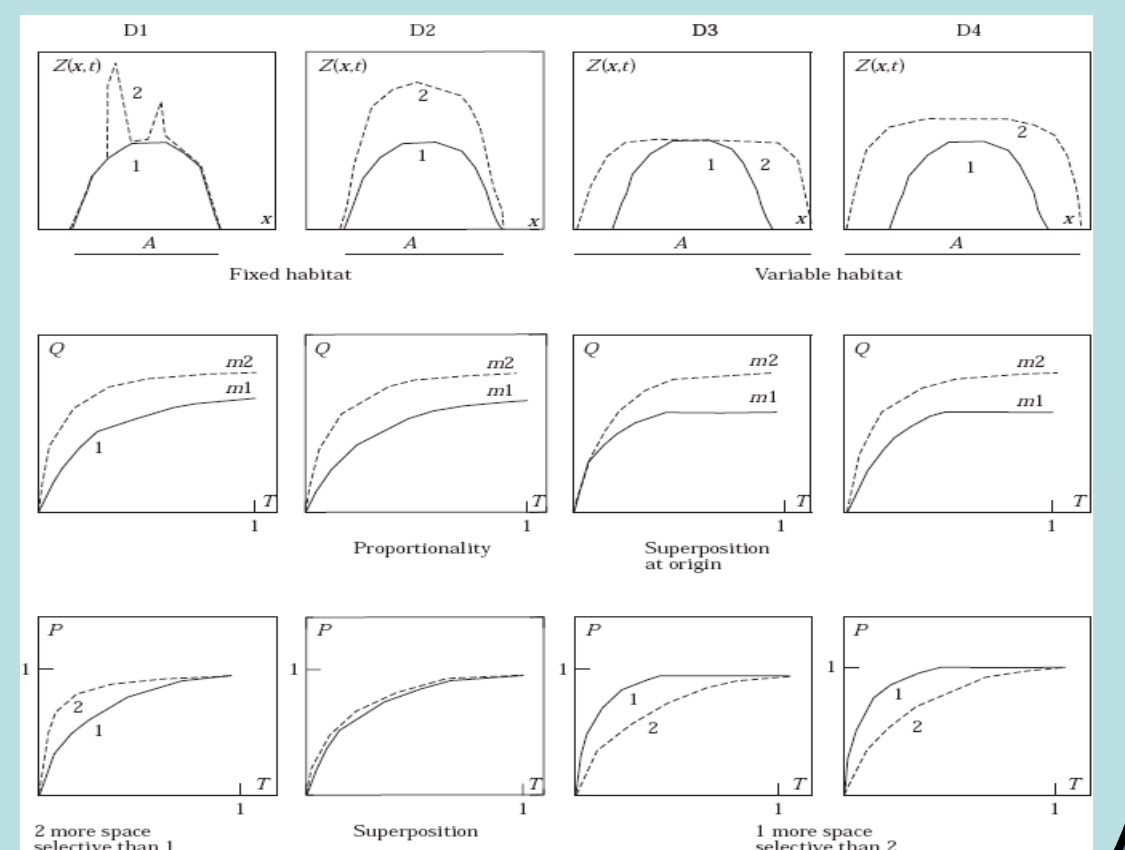


Fig.3. Modèles de dynamique spatiale

$$S_{sp} = 2 \int_0^1 P(T) dT - 1$$

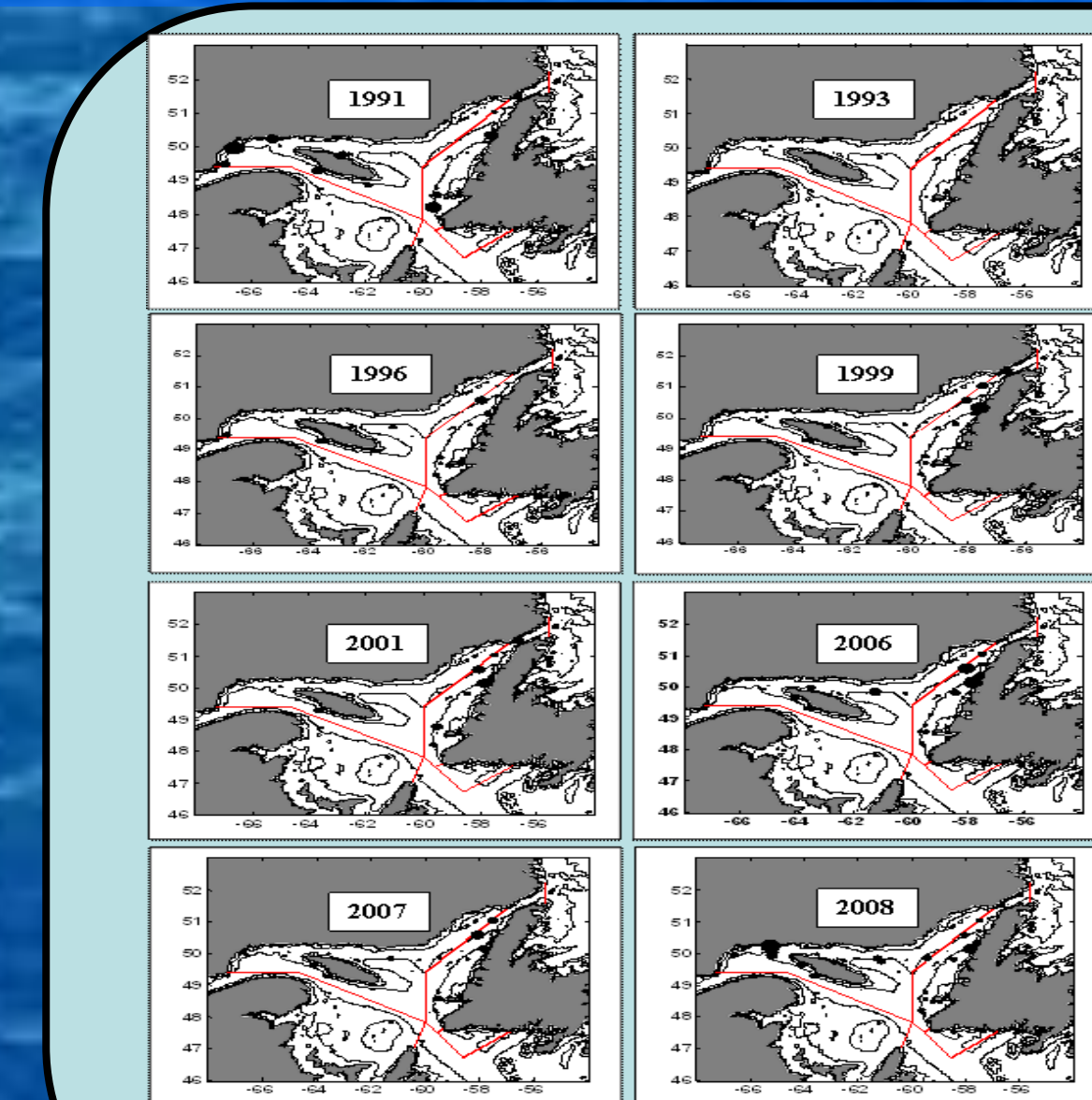


Fig.4. Densité relative du groupe d'âge < 4 ans dans le golfe du Saint-Laurent. Le cercle est proportionnelle à la densité, les points noirs correspondent à une densité nulle.

