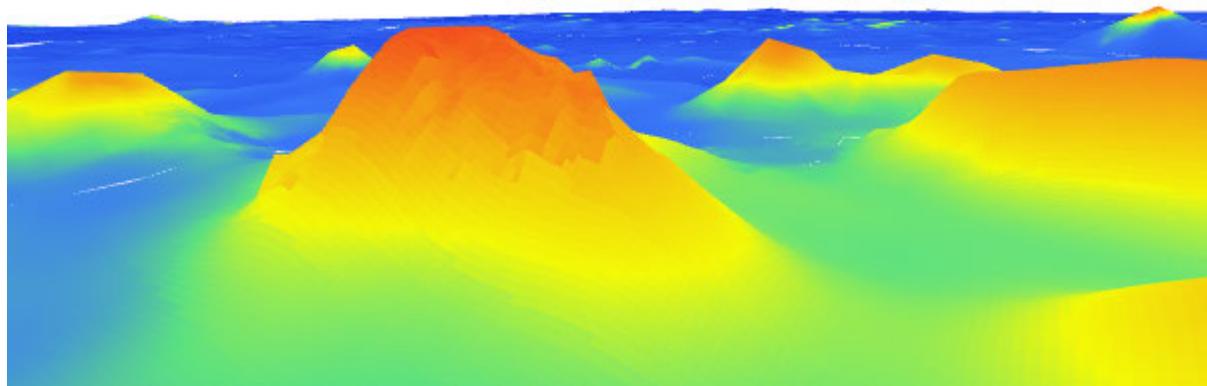

Les monts sous-marins de Polynésie française



Lucie Jean-Marius
Dan Meller
Gonzague de Carpentier
Mehdi Zhioua



Août 2020

Citation : Jean-Marius L., Meller D., de Carpentier G., Zhioua M. *Les monts sous-marins de Polynésie française*, 2020

Table des matières

Résumé	1
1 Introduction	2
2 Géographie des monts sous-marins de Polynésie française	3
2.1 Bathymétrie générale	3
2.2 Monts sous-marins : inventaire et définition	6
2.3 Formation des monts sous-marins	9
3 Influence sur la vie marine	11
3.1 Influence sur le plancton	11
3.1.1 Phytoplancton	11
3.1.2 Zooplancton	16
3.2 Influence sur les ressources pélagiques	18
3.2.1 Généralités sur la pêche hauturière en Polynésie française	18
3.2.2 Abondance	19
3.3 Les écosystèmes des monts sous-marins	25
3.3.1 Hétérogénéité spatiale, conditions environnementales et composition des communautés	25
3.3.2 Biodiversité des monts sous-marins : richesse spécifique	26
3.3.3 Mont sous-marin et effet d'île : connectivité et endémisme	27
3.3.4 Architecture trophique	29
4 Les ressources minières des monts sous-marins	32
4.1 Les différentes formations minérales sous-marines	32
4.2 Les ressources minières observées sur les monts sous-marins de Polynésie française	33
4.3 Les écosystèmes associés aux encroûtements cobaltifères	34
4.4 Exploitation minière : vulnérabilités et résilience des écosystèmes	35
5 Conclusion	38
6 Remerciements et Crédits	39
Bibliographie	39

Résumé

Les données bathymétriques actuelles permettent de déduire que la Polynésie française compte 509 monts sous-marins dans sa Zone Économique Exclusive en ne retenant que ceux culminant à moins de 3000m. Ces reliefs sous-marins extrêmes se situent en général dans l'alignement des archipels.

La vie autour des monts sous-marins est souvent liée à la présence de plancton. Des phénomènes hydrodynamiques induits par ces reliefs particuliers peuvent engendrer une augmentation de la concentration en phytoplancton et zooplancton, soit en accroissant les productivités primaire et secondaire, soit par advection de plancton depuis le large. Ceci peut donner lieu à une présence accrue d'autres espèces.

La biodiversité des monts sous-marins varie énormément en fonction du contexte géologique, hydrodynamique ou topographique. Les communautés biologiques associées sont généralement semblables à celles des pentes des îles les plus proches, bien que certains monts présentent une faune benthique plus abondante. Ils sont le lieu d'écosystèmes complexes et attirent une partie de la faune pélagique y demeurant pour se reproduire, se nourrir ou s'y arrêtant en cours de migration.

Les monts sous-marins présentent un intérêt du point de vue des ressources halieutiques. En effet, la pêche hauturière en Polynésie française est constituée de palangriers ciblant le thon obèse, le thon germon et le thon à nageoires jaunes. Certains auteurs ont montré qu'une fraction substantielle des monts sous-marins (16 % des 509 recensés) auraient un effet sur l'agrégation des thons. Les monts sous-marins permettent également une pêche de poissons profonds dits "paru" réputés pour leur qualité.

Sur le plan minéral, des formations minérales riches en cobalt appelées encroûtements cobaltifères ont été observées sur les monts sous-marins. Cependant, il n'existe pas de données sur la répartition précise de ces encroûtements en Polynésie. Leur exploitation semble aujourd'hui difficile, tant en termes économiques qu'environnementaux, ceux-ci abritant des écosystèmes vulnérables potentiellement distincts du reste des monts sous-marins.

1. Introduction

De définition variable et arbitraire, les monts sous-marins désignent intuitivement des reliefs immergés que l'on qualifierait de montagnes s'ils étaient émergés. Entre fantasmes et réalités, plusieurs hypothèses ont été émises autour des ressources biologiques et minérales de ces singularités topographiques.

Afin d'en savoir davantage sur ces géants des mers, plusieurs campagnes d'exploration ont été menées. L'ampleur des moyens à mobiliser et l'éloignement des monts sous-marins limitent cependant notre connaissance globale du sujet. En effet, certaines études se sont focalisées sur un mont sous-marin en particulier, d'autres ne présentent pas suffisamment de données pour pouvoir corroborer des modèles théoriques généraux.

En particulier, les monts sous-marins répartis sur les 5 millions de km² de la ZEE de Polynésie française, bien que présents depuis longtemps dans la culture polynésienne, demeurent largement méconnus. Leur richesse, tant sur le plan biologique que minéral stimule des volontés de recherche, d'exploitation mais aussi plus récemment de protection à l'instar du plan de gestion de l'Aire Marine Gérée de Polynésie française.

Plus récemment, l'évolution des techniques d'exploitation des données satellites a permis d'obtenir de nouvelles informations sur les reliefs sous-marins et sur les paramètres physiques de la surface des océans. Le développement de nouveaux outils informatiques tels que les logiciels SIG et les langages de programmation dédiés au traitement de larges quantités de données facilite de nouvelles approches quantitatives du sujet.

Dans ce contexte, cette étude vise à donner un aperçu le plus clair possible des monts sous-marins de Polynésie française.

2. Géographie des monts sous-marins de Polynésie française

2.1 Bathymétrie générale

Les reliefs sous-marins peuvent être déduits à partir de plusieurs techniques différentes.

Les **sondeurs acoustiques** permettent de mesurer directement la hauteur de la colonne d'eau, soit le long d'une ligne (sondeur monofaisceau), soit le long d'un couloir (sondeur multifaisceaux). Comme ces techniques sont coûteuses à mettre en oeuvre, l'immense majorité des reliefs océaniques n'a pas été observée directement.

Les **mesures satellitaires** permettent de combler partiellement ce manque d'information. En effet, comme la densité de la croûte océanique (environ 2,9) est bien plus élevée que celle de l'eau de mer (environ 1), une excroissance du plancher océanique induit une modification du champ gravitationnel. L'intensité de pesanteur est ainsi légèrement plus élevée au-dessus d'un mont sous-marin. L'eau est alors légèrement attirée par le relief ce qui induit une élévation du niveau de la mer de l'ordre du mètre à l'aplomb du mont.

Plus rigoureusement, la surface de la mer suit un géoïde, c'est-à-dire une surface de même énergie potentielle de pesanteur. Or le géoïde est plus haut au-dessus des monts sous-marins, donc le niveau de la mer l'est également.

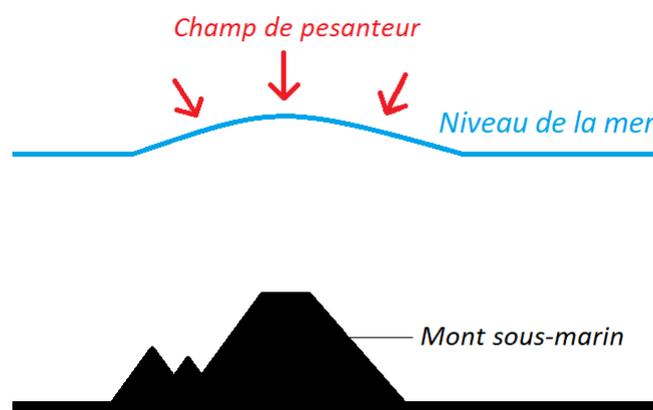


FIGURE 2.1: Effet des reliefs sous-marins sur le niveau de la mer

Ces différences de hauteur moyenne de la surface peuvent être mesurées par satellite ¹ grâce au temps de retour d'un signal réfléchi par la surface. Des traitements numériques permettent ensuite de supprimer les autres causes de variations spatiales et temporelles du

¹Avec une précision de quelques cm

niveau de la mer ce qui permet de reconstituer une carte floue des fonds marins là où ils n'ont pas été directement observés par sondeur acoustique.

La plateforme GEBCO propose une bathymétrie globale des océans à partir des méthodes susmentionnées. Nos données bathymétriques reposent sur la version 2020.

En Polynésie française, les campagnes bathymétriques acoustiques ont principalement été réalisées en étoile autour de Tahiti et également autour des Marquises.

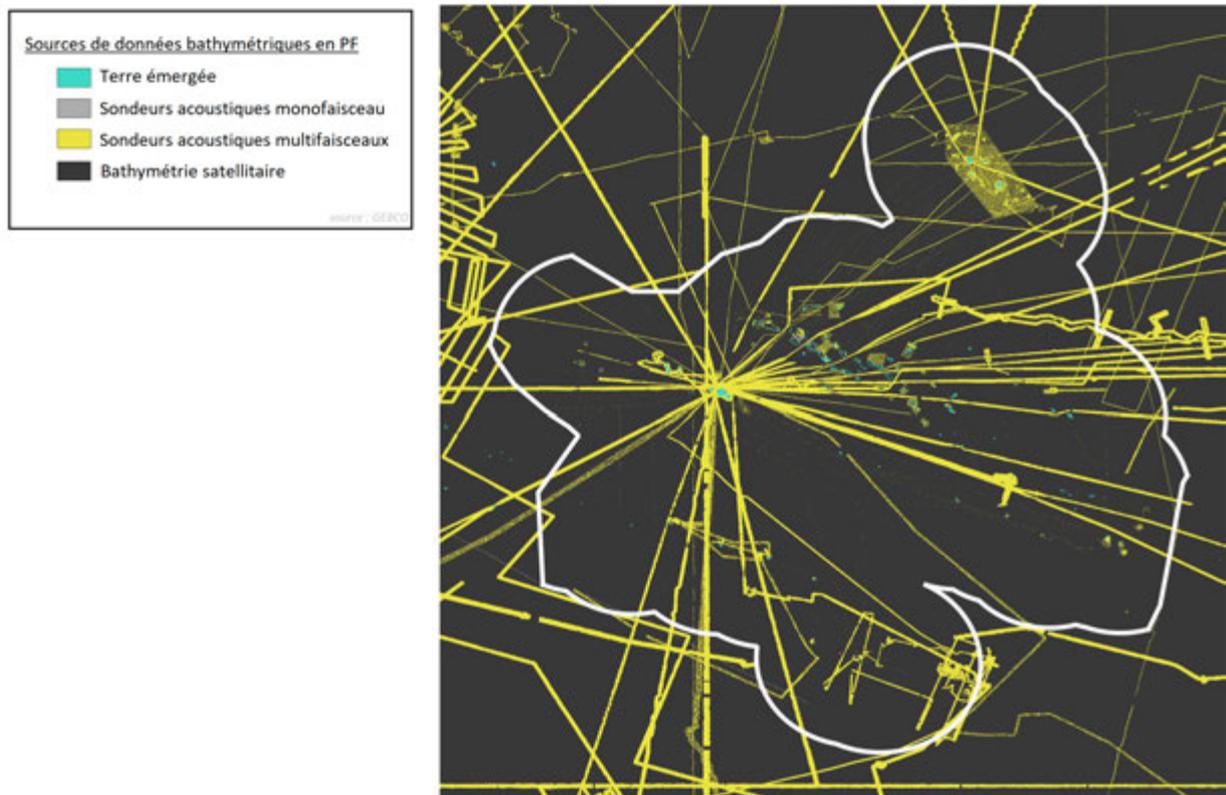


FIGURE 2.2: Source des données bathymétriques en Polynésie française

Ces données permettent d'obtenir la distribution de la profondeur des fonds marins sur l'ensemble de la ZEE polynésienne (Figure 2.3) ainsi que la carte à la Figure 2.9.