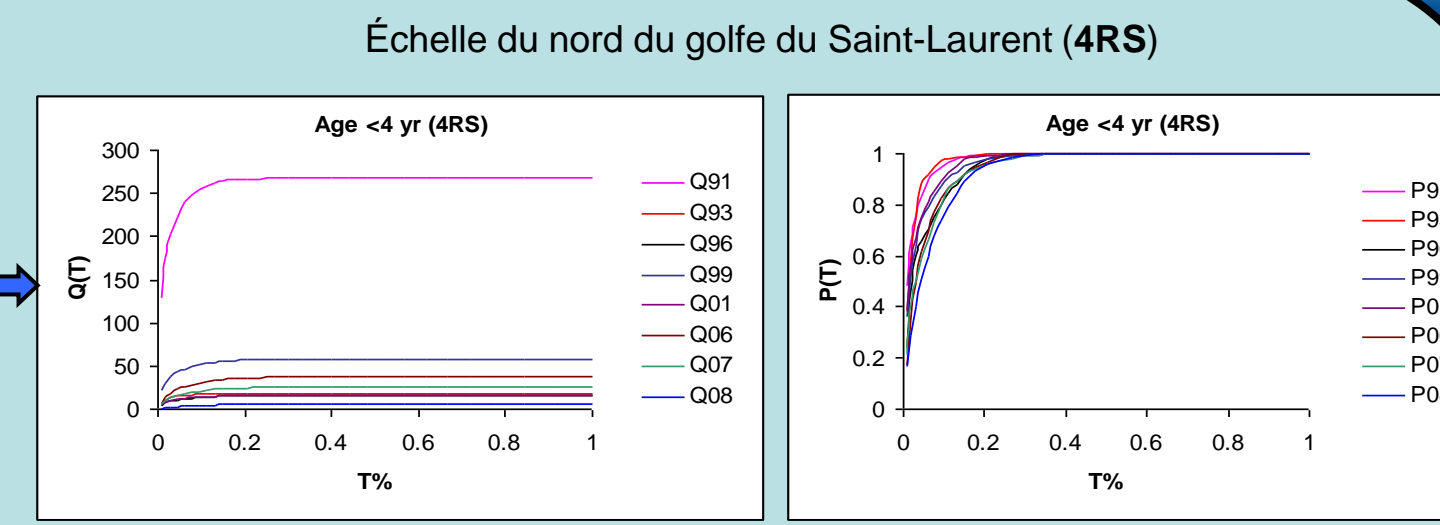


Fig.5. Courbes d'agrégations géostatistiques du groupe d'âge < 4 ans. Le nombre dans la légende indique l'année considérée. Les courbes $Q(T)$ sont ajustées à la densité moyenne, exprimée en tonnes. Les unités T et $P(T)$ sont des proportions d'espace et d'abondance.

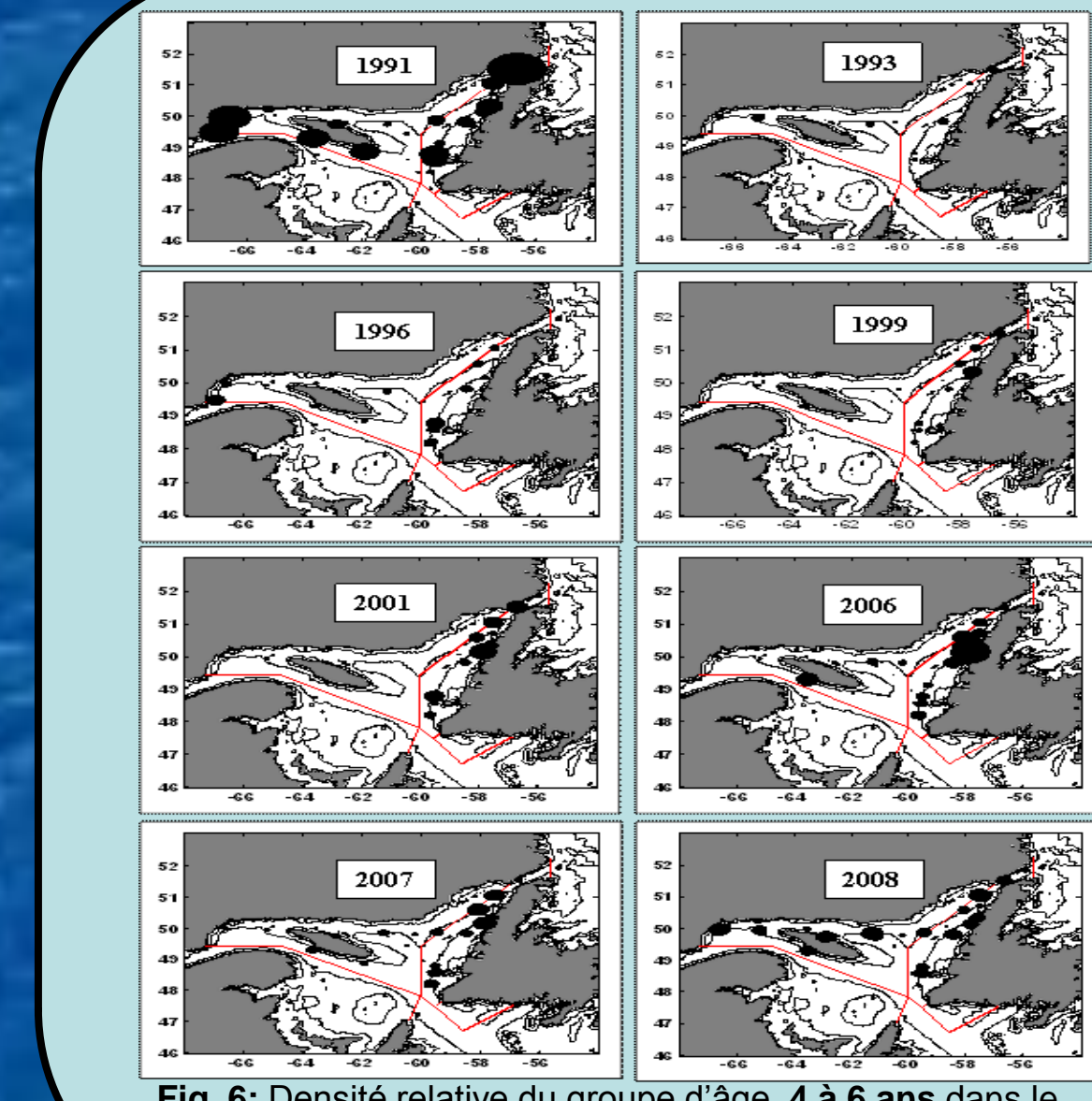


Fig.6. Densité relative du groupe d'âge 4 à 6 ans dans le golfe du Saint-Laurent. Le cercle est proportionnelle à la densité, les points noirs correspondent à une densité nulle.

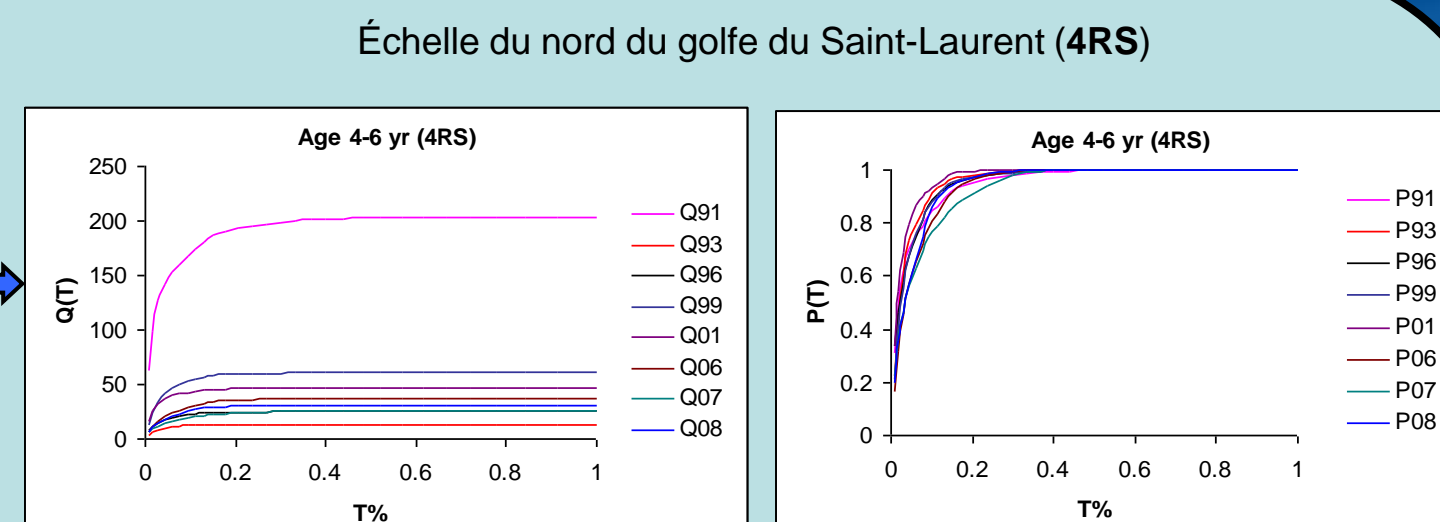


Fig.7. Courbes d'agrégations géostatistiques du groupe d'âge 4 à 6 ans. Le nombre dans la légende indique l'année considérée. Les courbes $Q(T)$ sont ajustées à la densité moyenne, exprimée en tonnes. Les unités T et $P(T)$ sont des proportions d'espace et d'abondance.