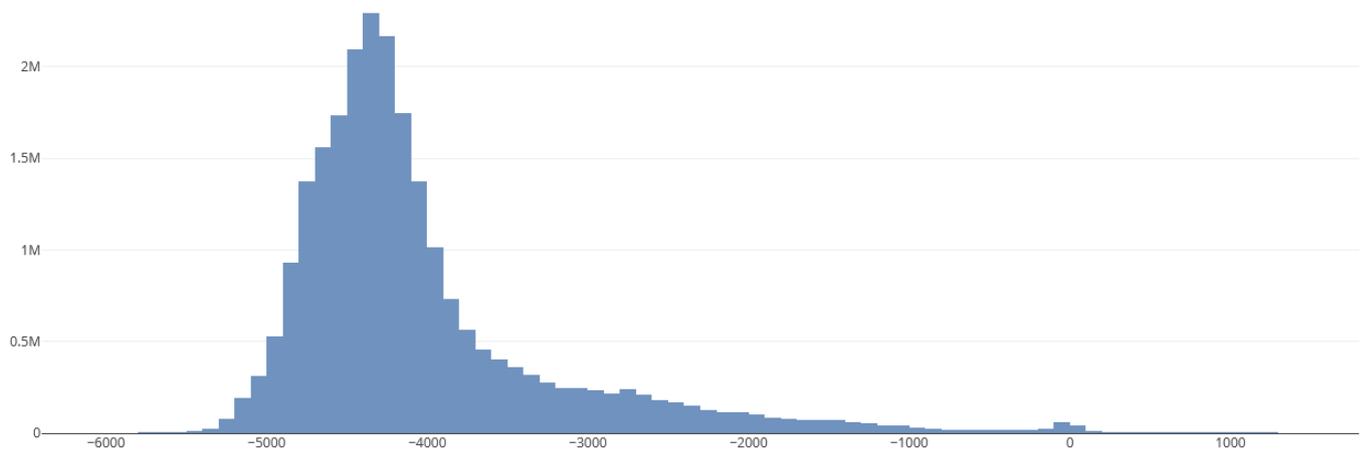


FIGURE 2.3: Distribution de la profondeur (mètres) des fonds marins de la ZEE de Polynésie française

On remarque que le plancher océanique se situe aux alentours de 4.3km de profondeur. L'augmentation entre 0 et 100m semble être due aux récifs coralliens.

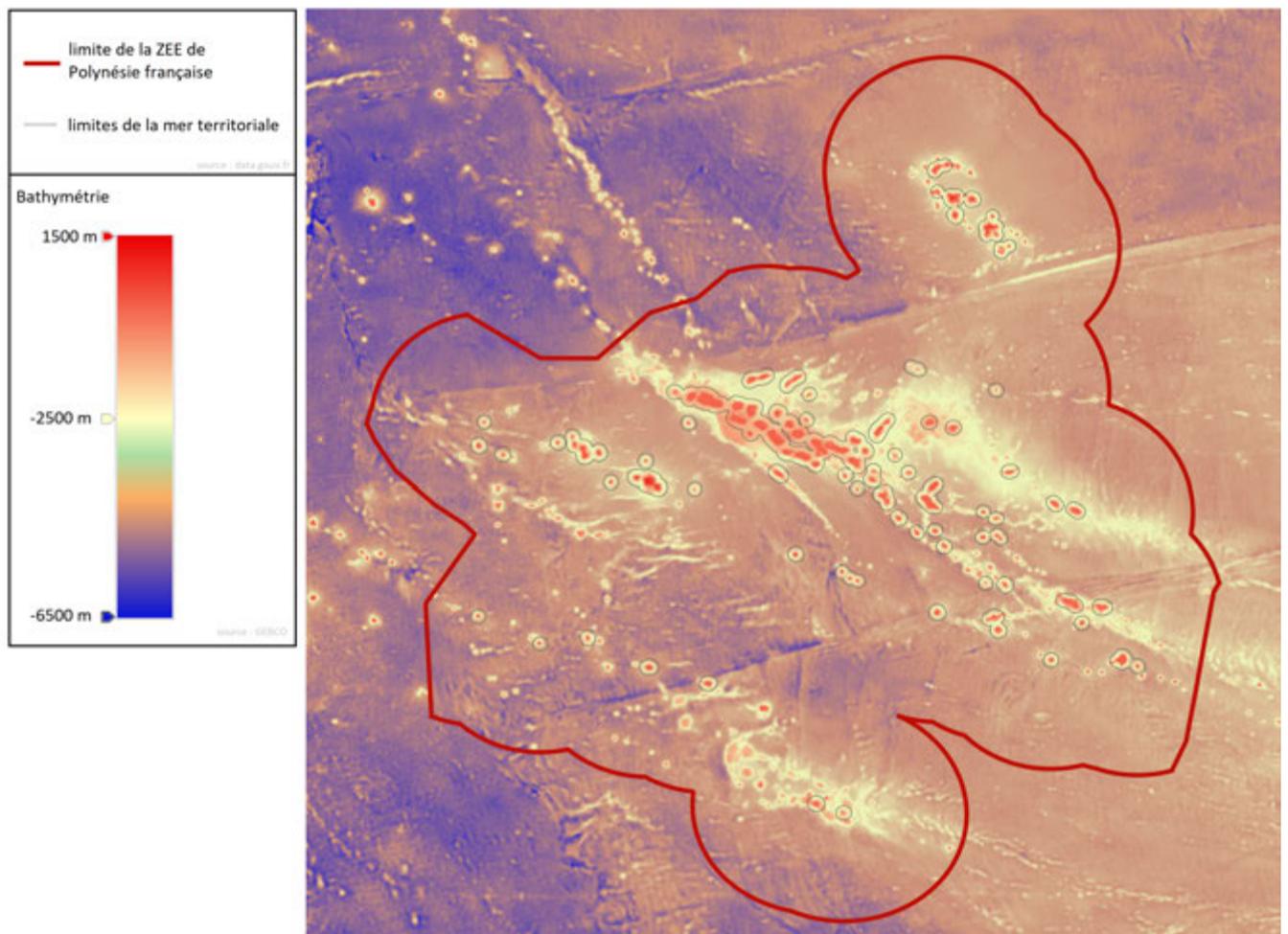


FIGURE 2.4: Bathymétrie générale de la Polynésie française

2.2 Monts sous-marins : inventaire et définition

Une des bases de données de monts sous-marins communément utilisée dans la littérature est celle de Yesson et al. (2011) [23]. Elle identifie 766 monts dans la ZEE de Polynésie. Bien que cette base soit aisément accessible en ligne et très utile d'un point de vue statistique car elle couvre l'ensemble du globe, on ne peut la considérer satisfaisante au niveau régional de la Polynésie française. En effet :

- Certaines terres émergées sont confondues avec des monts sous-marins.
- Certains monts sous-marins sont répertoriés plusieurs fois (voir définition plus bas).
- Les flancs de certaines îles sont confondus avec des monts sous-marins.
- Certains monts sous-marins ne sont pas répertoriés.

Nous avons donc choisi de constituer une base de données plus précise des monts sous-marins de Polynésie française.

Les monts sous-marins sont généralement définis dans la littérature comme des reliefs mesurant plus de 1000m de hauteur et présentant une forme vaguement ellipsoïdale [21].

Nous avons préféré ici ne retenir que les monts dont la profondeur sommitale se situe entre 0 et 3000m ².

Nous avons également choisi de considérer que deux maxima locaux de la hauteur des fonds marins ne constituaient qu'un seul et même mont sous-marin si l'on peut passer de l'un à l'autre sans rejoindre le plancher océanique. ³ Cette définition permet d'avoir un nombre de monts relativement stable par rapport à la qualité de la bathymétrie. En effet, la bathymétrie satellite ne permet souvent pas de distinguer deux sommets qui seraient reliés par un col.

Méthodologie adoptée

1. Extraction algorithmique des maxima locaux de la bathymétrie régionale
2. Suppression des maxima locaux situés sur des terres émergées
3. Sélection des maxima locaux situés au-dessus de -3000m.
4. Nettoyage manuel ^a

^aLes zones dont la bathymétrie a été acquise par sondeurs acoustiques présentent une meilleure résolution et donc de nombreux maxima locaux ne correspondant pas à des monts sous-marins.

Nous identifions ainsi 509 monts sous-marins dans la ZEE polynésienne. La base de données ainsi produite est librement disponible en supplément de cette étude. Parmi eux,

²Cette condition, facile à mettre en oeuvre, est souvent équivalente au critère des 1000m de hauteur car le plancher océanique se situe autour de 4km de profondeur en Polynésie française

³Pour donner un exemple plus terrestre, cela revient à considérer que le Mont Blanc et le Dôme du Goûter ne forment qu'un seul et même mont.

193 ont été observés directement par sondeurs acoustiques⁴, 345 sont à moins de 5km d'un mont déjà identifié par Yesson et al. [23]. Pour ces monts, les profondeurs sont en général en bon accord, avec des écarts de l'ordre de 100m sur les monts dont la profondeur est supérieure à 500m. D'autres bases de données de monts sous-marins de meilleure facture existent [10] [22]. Cependant celles-ci ne mentionnent qu'environ 340 monts sous-marins en Polynésie française. Cette différence semble être principalement due aux avancées de la bathymétrie satellite sur les 10 dernières années.

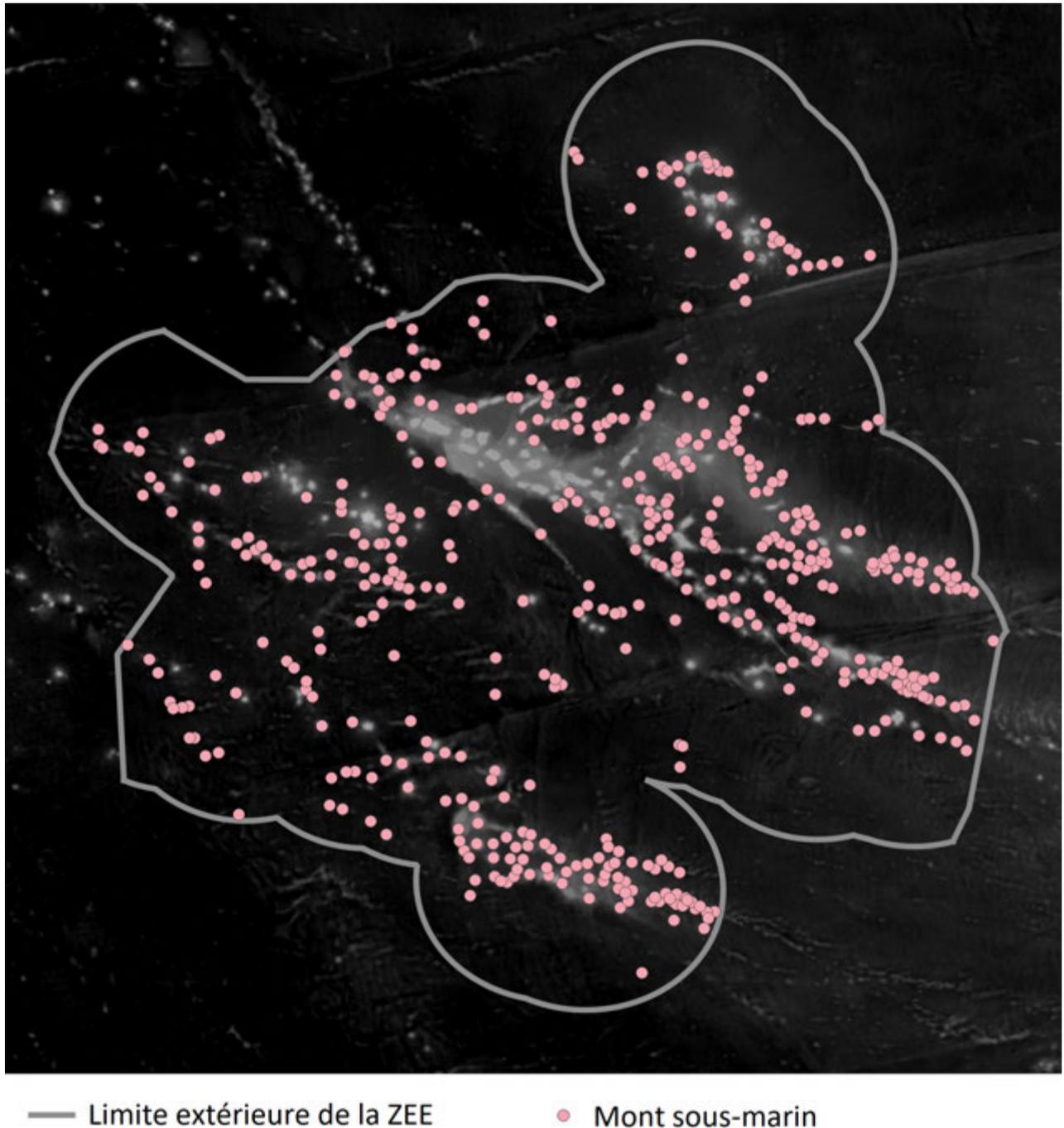


FIGURE 2.5: Monts sous-marins de Polynésie française

⁴Plus exactement, 193 monts ont leur sommet situé à moins de 2km d'une zone où la bathymétrie a été acquise de façon acoustique. Pour 153 d'entre eux, le sommet a été directement observé.