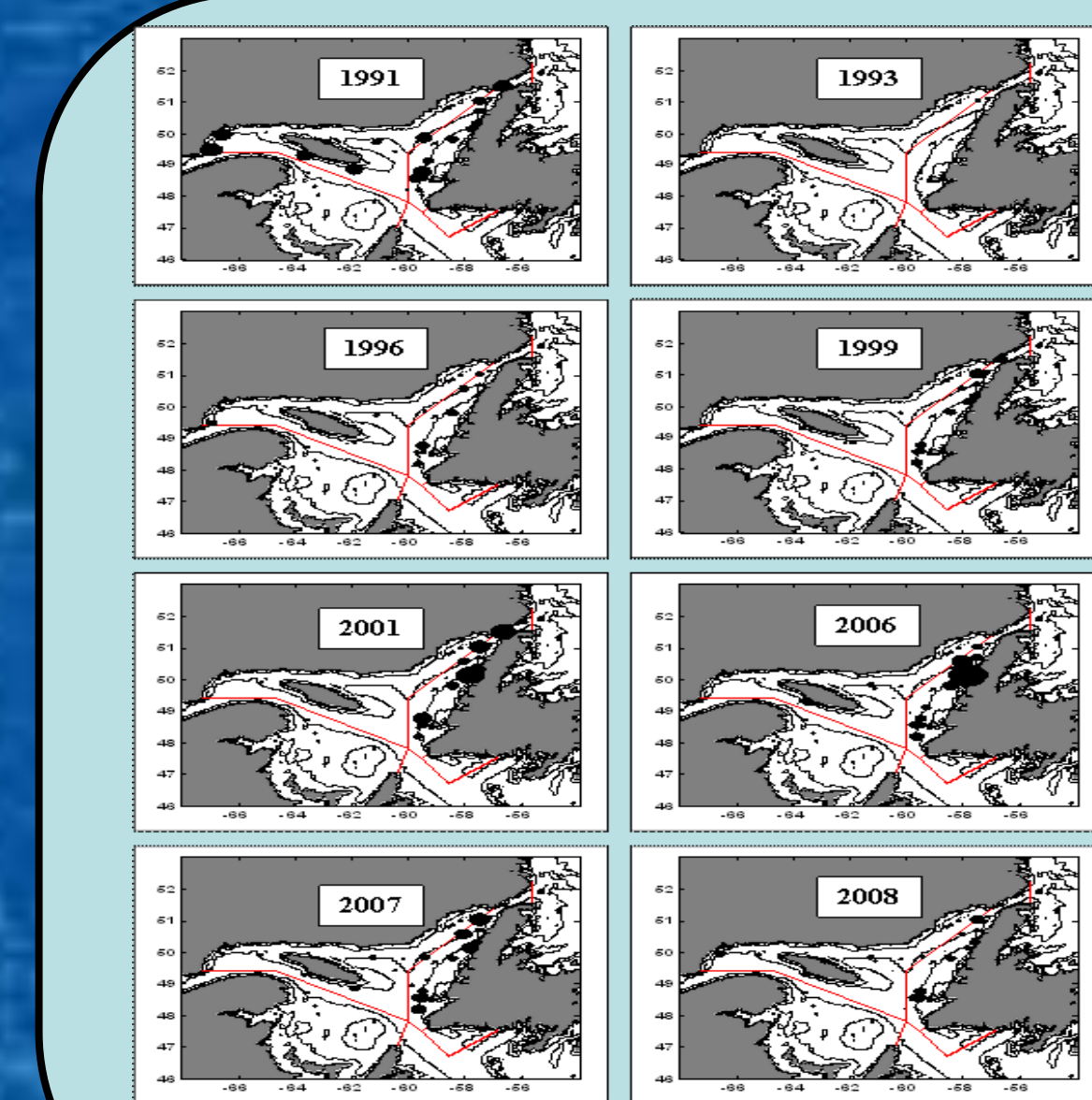


Fig.8. Densité relative du groupe d'âge > 6 ans dans le golfe du Saint-Laurent. Le cercle est proportionnelle à la densité, les points noirs correspondent à une densité nulle.

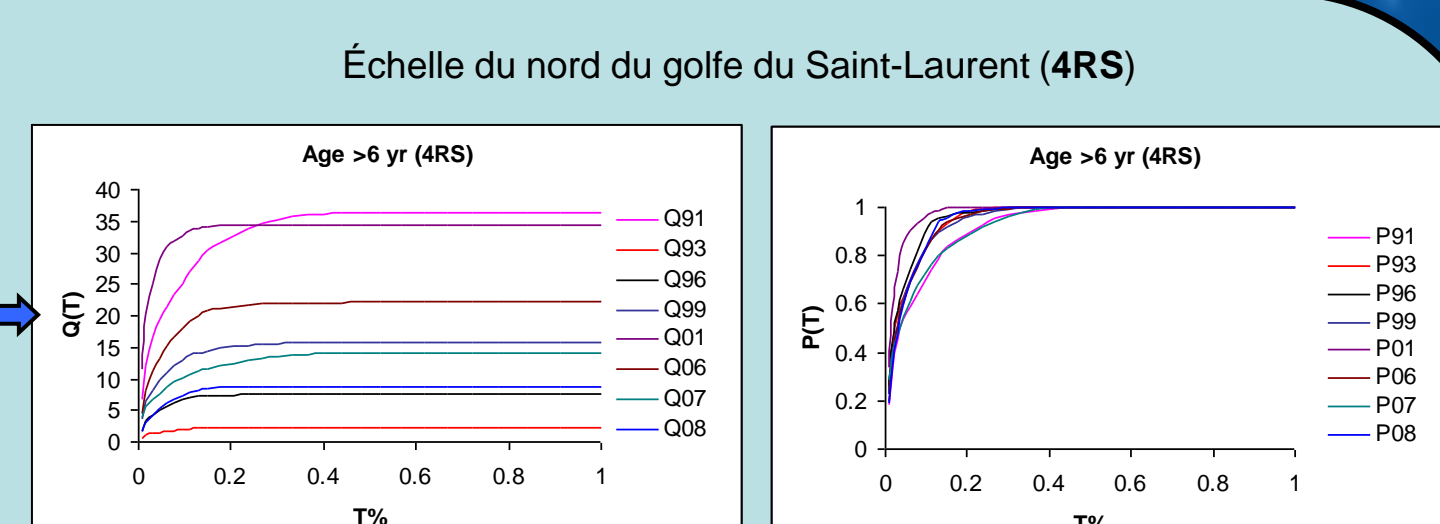


Fig.9. Courbes d'agrégations géostatistiques du groupe d'âge > 6 ans. Le nombre dans la légende indique l'année considérée. Les courbes $Q(T)$ sont ajustées à la densité moyenne, exprimée en tonnes. Les unités T et $P(T)$ sont des proportions d'espace et d'abondance.

➤ **À l'échelle du nord du golfe**, un modèle de densité proportionnelle D_2 a été observée pour le groupe d'âge < 4 ans et toutes les années (Tableau 1, 2). L'indice de sélectivité de l'espace (*Ssp*), varie de 0,870 à 0,953 et indique une forte concentration de la morue qui a fluctué entre années, mais sans tendance particulière.

▪ Le modèle de densité proportionnelle implique que l'augmentation de l'abondance est associée à une augmentation de la densité dans tous les points de l'aire de répartition de la morue et les changements de densité se font au même rythme que les changements de l'abondance. Cette dynamique spatiale D_2 est indépendante de la densité et elle est influencée par les facteurs environnementaux

➤ **À l'échelle de la zone 4R**, les quatre modèles de dynamique sont observés pour le groupe d'âge < 4 ans (Tableaux 1, 2).

▪ Un modèle de la densité différentielle D_1 est typique des environnements plus hétérogènes. Cette dynamique de densité indépendante est observée pour une diminution de biomasse: entre les années 1991, 1999 et 2001 et l'année 2006.

▪ La dynamique de densité constante D_3 a été trouvée entre 2006 et 2007, avec une augmentation de biomasse. Dans ce cas la densité locale ne change pas au même rythme que la biomasse. C'est une dynamique de densité dépendante.

▪ La dynamique D_4 (Tableaux 1, 2), ou modèle de bassin, a été observée lorsque l'on compare l'abondance locale élevée dans 4R en 2006 à une faible abondance en 2008, où la morue est concentrée dans le nord-est du golfe du Saint-Laurent. La diminution de la surface occupée est associée à une diminution de la densité moyenne et à une augmentation de la sélectivité de l'espace (*Ssp*).

➤ **À l'échelle du nord du golfe**, un modèle de densité proportionnelle D_2 a été observée pour le groupe d'âge < 4 ans et toutes les années (Tableau 1). L'indice de sélectivité de l'espace (*Ssp*), varie de 0,863 à 0,921 et montre une concentration variable entre années, mais sans tendance particulière.

▪ La dynamique spatiale D_2 est indépendante de la densité et elle est influencée par les facteurs environnementaux.

➤ **À l'échelle de la zone 4R**, les quatre modèles de dynamique sont observés pour le groupe d'âge 4 à 6 ans (Tableau 1), avec une prédominance de la dynamique spatiale D_2 .

▪ Un modèle de la densité différentielle D_1 , densité indépendante, est observée pour une diminution de biomasse entre les mêmes années que pour le groupe d'âge < 4 ans.