Profondeur du sommet	Nombre de monts sous-marins
Entre 0 et -100m	21
Entre 0 et -200m	26
Entre 0 et -300m	32
Entre 0 et -500m	48
Entre 0 et -700m	56
Entre 0 et -1000m	93
Entre 0 et -2000m	293
Entre 0 et -3000m (total)	509

FIGURE 2.6: Profondeur des monts sous-marins de Polynésie française

Bien que la plupart des monts sous-marins répertoriés présentent une forme globalement circulaire, certains reliefs sous-marins dérogent à la règle, à l'instar des rides présentes au Sud de Tahiti. Il n'y a à ce jour pas de raison fondamentale de distinguer ces formations des monts sous-marins, si ce n'est du point de vue hydrodynamique, les courants demeurant fortement conditionnés par les spécificités de chaque mont sous-marin.

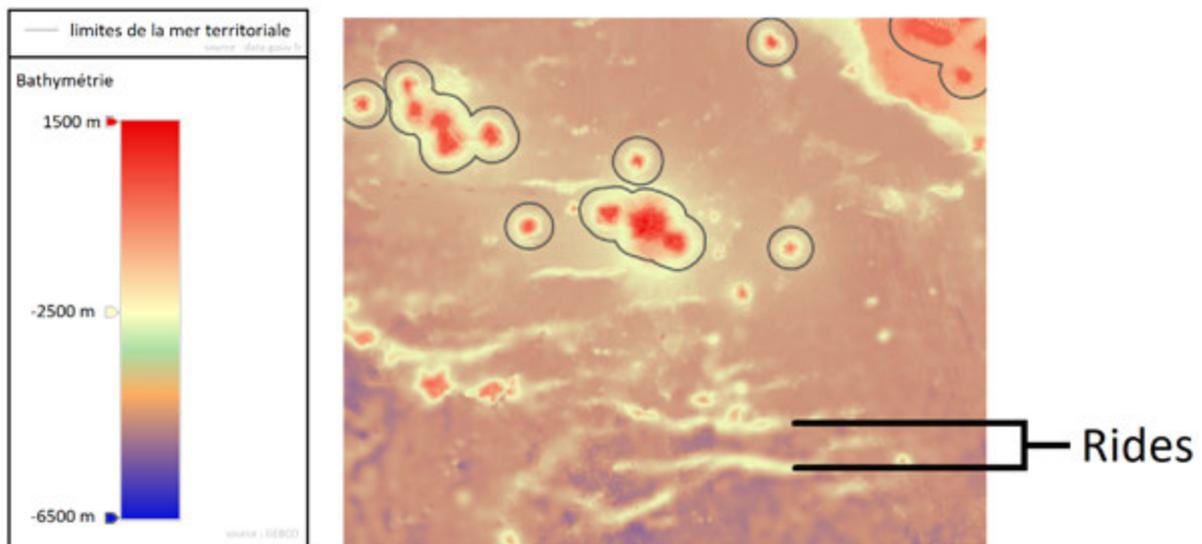


FIGURE 2.7: Rides sous-marines au Sud de Tahiti

Le terme de **haut-fond**, plus général, plus compréhensible et largement utilisé par les pêcheurs permet de désigner efficacement l'ensemble des excroissances du plancher océanique qui ne forment pas des terres émergées.

Certains monts sous-marins possèdent des noms qui retracent l'historique de leur découverte [10], parfois liés à une activité volcanique (Teahitia, Rocard, Macdonald, ...) [3]. La chaîne Tarava, au sud-ouest de Tahiti est également bien connue grâce au programme ZEPOLYF1 de 1996 qui a permis d'acquérir la bathymétrie de la zone par sondeurs acoustiques.

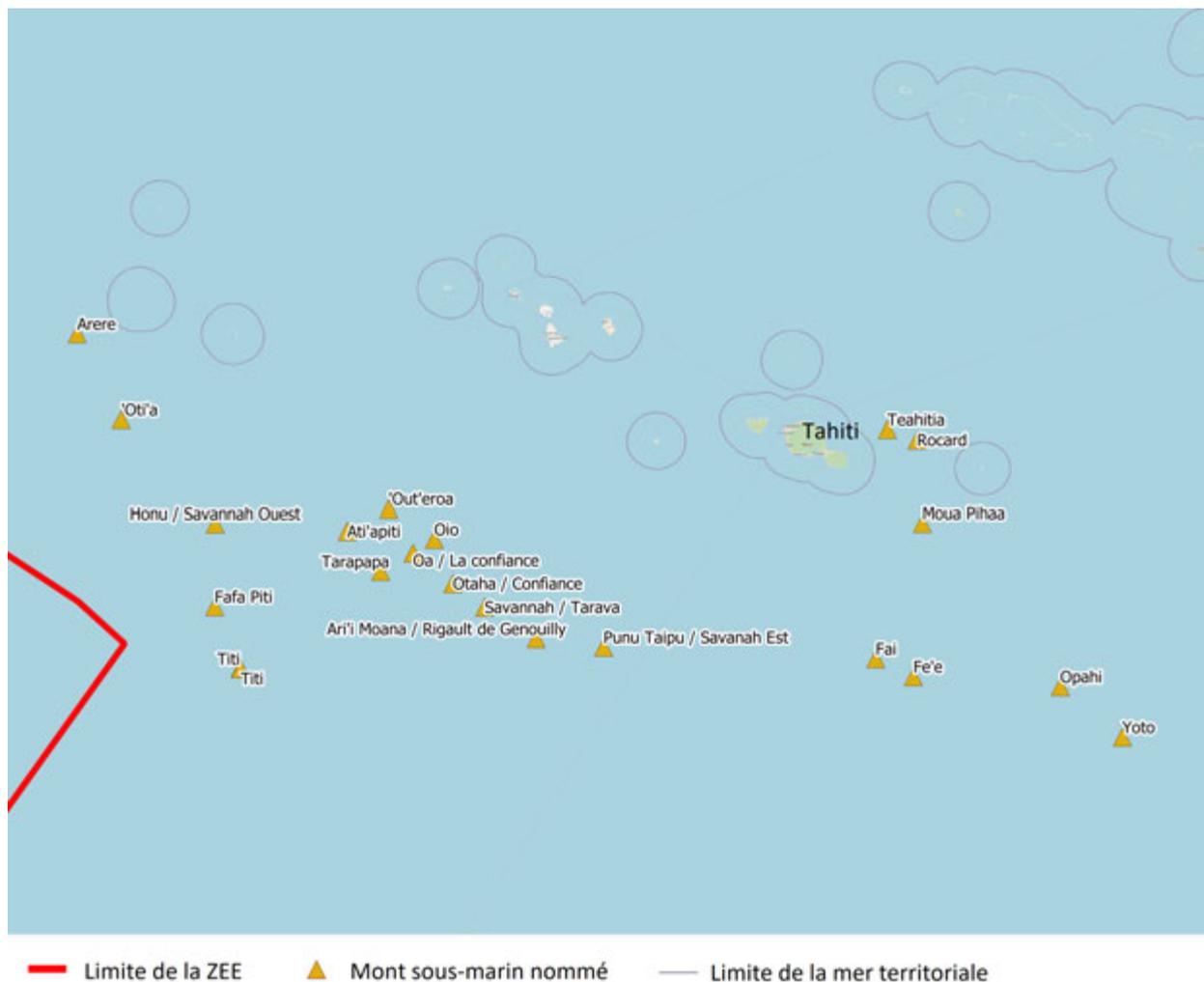


FIGURE 2.8: Monts sous-marins nommés autour des îles de la Société

2.3 Formation des monts sous-marins

Les monts sous-marins sont formés par des processus volcaniques selon le même procédé que les îles : Les reliefs sont formés au niveau d'un point chaud et dérivent ensuite avec la croûte océanique, ce qui forme des alignements d'îles et de monts sous-marins.

Deux points chauds ont manifesté une activité au cours du siècle dernier : le point chaud de la Société et le point chaud de Macdonald [3]. Le premier est associé à l'activité sismique des monts sous-marins Teahitia, Rocard et Moua Pihaa, à l'est de Tahiti. Le second, à l'origine des îles Australes, est associé au mont Macdonald ⁵.

Ce dernier culmine à une trentaine de mètres sous la surface et se situe dans la ZEE de Polynésie française à 30km de la ligne officielle. La faible profondeur du sommet et l'activité du volcan ont pu susciter l'espoir que le sommet perce la surface, ce qui pourrait engendrer une extension majeure de la ZEE.

⁵Le géophysicien Daniel Raoux raconte pourquoi ce mont sous-marin en ZEE française porte un nom américain. Lors d'une crise éruptive du volcan en 1967, les Français et les Américains détectent tous deux l'origine du séisme. Cependant, l'Américain Rockne Johnson se rend le premier sur zone avec un voilier et trouve le haut-fond en 1969. Il lui donnera alors le nom d'un de ses professeurs de géologie : MacDonald. Source : <https://www.tahitiheritage.pf/volcan-mac-donald-australes/>