▪ La dynamique de densité constante D_3 a été trouvée entre 2006 et 2007, avec une augmentation de la biomasse. Cette dynamique est dépendante de la densité.

▪ La dynamique D_4 (Tableau 1), ou modèle de bassin, a été observée lorsque l'on compare l'abondance locale élevée dans 4R en 2006 à une faible abondance en 2008, où la morue est concentrée dans le nord-est du golfe du Saint-Laurent. La diminution de la surface occupée est associée à une diminution de la densité moyenne et à une augmentation de la sélectivité de l'espace (*Ssp*).

➤ **À l'échelle du nord du golfe**, on retrouve la dynamique D_2 que pour les autres groupe d'âges et pour toutes les années. L'indice de sélectivité de l'espace (*Ssp*), varie de 0,847 à 0,938 et indique une concentration variable entre années, mais sans tendance particulière.

➤ **À l'échelle de la zone 4R**, les quatre modèles de dynamique sont observés pour le groupe d'âge > 6 ans (Tableaux 1, 3), avec une prédominance de la dynamique spatiale D_2 , comme pour les autres groupe d'âges.

▪ Le modèle de la densité différentielle D_1 est observée pour une diminution de biomasse et de l'espace occupé par la morue entre les années 2006 et 1999 ainsi qu'entre les années 2007, 1999 et 2001. Ce modèle montre que l'augmentation de la densité est très localisée.

▪ La dynamique de densité constante D_3 a été trouvée entre 2006, 1991, 1999 et entre 2007 et 1991 avec une augmentation de la biomasse. Cette dynamique montre que la densité locale ne change pas au même rythme que la biomasse.

▪ La dynamique D_4 , ou le modèle de bassin (Tableaux 1, 3), a été observée pour le groupe d'âge > 6 ans et pour les mêmes années que pour les autres groupe d'âges, et pour l'année 2007. Cette dynamique apparaît lorsque l'on compare l'abondance locale élevée dans 4R tel que 2007 à une faible abondance comme 2008, où la morue est concentrée dans le nord-est du golfe du Saint-Laurent. L'augmentation de la surface occupée est associée à une augmentation de la densité moyenne et à une diminution de la sélectivité de l'espace (*Ssp*). L'indice de sélectivité de 2007 (0,761) et plus faible que celui de 2008 (0,829).

3. Résultats & discussion

Tableau 1. Variation de l'indice de sélectivité (*Ssp*) de la Morue (*Gadus morhua*) dans le nord du golfe du Saint-Laurent (4RS) et dans la subdivision 4R. L'hypothèse nulle D_2 est testé par 1000 bootstraps à un niveau de signification de 0,05. Les valeurs en gras sont à l'extérieur du niveau de confiance et de permettre ainsi le rejet du modèle D_2 .

Echelle	Groupes d'âges	Années								Intervalle de confiance		
		1991	1993	1996	1999	2001	2006	2007	2008	Borne inf.	Moy.	Borne Sup.
Nord du golfe du Saint-Laurent (4RS)	Age < 4 Ans	0,917	0,953	0,920	0,926	0,931	0,896	0,889	0,870	0,863	0,931	0,977
	Age 4-6 Ans	0,901	0,921	0,912	0,908	0,939	0,885	0,863	0,895	0,839	0,910	0,961
	Age > 6 Ans	0,847	0,903	0,916	0,895	0,938	0,896	0,852	0,900	0,834	0,905	0,956
Zone 4R	Age < 4 Ans	0,885	0,917	0,908	0,892	0,884	0,807	0,858	0,821	0,818	0,893	0,945
	Age 4-6 Ans	0,879	0,886	0,867	0,826	0,866	0,764	0,811	0,839	0,778	0,867	0,941
	Age > 6 Ans	0,799	0,84	0,888	0,806	0,88	0,769	0,761	0,829	0,771	0,857	0,921

Tableau 2. Types de dynamique selon le test bootstrap et les courbes $Q(T)$ Pour le groupe d'âge < 4 ans à l'échelle de la zone 4R. Dynamiques D_1 , D_3 et D_4 en gras.

Années	1991	1993	1996	1999	2001	2006	2007
1993	D2						
1996	D2	D2					
1999	D2	D2	D2				
2001	D2	D2	D2	D2			
2006	D1	D4	D4	D1	D1		
2007	D2	D2	D2	D2	D2	D3	
2008	D2	D2	D2	D2	D2	D4	D2

Tableau 3. Types de dynamiques basé sur le test bootstrap et les courbes $Q(T)$ pour le groupe d'âge > 6 ans à l'échelle de la zone 4R. Dynamiques D_1 , D_3 et D_4 en gras.