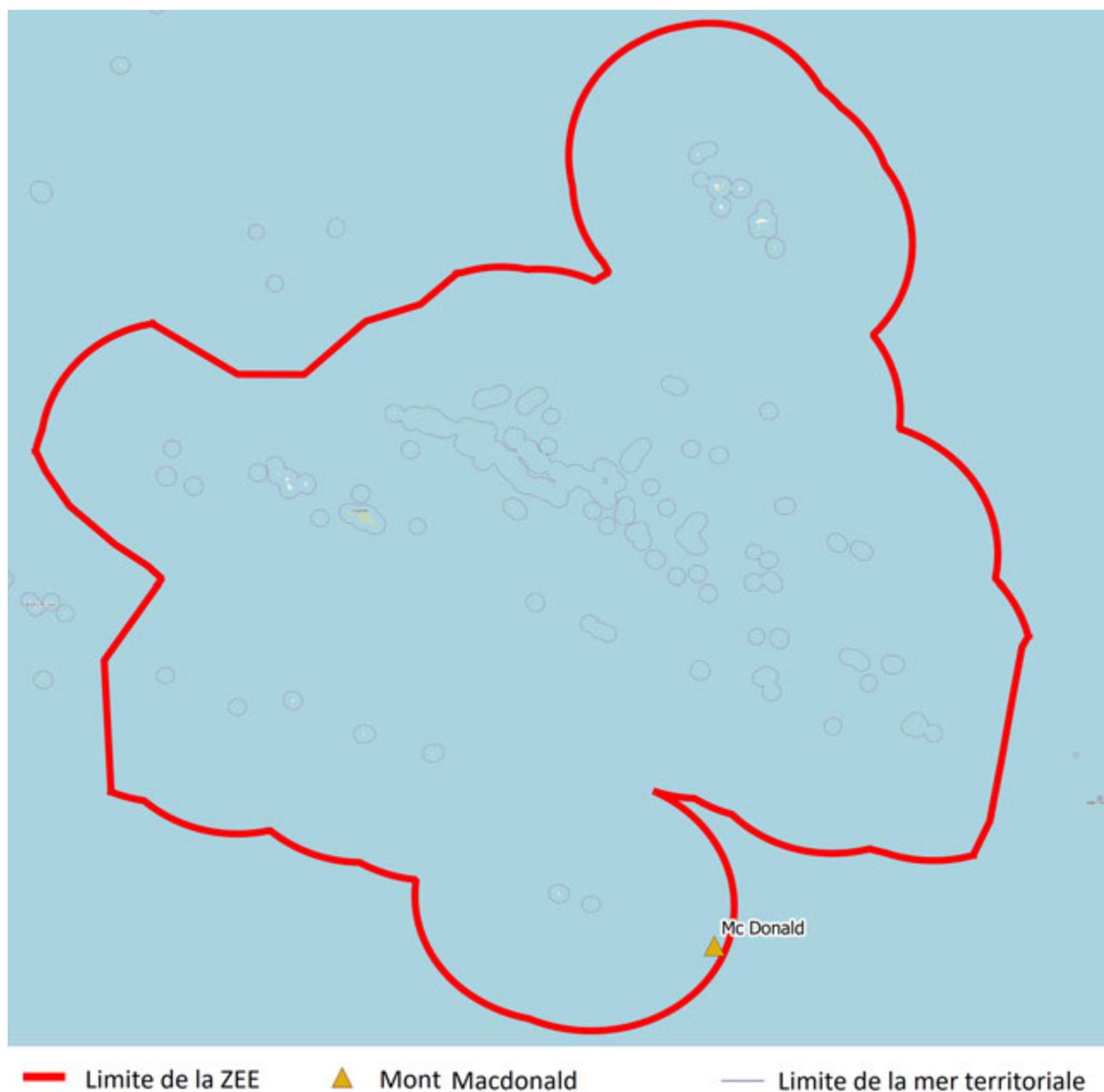


FIGURE 2.9: Localisation du volcan MacDonald

L'équipe du commandant Cousteau s'est rendue sur place en 1988⁶. Le sommet du mont présentait alors de nombreuses sources hydrothermales.

⁶<https://www.youtube.com/watch?v=82xJNpF8jRY>

3. Influence sur la vie marine

3.1 Influence sur le plancton

Phytoplancton et zooplancton

Le plancton désigne l'ensemble des organismes "errant", incapables de lutter contre le courant. Le phytoplancton est le plancton autotrophe, c'est-à-dire capable d'utiliser la matière minérale pour produire de la matière organique. Le zooplancton est le plancton hétérotrophe, c'est-à-dire qu'il produit sa matière organique à partir de matière organique extérieure.

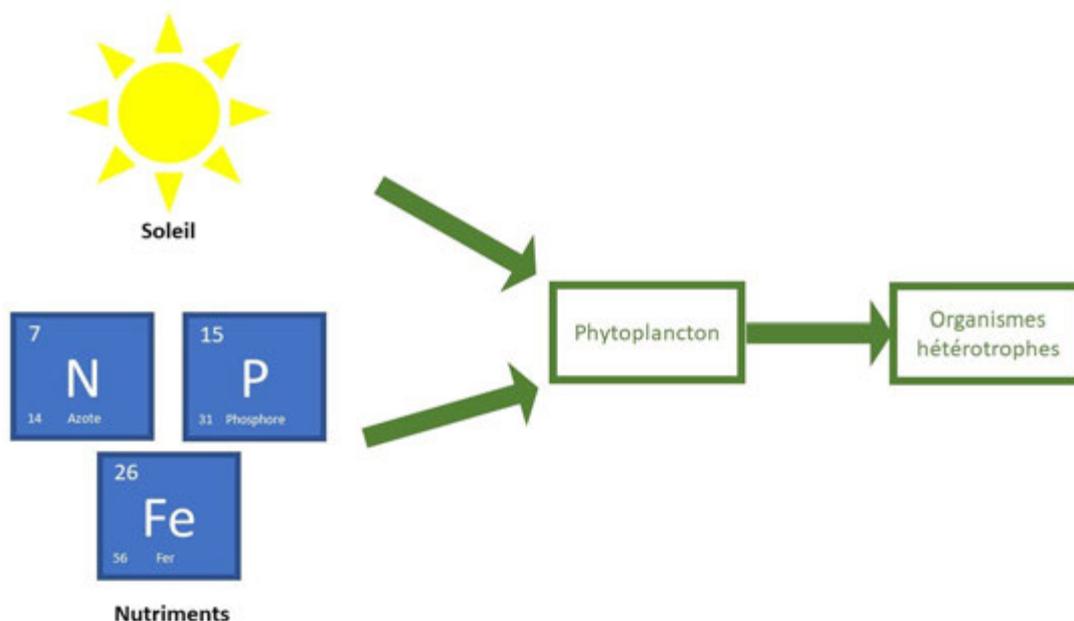


FIGURE 3.1: Schéma de la place du phytoplancton dans les chaînes alimentaires océaniques

3.1.1 Phytoplancton

Une abondance de phytoplancton au-dessus d'un mont sous-marin pourrait être à l'origine d'une biomasse et d'une biodiversité accrue dans les environs du relief. L'abondance de phytoplancton à la surface de l'océan est la plupart du temps mesurée indirectement en observant la couleur de l'eau grâce à des images satellitaires. En effet, les cellules du phytoplancton contiennent de la chlorophylle a, une molécule au coeur du mécanisme de la photosynthèse et qui colore l'eau.

Ainsi, de nombreux chercheurs ont tenté de déterminer s'il y avait effectivement une plus grande abondance de chlorophylle a au-dessus des monts sous-marins en moyenne. Des concentrations de chlorophylle plus élevées au-dessus de monts sous-marins ont souvent été observées. Ces anomalies positives sont aussi appelées SICE (Seamount Induced Chlorophyll Enhancement). Cependant, l'hypothèse selon laquelle les SICE sont à l'origine d'une biomasse et d'une biodiversité accrues est contestée, car il est difficile de savoir si l'intensité et la durée de ces anomalies sont suffisamment grandes pour que l'augmentation de la production se propage à travers la chaîne alimentaire.

Une étude récente d'Astrid B. Leitner (2020) [11] semble donner une réponse à cette question. En analysant des cartes de chlorophylle à haute résolution spatiale établies entre 2006 et 2016, elle a observé des SICE importants et de longue durée autour de 17 % des monts sous-marins du Pacifique et autour de 45 % de ceux d'entre eux dont le sommet est à une profondeur inférieure à 100m. Elle montre également que ces anomalies sont plus fréquentes autour des monts sous-marins peu profonds et proches de l'équateur et lorsque la température de surface de l'eau est plus élevée.

Nom du mont	Identifiant	Longitude	Latitude	Profondeur du sommet (m)
Banc du Président Thiers	274	-145,977083	-24,63125	-23
Teahitia	41	-148,814583	-17,56875	-1573
Banc Portland	302	-134,360416	-23,65625	-12
Mont du Lotus	318	-150,977083	-22,58125	-433
Banc Lawson	509	-140,7685	-8,6982	-14
Sans nom	231	-144,01875	-27,422917	-22
Sans nom	206	-143,39375	-28,152083	-505
Sans nom	446	-140,61875	-9,16875	-52

FIGURE 3.2: Tableau des monts sous-marins présentant des SICE relevés par Astrid B. Leitner et al. L'identifiant est celui utilisé dans notre base de données des monts sous-marins de Polynésie française

Cependant cette étude est très récente et n'a pas encore été validée par des pairs. Il semble que les monts sous-marins présentant des SICE trouvés en Polynésie française sont pour la plupart très proches des côtes, ce qui rend difficile la distinction entre l'IME ¹ et l'influence du mont sous-marin. De plus, lorsque le fond est à une profondeur inférieure à 30m, il devient visible sur les images satellite, ce qui fausse les calculs de concentration de chlorophylle en ces points. Astrid B. Leitner et al. ont bien pris en compte cet effet en appliquant un masque aux données pour supprimer ces points problématiques. Cependant, en appliquant le même masque, nous avons constaté qu'il restait des aberrations au-dessus des monts les moins profonds et sur les pentes des îles. Les figures 3.3 et 3.4 représentent les concentrations moyennes de chlorophylle a en surface au-dessus du banc du Président Thiers et du mont Teahitia respectivement ². Les pixels blancs correspondent aux points à des profondeurs inférieures à 30m. On voit qu'il reste des aberrations au-dessus du banc du Président Thiers (pixels bleus et verts). On constate une légère augmentation de la concentration en chlorophylle aux alentours de ce mont (pixels rouges), mais il est difficile

¹L'IME (Island Mass Effect) désigne la forte abondance de phytoplancton que l'on observe autour des îles. Les remontées d'eau à proximité des îles et l'érosion apportent des nutriments dans la zone euphotique, ce qui renforce la production primaire.

²Les données utilisées pour réaliser ces deux figures ont été téléchargées depuis le site <https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/erdMH1chlmday.html>.

de dire si elle est significative. Au sud-ouest du mont Teahitia on observe un fort IME autour de Tahiti Iti, mais aucune augmentation significative de la concentration en chlorophylle a au-dessus du mont lui-même. Ainsi, l'étude d'Astrid B. Leitner est très intéressante mais demande encore à être validée.

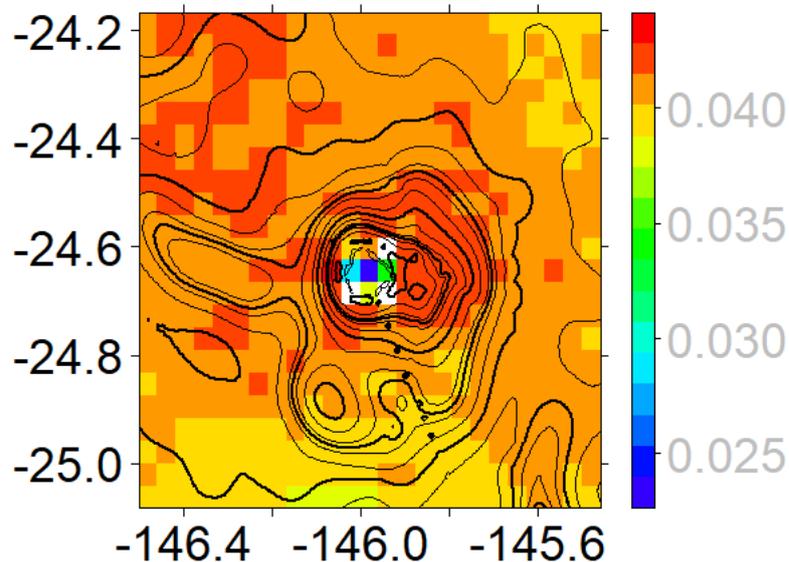


FIGURE 3.3: Concentration moyenne de chlorophylle a en mg/m^3 autour du banc du Président Thiers entre janvier 2015 et janvier 2020.

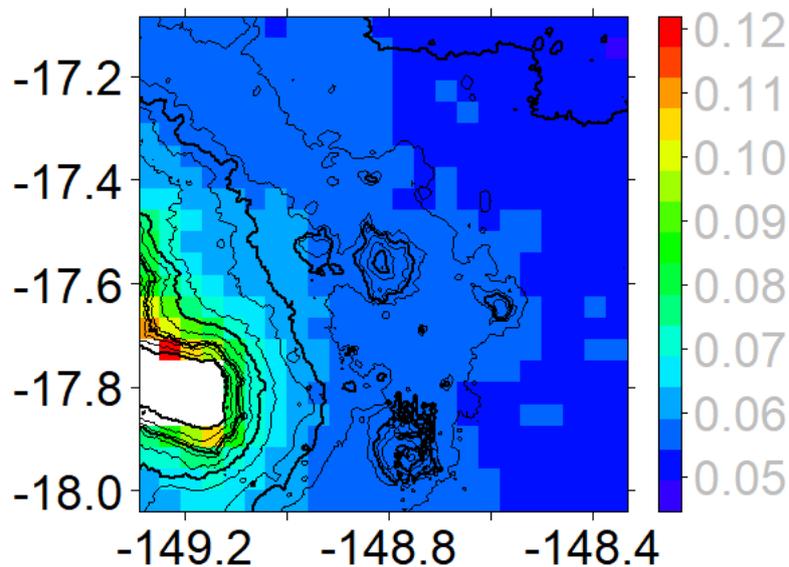


FIGURE 3.4: Concentration moyenne de chlorophylle a en mg/m^3 autour du mont Teahitia entre janvier 2015 et janvier 2020.

En revanche, il est important de garder à l'esprit que les données satellitaires ne permettent de calculer que la concentration en chlorophylle **à la surface**. Or les explications physiques du phénomène de SICE présentées ci-dessous laissent penser que les SICE ont

beaucoup plus de chance de se produire en bas de la couche euphotique (dont la limite basse se situe vers 200m de profondeur en Polynésie française) et pourraient n'avoir aucun impact sur la concentration en chlorophylle à la surface étant donnée la forte stratification de cette couche. C'est d'ailleurs ce qui est visible sur la figure 3.5. Les concentrations de surface sont les mêmes partout. En revanche, les concentrations entre 50 et 100m sont grandement affectées par la présence du mont.

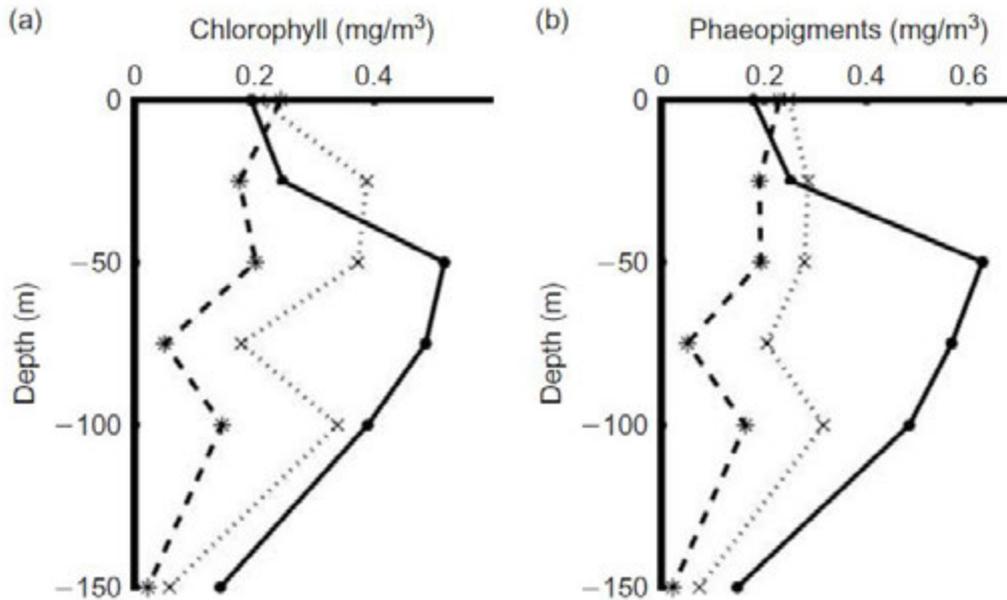


FIGURE 3.5: Concentrations en chlorophylle a (a) et phaeopigments (b) en fonction de la profondeur : au-dessus du sommet (courbe pleine), au-dessus des flancs (croix), loin du mont (étoiles). Mesures réalisées sur le mont Seine en mars et avril 2003. Source : [21]

Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer le renforcement de la production primaire au niveau de certains monts sous-marins à partir de phénomènes hydrodynamiques causés par l'interaction entre un mont sous-marin et des courants. La plus répandue dans la littérature est celle des colonnes de Taylor. Lorsque qu'un courant constant rencontre un mont sous-marin de forme simple, dans un océan homogène, un vortex appelé colonne de Taylor se forme au-dessus du mont et provoque de forts échanges verticaux.

Ainsi, des eaux froides et riches en nutriments remontent vers la surface (phénomène d'upwelling similaire à l'upwelling équatorial et aux upwellings côtiers) et atteignent la zone euphotique (la zone suffisamment lumineuse pour que la photosynthèse se produise), ce qui enclenche une production primaire intense (3.6). En pratique, la stratification de l'océan empêche la colonne de Taylor d'atteindre la surface, le relief du mont sous-marin peut être très complexe et le courant n'est pas constant, ce qui rend très rare la formation d'une colonne de Taylor observable sans ambiguïté depuis la surface. Cependant, il est raisonnable de penser que dans bon nombre de cas, les turbulences engendrées par la présence d'un mont sous-marin accélèrent le mixage vertical des eaux et apportent des nutriments à la surface.[21]

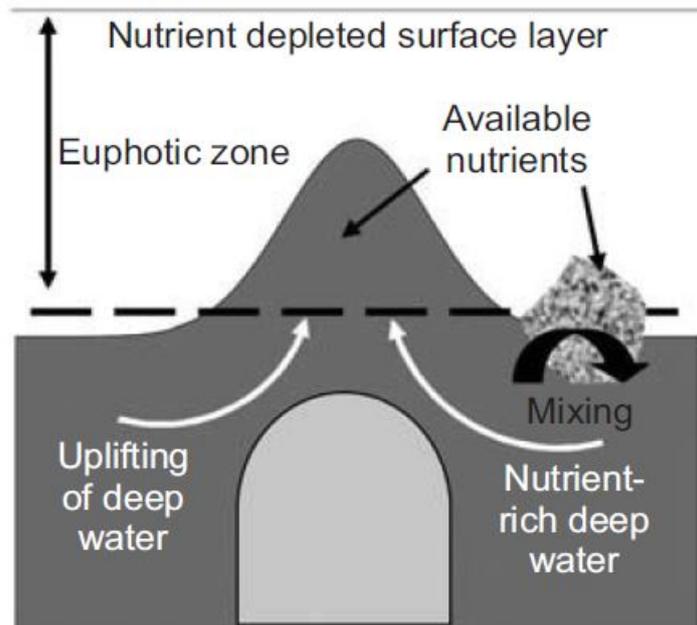


FIGURE 3.6: Phénomènes hydrodynamiques au niveau d'un mont sous-marin et flux verticaux de nutriments associés. Source : [21]

Astrid B. Leitner a par ailleurs mesuré une corrélation négative entre profondeur et température de surface de l'eau dans des carrés de 100km de côté autour de monts sous-marins, ce qui semble indiquer qu'un upwelling d'eau froide a effectivement lieu dans bon nombre de cas. [11]

De plus, des phénomènes hydrodynamiques pourraient conduire à des cellules de circulation closes et stables qui auraient un effet de rétention sur le phytoplancton et l'ensemble de la matière organique. Ces cellules pourraient même piéger la matière organique apportée par le courant. Autrement dit, le mont sous-marin et les perturbations qu'il engendre formeraient une sorte de barrière accumulant la matière organique transportée par le courant. Ainsi, le phytoplancton pourrait s'accumuler au dessus du mont sous-marin. [21]

3.1.2 Zooplancton

De nombreuses études montrent une forte présence de necton, principalement des zooplanctivores, à la surface des monts sous marins peu profonds (zone euphotique), intermédiaires (jusqu'à 400m) et parfois profonds (d'une profondeur supérieure à 400m). [21]

Les premières publications à ce sujet (Uda and Ishino, 1958; Hubbs, 1959; Uchida and Tagami, 1984) ont avancé l'hypothèse que la présence de zooplancton est due à une production primaire locale plus importante qui se serait propagée dans la chaîne trophique. Bien que ceci soit vrai pour certains monts sous-marins peu profonds (présents dans la zone euphotique), les résultats de plusieurs campagnes d'explorations résumés dans *Seamounts : Ecology, Fisheries Conservation* (2007) montrent que les anomalies positives de phytoplancton et de chlorophylle sont rares et sont souvent de trop courte durée (quelques jours) pour pouvoir remonter la chaîne trophique (environ 1 mois).

De manière générale, pour qu'un mont sous-marin ait un impact sur la productivité en zooplancton, trois conditions doivent être remplies :

- La région doit être oligotrophe (c'est-à-dire pauvre en nutriments).
- Les upwellings d'eau riche en nutriments doivent remonter suffisamment haut pour atteindre la zone euphotique.
- Cette eau doit rester suffisamment longtemps au dessus du mont sous marin pour que le zooplancton puisse se développer (entre 1 semaine et 1 mois).

Ces trois conditions étant rarement remplies au-dessus des monts sous-marins [21], la présence de zooplancton proviendrait principalement d'un apport extérieur. Le modèle d'Isaac et Schwartzlose propose deux principaux mécanismes expliquant l'apport de zooplancton à la surface de monts sous-marins.

- D'une part, le zooplancton remonterait au sommet du mont sous marin au crépuscule et serait piégé au sommet. Des cellules de courants closes telles que les colonnes de Taylor renforcerait ce piège.

- D'autre part, des mouvements horizontaux d'advection amèneraient le zooplancton à être piégé au sommet de ces monts.

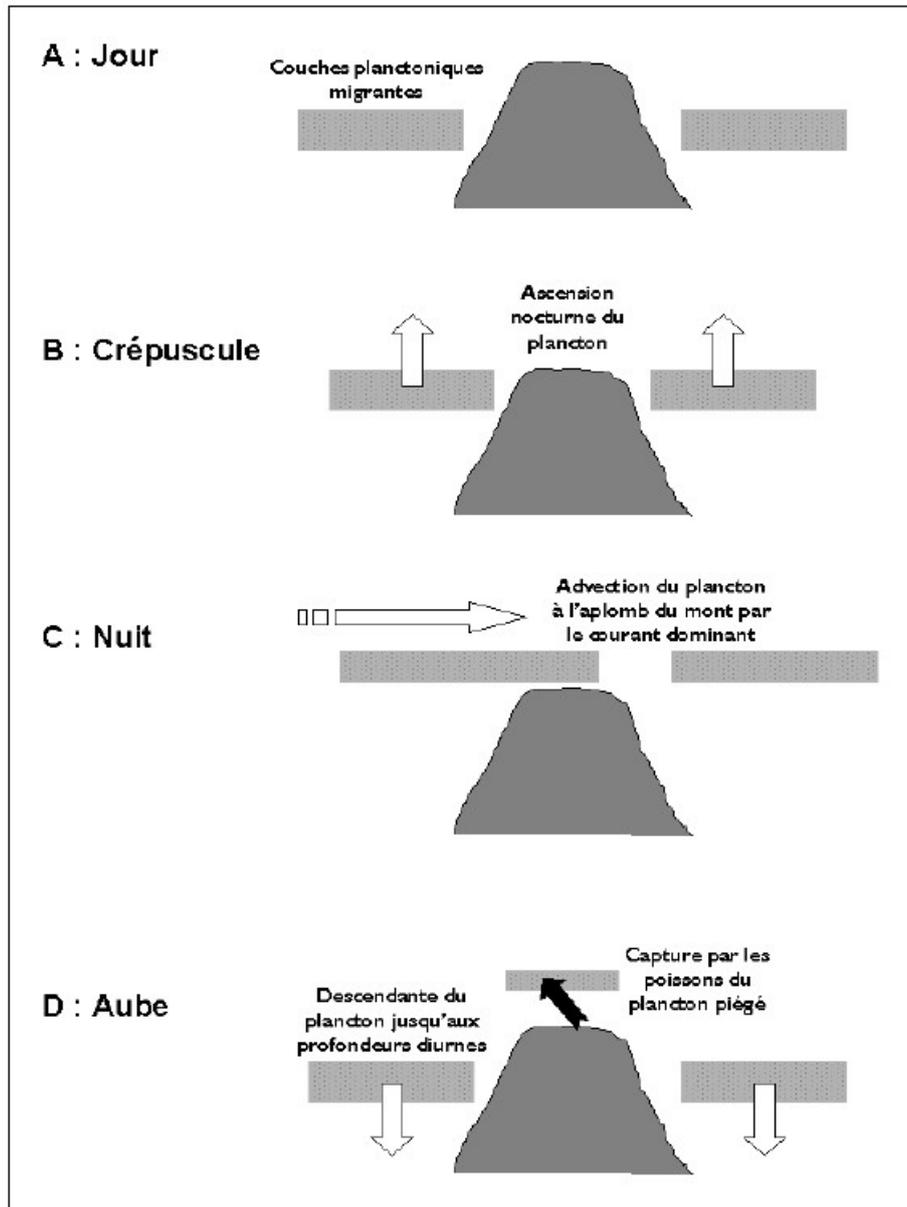


FIGURE 3.7: Mécanismes expliquant l'accumulation de zooplancton au sommet des monts sous-marins. Source : [17]

D'après [18], les mouvements **horizontaux** d'advection du microzooplancton sont **plus importants** d'un point de vue énergétique que les mouvement ascendants de zooplancton migrateur.