Années	1991	1993	1996	1999	2001	2006	2007
1993	D2						
1996	D2	D2					
1999	D2	D2	D2				
2001	D2	D2	D2	D2			
2006	D3	D4	D4	D3	D1		
2007	D3	D4	D4	D1	D1	D2	
2008	D2	D2	D2	D2	D2	D4	D4

4. Conclusion

➤ La prise en compte des échelles de variations spatiales et temporelle est nécessaire à la compréhension de la dynamique des populations marines.

➤ À l'échelle du nord du golfe du Saint-Laurent (divisions 4RS de l'OPANO), le modèle de densité proportionnelle D_2 c'est le seul modèle de distribution spatiale observé pour tous les groupes d'âges et pour toute les périodes considérées. Cette configuration correspond à une dynamique de densité indépendante contrôlée par les facteurs environnementaux.

➤ À l'échelle de la zone 4R, les quatre types de dynamiques spatiales ont été trouvés, mais la dynamique de densité proportionnelle D_2 prédomine. Des dynamiques densité dépendantes apparaissent à partir de 2006 et sont associées aux variations de biomasse.

➤ La dynamique observée est différente selon l'échelle spatiale considérée. À grand échelle, la morue est seulement contrainte par les facteurs environnementaux. À petite échelle, les conditions environnementales et la densité agissent conjointement.

➤ L'étude suggère que la dynamique spatiale de la morue est plus complexe que prévu. Nous suggérons un scénario probable où, aussi longtemps que l'espace est disponible, la même espèce peut progresser d'une dynamique à l'autre pour maximiser sa niche écologique de manière indépendante ou dépendante de la biomasse, en fonction des contraintes environnementales.

➤ Dans l'hypothèse, où des composantes reproductrices dans la zone 4S (Côte Nord) ont été perdues, comme cela été suggéré, et si la dynamique de densité-dépendance persiste, la population de morue de la zone 4R (côte ouest de Terre-neuve) pourrait alimenter le reste de la sous-population locale de la zone 4S, soit par un mélange avec la population résiduelle ou par un repeuplement entier de la zone 4S par de nouveaux migrants venus de 4R.

5. Références

Anderson, J.T., and Gregory, R.S. 2000. Factors regulating survival of northern cod (NAFO 2J3KL) during their first 3 years of life. *ICES Journal of Marine Science*, 57: 349-359.

Biondel, J. 1995. Biogéographie, Approche écologique et évolutive. Ed. Masson. 297pp.

Cushing, D.H. 1972. The production cycle and the numbers of marine fish. *Symposium Zoological Society of London*, 29: 213-232.

Fréon, P., and Misund, O.A. 1999. Dynamics of pelagic fish distribution and behavior: effects on stock assessment. *Blackwell, Fishing News Book*, London.348 pp.

Fretwell, S.D., and Lucas, H.L. Jr. 1970. On territorial behaviour and other factors influencing habitat distribution in birds. I. Theoretical development. *Acta Biotheoretica*, 19: 16-36.

Hillborn, R. and Walters, C. J. 1992. Quantitative fisheries stock assessment: choice dynamics and uncertainty. *Chapman and Hall*, New York. 570 pp.

MacCall, A.D. 1990. Dynamic geography of marine populations. *Washington Sea Grant Press*, Seattle, WA., USA, 153 pp.

Pettigau, P. 1998. Biomass-dependent dynamics of fish spatial distributions characterized by geostatistical aggregation curves. *ICES Journal of Marine Science*, 55: 443-453.

Robichaud, D., and Rose, G.A. 2006. Density-dependent distribution of demersal juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) in Placentia Bay, Newfoundland. *ICES Journal of Marine Science*, 63: 766-774.

Swain, D.P., and Castonguay, M. 2000. Final report of the 2000 annual meeting of the fisheries oceanography committee including the report of the workshop on the cod recruitment dilemma. DFO Canadian Stock Assessment Secretariat Proceeding Series 2000/17, 113 pp.

Yvelin, J-F., Fréchet, A., and Brêthes, J-C. 2005. Migratory routes and stock structure of cod from the Northern Gulf of St. Lawrence (3Pn, 4RS). *Canadian Science Advisory Secretariat Research Document*, 2005/055, 50pp.