D'après [21], ce modèle théorique est conforté par des observations d'une lacune en phytoplancton recouvrant une zone correspondant au diamètre du sommet du mont sous-marin (*Euphausia pacifica* (Genin et al., 1994 ; Haury et al.,)). Cette zone (schématisée en C dans la figure 3.5) est due au déplacement du phytoplancton qui se situait autour du mont sous-marin en profondeur et qui a été transporté par le courant après être remonté à la surface durant la phase B.

3.2 Influence sur les ressources pélagiques

3.2.1 Généralités sur la pêche hauturière en Polynésie française

La Polynésie est aujourd’hui un sanctuaire assez préservé du point de vue de l’exploitation des ressources halieutiques et cela pour 3 raisons principales :

- Seule la pêche à la palangre est autorisée pour les professionnels.
- Les licences de pêches ne sont accordées qu’à des pêcheurs locaux (environ 70 thonniers).
- La surveillance de la ZEE est assurée par l’armée française grâce aux moyens de la Marine Nationale. La part croissante de nouvelles technologies (acquisition satellite, traitement numérique, ...) permet de surveiller efficacement l’immensité de la ZEE.

Trois espèces de thons sont principalement ciblées :

- Le thon germon (*Thunnus alalunga*) dans la zone centrale autour des îles de la Société et des Tuamotu
- Le thon à nageoires jaunes (*Thunnus albacares*) dans le nord de la ZEE (Marquises)
- Le thon obèse (*Thunnus obesus*) dans le nord de la ZEE (Marquises)

Les prises accessoires telles que le mahi mahi (*Coryphaena hippurus*), le saumon des dieux (*Lampris guttatus*) ou l’espadon (*Xiphias gladius*) peuvent souvent être valorisées économiquement.

La carte 3.8 a été construite à partir des signaux AIS émis entre le 15 juillet et le 15 août 2020. On ne récupère que les signaux susceptibles de représenter des navires de pêches en activité³. Cela permet d’avoir une idée de l’effort de pêche dans la zone.

La distribution en dehors de la ZEE est principalement guidée par les frontières. Les eaux internationales sont davantage pêchées. La zone fortement pêchée à l’est des Marquises correspond à une extrémité de la ”Tuna Belt”, région de forte productivité halieutique.

³Label AIS ”Fishing” ou ”Unspecified” et vitesse inférieure à 6 noeuds

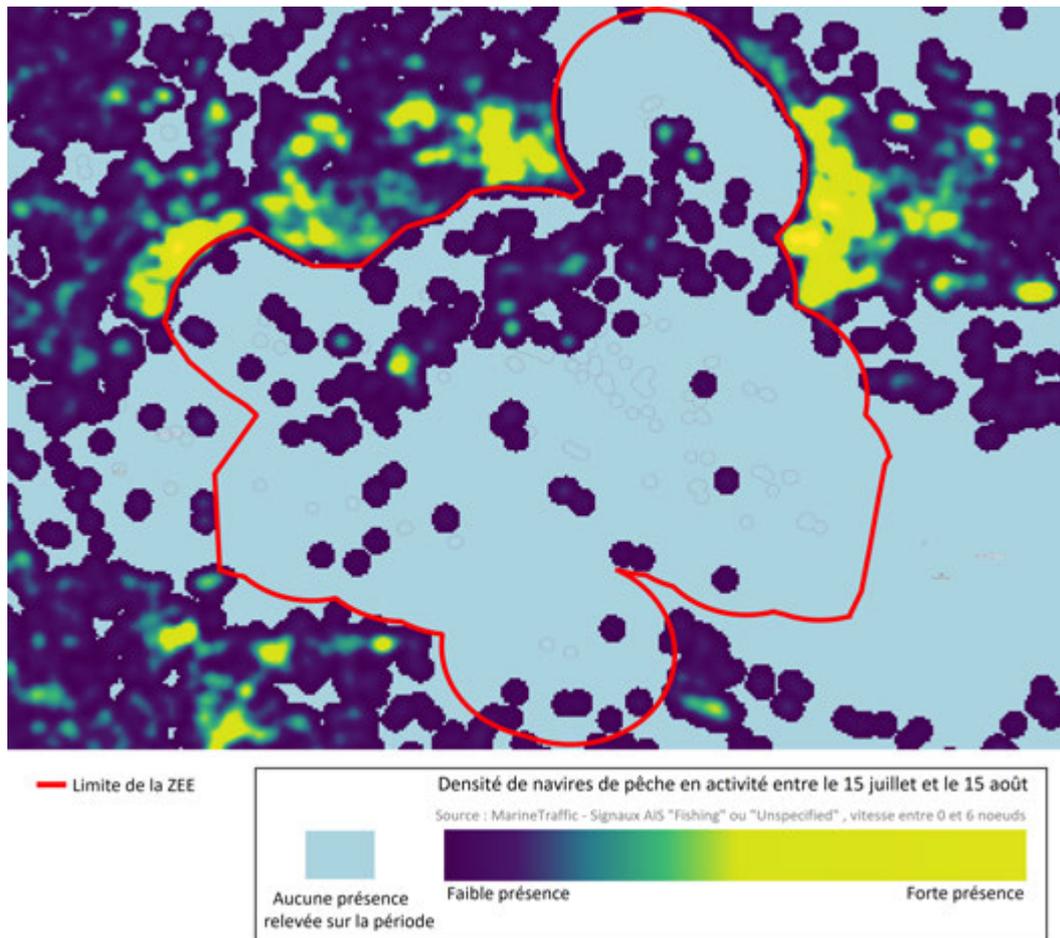


FIGURE 3.8: Distribution des navires de pêche en activité entre le 15 juillet et le 15 août 2020

3.2.2 Abondance

De nombreux travaux ([1], [12], [15], [21]) décrivent les monts sous-marins comme des **lieux de concentration des ressources pélagiques**, incluant le thon. Cependant, peu de données permettent de confirmer cette hypothèse. Les carnets de pêche disponibles dans les bases de données du secrétariat de la communauté du pacifique (SPC) montrent que les monts sous-marins n'ont **pas tous le même effet** sur la concentration des thons : certains auraient un effet positif, d'autres un effet négatif et les **différentes espèces** de thon ne seraient pas affectées de la même manière.

Par ailleurs, la collection des données de pêche expérimentale des campagnes ECOTAP [4] effectuées dans le ZEE de polynésie française entre 1995 et 1997 ne semble pas montrer de lien significatif entre le rendement de pêche (en kg de thon par hameçon jeté) et la proximité aux monts sous-marins. En récoltant les données de pêches relatives à 60368 hameçons jetés, on obtient les rendements de pêche suivants :

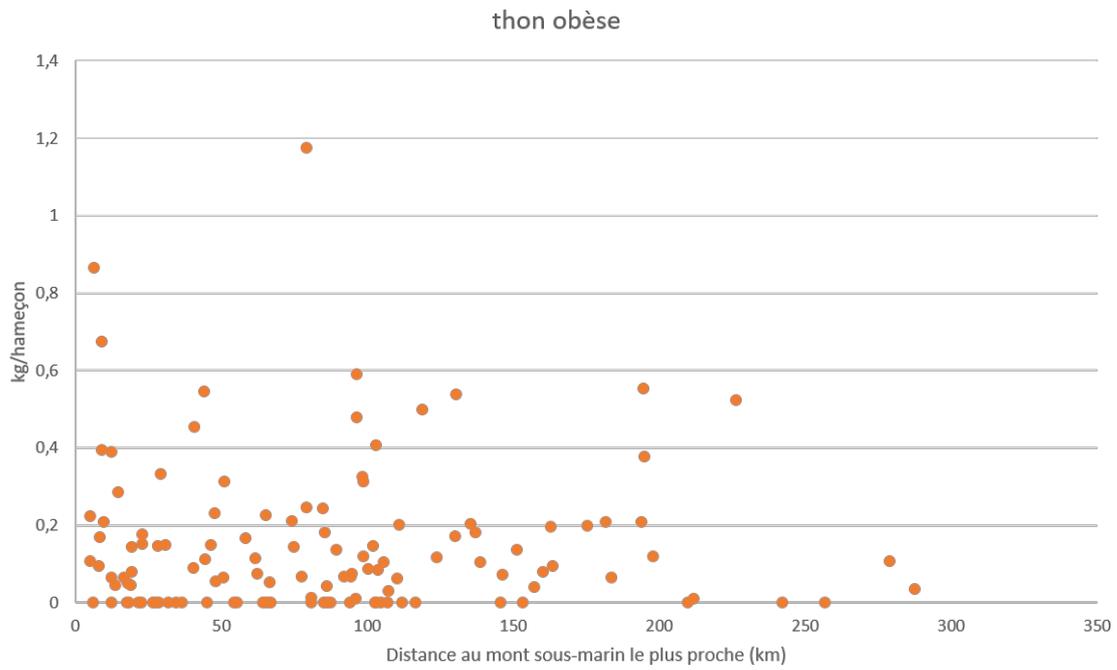


FIGURE 3.9: Rendement de pêche du thon obèse lors des campagnes ECOTAP

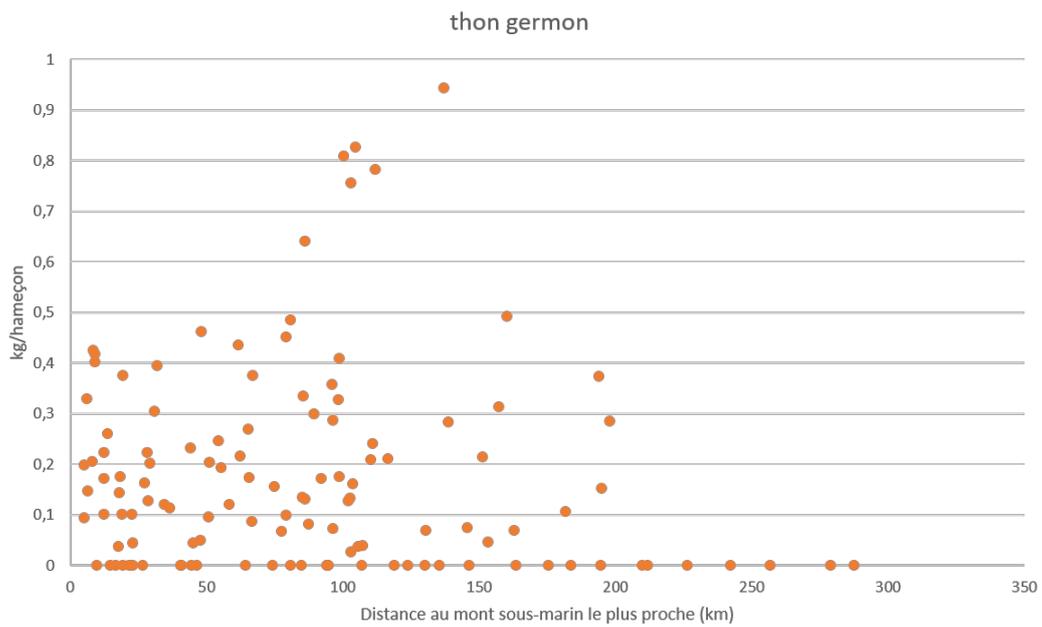


FIGURE 3.10: Rendement de pêche du thon germon lors des campagnes ECOTAP

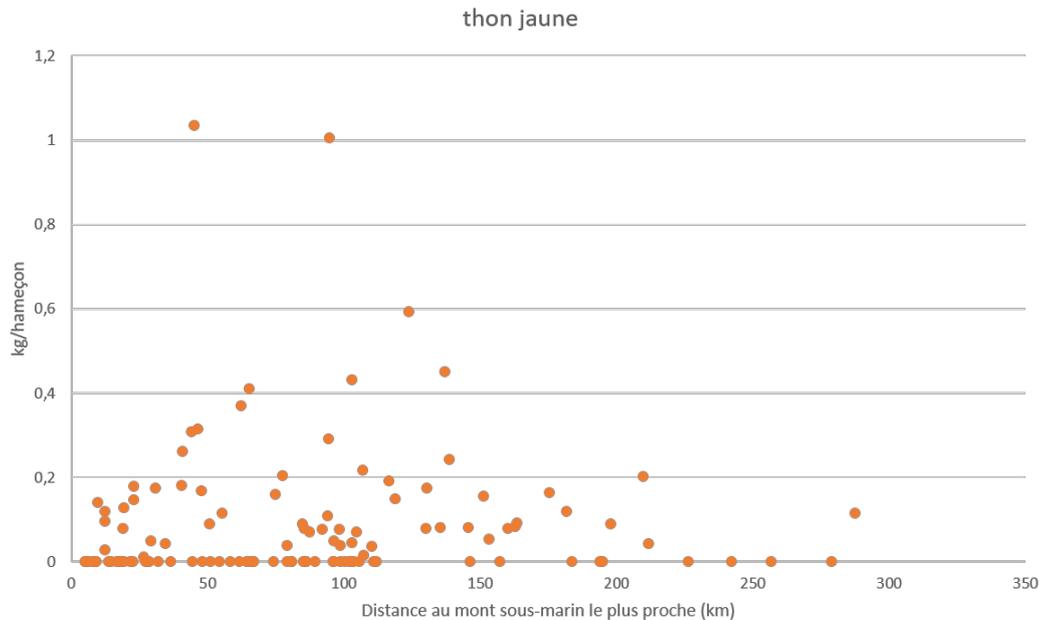


FIGURE 3.11: Rendement de pêche du thon jaune lors des campagnes ECOTAP

Ces données ne permettent pas de conclure directement sur l'influence des monts sous-marins sur les ressources en thon, car elles ne présentent pas de tendance nette et ne tiennent pas compte de facteurs pouvant avoir un impact beaucoup plus important (courants, température de l'eau, ...).

Cependant, les travaux de T.Morato [14] se fondant sur les carnets de pêche de la SPC montrent que **certains monts-sous-marins** ont un effet sur la concentration de **certaines espèces de thon**. La méthode utilisée est la suivante :

- Étant donné un certain nombre de **paramètres** (l'année, la latitude, la longitude, la phase lunaire, le type de pêche, l'effort de pêche), il fournit un premier modèle mathématique (modèle 1) qui donne une approximation des résultats de la pêche. L'écart entre les résultats réels et ceux du modèle est mesuré par le critère d'information d'Akaike.

Le critère d'information d'Akaike (AIC)

Il s'agit de la mesure de la qualité d'un modèle statistique proposée par Hirotugo Akaike en 1973, prenant en compte à la fois l'écart entre l'expérience et la théorie et le nombre de paramètres utilisés.

- Un deuxième modèle (modèle 2) est ensuite élaboré en prenant en compte tous les paramètres du modèle 1 mais également **la distance au mont sous-marin le plus proche**. On **compare** ensuite la qualité du modèle 1 (AIC_1) et du modèle 2 (AIC_2) en calculant **la différence** $\Delta AIC = AIC_2 - AIC_1$.

- Si $\Delta AIC < 0$, la prise en compte des monts sous-marins voisins améliore la qualité du modèle. Ceux-ci ont donc un **impact positif ou négatif sur la ressource halieutique**, en fonction du signe du coefficient associé à la distance au mont voisin retourné par le modèle 2.

- Sinon la distance au mont sous-marin le plus proche ne constitue pas un paramètre pertinent sur le mont sous-marin considéré.

Cette méthode permet de repérer certains monts sous-marins de Polynésie française ayant un effet d'**agrégation sur les thons**. Les espèces impliquées sont le **thon jaune**, le **thon germon** et le **thon obèse**. Sur la carte suivante, on représente par des triangles les monts sous-marins ayant un effet d'agrégation sur les thons. La taille du triangle varie en fonction de l'intensité du phénomène d'agrégation, que l'on mesure avec l'indice ΔAIC .

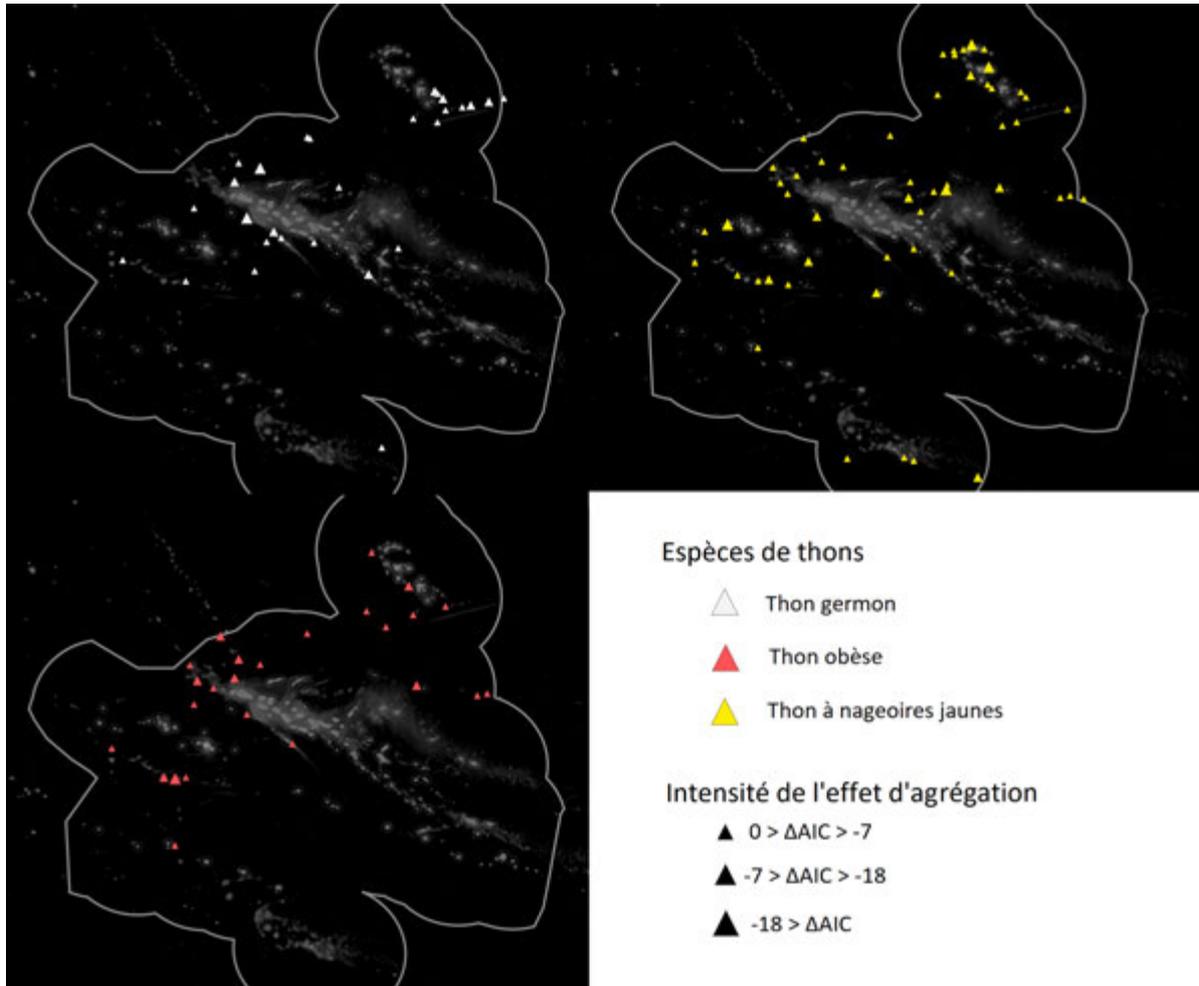


FIGURE 3.12: Monts sous-marins ayant un impact sur les ressources en thon. Source : T. Morato [14]

L'indice ΔAIC constitue un indicateur de l'intensité de l'effet de concentration. En effet, il est d'autant plus élevé que la correction due à la prise en compte de la distance aux monts sous-marins dans l'estimation du rendement de la pêche est importante.

Comme mentionné dans la partie précédente, certains monts sous-marins ont un impact sur la concentration en chlorophylle (SICE) [11]. En analysant l'historique des données de pêche de 1950 à 2015, Astrid B. Leitner a observé un plus grand rendement autour des monts sous-marins présentant un SICE.

On compte 79 monts sous-marins ayant un effet sur la concentration en thon, ce qui représente **16 % des 509 monts sous-marins de Polynésie française**. Selon Morato

[14], la zone d'influence d'un mont sous-marin sur la concentration des thons serait comprise dans un **rayon de 20 à 40km**. Il est à noter que les données de pêche utilisées dans l'étude sont essentiellement concentrées dans la zone de pêche principale, qui s'étend de l'archipel de la Société aux Marquises. En particulier, les archipels des Australes et des Gambier présentent probablement des monts similaires non détectés à cause d'un volume insuffisant de données.

L'effet DCP : Les monts sous-marins, à l'instar des DCP ⁴, brisent l'immense uniformité de l'océan et ce seul attribut pourrait suffire à agréger la vie marine autour. En effet, DCP et monts sous-marins pourraient jouer le même rôle fondamental de "meeting point" [5], c'est à dire un lieu de rencontre qui permet notamment aux espèces pélagiques de former des bancs de taille plus importante. Il est plus efficace pour les thons notamment de s'attendre sur des lieux particuliers plutôt que de chercher aléatoirement dans la mer un autre banc avec lequel fusionner.

Si les monts sous-marins ont une influence sur les densités de poissons, alors cela devrait se retrouver dans le positionnement et les habitudes des bateaux de pêches. Des entretiens réalisés avec des capitaines de thoniers dans le port de Papeete permettent de répondre en partie à la question : les hauts-fonds jouent un rôle important dans le choix des zones de pêches. On retrouve également 3 autres paramètres majeurs selon les pêcheurs : la température de surface de l'eau ⁵, les courants et la densité de chlorophylle.

Les monts sous-marins sont également à prendre en compte pour une raison technique simple : les lignes de palangre peuvent descendre usuellement jusqu'à 500m de profondeur, ce qui peut poser un risque de collision avec un haut-fond ⁶. Le coût économique associé à la perte d'une ligne de palangre incite ainsi les pêcheurs à prendre leur distance avec les monts sous-marins les moins profonds.

Il est cependant difficile d'inférer directement l'effet des monts sous-marins sur les ressources halieutiques à partir de la position des bateaux de pêche. Le couplage avec les températures de surface, les courants et les réglementations en vigueur nécessite de réaliser des moyennes sur des périodes longues de l'ordre de plusieurs années afin de pouvoir s'affranchir des effets saisonniers.

L'extérieur de la ZEE étant bien plus pêché, la collecte des données sur un mois permet déjà d'observer certaines tendances dont une que nous ne parvenons pas à expliquer. Au nord-ouest de la ZEE, on observe un arc avec une forte présence de bateaux de pêche, qui s'interrompt au niveau d'une chaîne de monts sous-marins.

⁴Les DCP (Dispositif de Concentration de Poissons) désignent des objets flottants quelconques, très utilisés par les pêcheurs car attirant naturellement les poissons

⁵Les s préfèrent les zones de fort gradient de température

⁶47 monts sous-marins culminent à moins de 500m de profondeur en Polynésie française

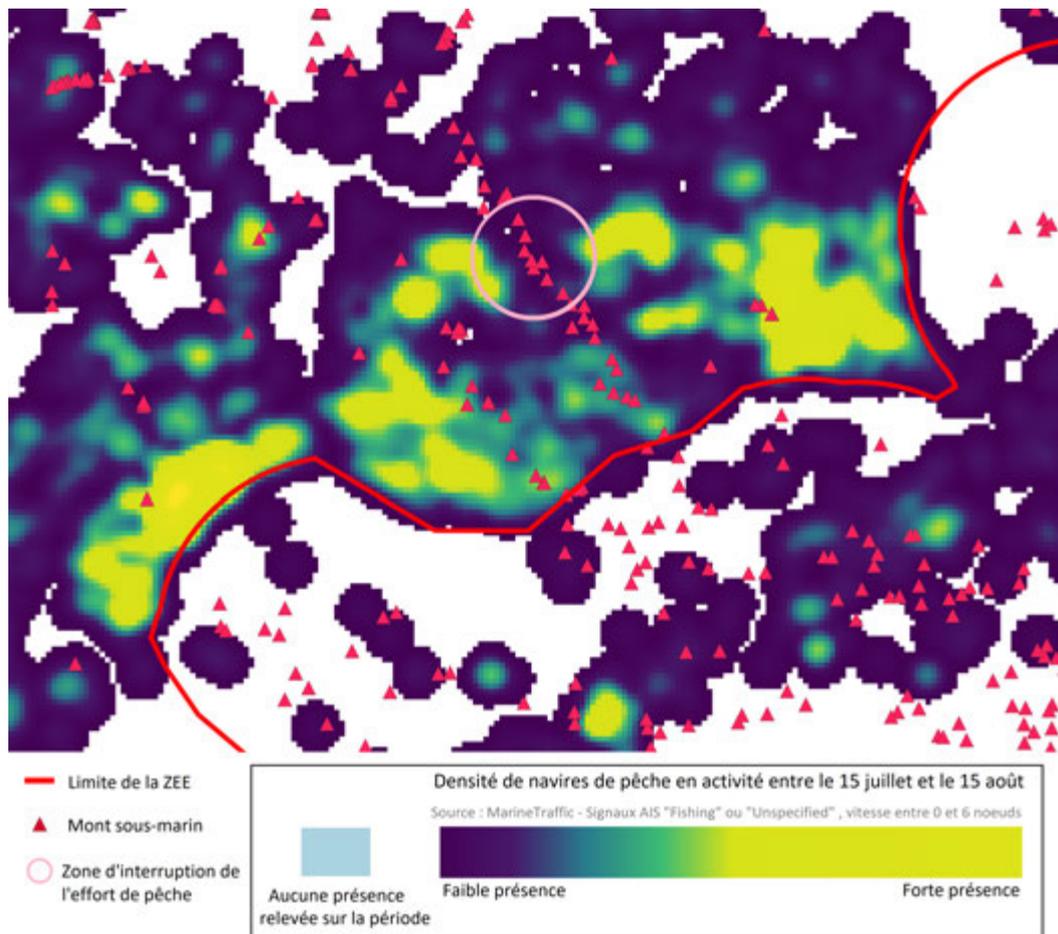


FIGURE 3.13: Un couplage négatif entre effort de pêche et monts sous-marins ?

L'ensemble des monts sous-marins de la chaîne ont des profondeurs supérieures à 1100m selon nos données de bathymétrie ce qui semble exclure l'hypothèse d'un évitement causé par le risque de collision avec une ligne de palangre.

Les monts sous-marins permettent également une pêche (de plaisance le plus souvent) de poissons profonds dits "paru" qui sont réputés pour leur qualité. [17] Ceux-ci possèdent une faible croissance et une longue durée de vie ce qui a pu soulever des inquiétudes quant à leur surexploitation. Cependant l'étude ZEPOLYF3 datant de 2004 [17] concluait que les stocks de Polynésie sont encore en bonne santé et que leur faible rendement, leur fragilité et le manque de connaissance des stocks disponibles les rendent peu adéquats pour une exploitation industrielle.

Les outils de gestion les plus adaptés pour encadrer le développement de cette pêcherie serait le contrôle de l'octroi de licence dans les îles où le stock est menacé et éventuellement la mise en place de zones protégées [17]. Celles-ci pourraient être couplées avec un suivi des stocks afin d'inférer les temps et les distances caractéristiques de résilience des différentes populations qui dépendent de paramètres difficiles à mesurer directement (dispersion larvaire, sédentarité, croissance...).

3.3 Les écosystèmes des monts sous-marins

3.3.1 Hétérogénéité spatiale, conditions environnementales et composition des communautés

Chaque mont sous-marin se place dans un **contexte géologique, hydrodynamique et topographique** distinct. La latitude, le type de substrat, le taux de sédimentation, les courants marins, la forme du mont et surtout la profondeur du sommet jouent un rôle déterminant sur les caractéristiques des communautés présentes sur le mont. Certains monts peuvent également présenter une **activité volcanique ou hydrothermale**, comme Teahitia, Rocard, Moua Pihaa et Macdonald qui abritent potentiellement des sources hydrothermales [17] et des organismes singuliers tels que bactéries thermophiles ⁷ autotrophes. Il existe donc une grande **hétérogénéité** entre les différents sous-marins et leurs communautés, **entre différentes chaînes comme au sein d'un même chaîne**. [13]

Une étude de Richer de Forges (2000) sur des campagnes du MUSORSTOM (MNHN, IRD) menées dans le Pacifique du sud-est a ainsi montré une distribution spécifique de la faune benthique très localisée. On obtient par le calcul de l'indice de Sørensen 0,21 en médiane pour deux monts de la même chaîne, contre 0,04 pour deux monts sur deux chaînes différentes du nord de la mer de Tasman et du sud-est de la mer de Corail. Les communautés benthiques diffèrent ici à la fois sur des monts sous-marins à même latitude distants de plusieurs centaines de kilomètres et sur des monts sous-marins au sud ou au nord de la même mer. [2]

L'indice de Sørensen

L'indice de Sørensen est un indicateur statistique permettant de caractériser la **proximité entre deux échantillons**. Il est défini comme le rapport de 2 fois le nombre d'éléments communs aux deux échantillons, sur la somme totale des éléments :

$$s = \frac{2 \times \text{nombre d'espèces en commun}}{\text{nombre d'espèces dans l'échantillon 1} + \text{nombre d'espèces dans l'échantillon 2}} \quad (3.1)$$

Cependant O'Hara (2008) a relevé des similarités entre les compositions des Ophiuroidea (Echinodermes) des monts sous-marins et pentes de îles du Pacifique du sud-ouest. Rowden (2010) a également observé sur les Galathées (Crustacés) des assemblages spécifiques comparables entre les monts sous-marins, les pentes des îles et le plateau continental. Enfin Howell et al. (2010) obtiennent des **compositions de faune benthique proches dans des contextes géologiques identiques** (substrat, profondeur, topographie...). Si les espèces présentes sur les monts sont donc souvent celles de la région géographique dans laquelle ils s'inscrivent, il existe toutefois des **variations sur l'abondance de chaque espèce**. [18]

Des **disparités spatiales** sont aussi observées **sur un même mont**, à l'échelle de la dizaine de mètres. Par exemple, les coraux se retrouvent dans les zones de courants forts à même le substrat, tandis que les holothuries s'installent sur des zones plus calmes où le taux de sédimentation est plus élevé. Il existe également une **stratification verticale**

⁷Vivant à des températures supérieures à 40 C.

des communautés benthiques, les paramètres physico-chimiques de l'eau étant fortement dépendants de la profondeur (lumière, dioxygène, température...). [13]

Quelques caractéristiques générales des écosystèmes marins s'appliquent également aux écosystèmes des monts sous-marins :

1. La **zone de minimum d'oxygène** présente une faible richesse spécifique.
2. Les zones de faible production primaire présentent peu de coraux symbiotiques.

3.3.2 Biodiversité des monts sous-marins : richesse spécifique

La richesse spécifique

La richesse spécifique est une mesure de la biodiversité d'un écosystème. Elle correspond au **nombre d'espèces** présente dans le milieu.

Selon *Seamounts : Ecology, Fisheries Conservation* [21] les premiers articles ayant étudié la biodiversité des monts sous-marins dans le monde remontent à 1967 (MacArthur and Wilson). Ils conjecturent que la richesse spécifique de la faune pélagique des monts sous-marins devrait être moindre par rapport aux eaux profondes et aux zones de marges continentales du fait de leur **isolation**. Les espèces présentes proviendraient des marges continentales et leur diversité serait décroissante en fonction de l'éloignement du mont. Ce point de vue est conforté par (May, 1975, Rosenzweig, 1995), qui établit une relation empirique entre la taille de l'habitat et le nombre d'espèces trouvées.

Cependant d'autres ont avancé l'hypothèse que les monts sous-marins constitueraient des **environnements plus stables** que les marges continentales et auraient accumulé plus d'espèces au fil du temps. (Vörös, 2005). Les résultats d'études comparant la richesse spécifique des monts sous-marins aux autres milieux comme les marges continentales et les eaux profondes sont **partagés** et ne tiennent, pour la plupart, pas compte de l'**inégalité des efforts d'échantillonnage**.

Plus récemment, T. Morato (2010) [20] met en évidence une tendance générale montrant une **augmentation de la richesse spécifique des prédateurs pélagiques** à proximité des monts sous-marins. Ces formations constitueraient en effet des lieux de reproduction et nutrition privilégiés pour les migrateurs pélagiques, en plus de points de repères migratoires. L'estimateur \hat{S}_{40} utilisé permet de mesurer la biodiversité en se basant sur une analyse statistique des données de pêche du secrétariat de la communauté du pacifique (SPC). Les résultats suivants sont obtenus :

L'estimateur \hat{S}_{40}

Afin de mesurer la biodiversité d'un milieu, on compte le nombre d'espèces présentes dans un échantillon pêché. Cependant, le résultat obtenu dépend fortement de la taille de l'échantillon. Pour résoudre ce problème on utilise une **méthode de raréfaction** qui donne un estimateur du nombre moyen d'espèces pêchées avec 1000 hameçons : \hat{S}_{40} .

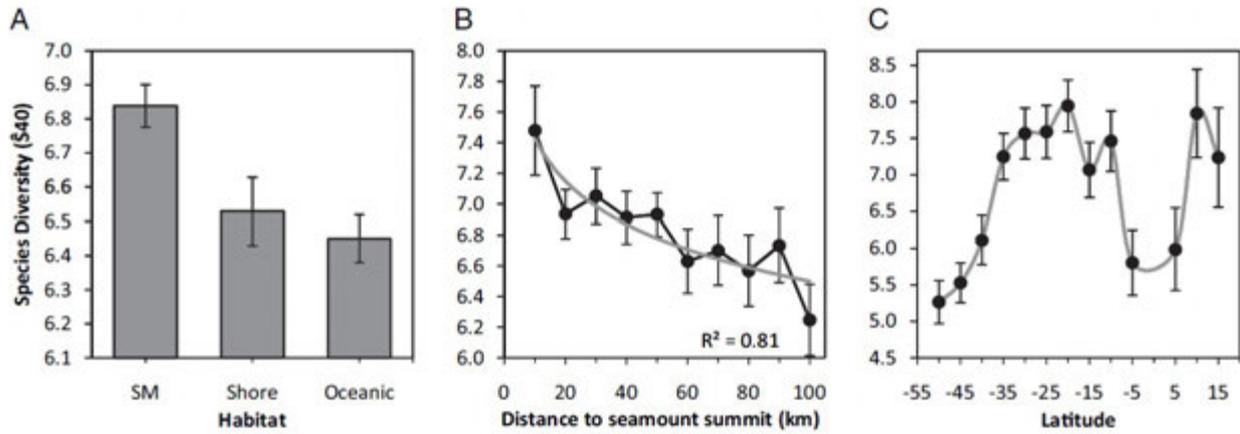


FIGURE 3.14: Estimation de la richesse spécifique par l'estimateur \hat{S}_{40} . Source : [20])

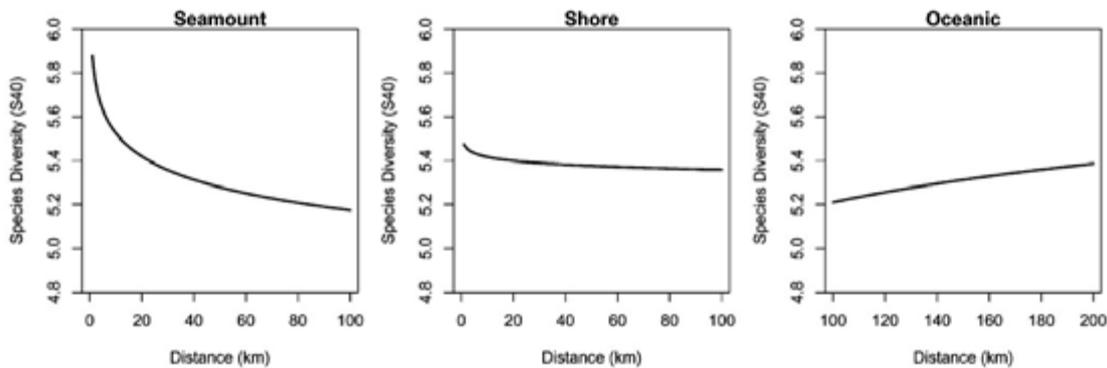


FIGURE 3.15: Estimation de la richesse spécifique par l'estimateur \hat{S}_{40} en fonction de la distance aux monts sous-marins, aux côtes et de l'éloignement en mer. Source : [20])

Concernant la **faune benthique**, la plupart des études montrent que la richesse spécifique est **similaire aux autres habitats marins**. O'Hara (2007) a notamment trouvé que la richesse spécifique des monts sous-marins abritant des coraux bâtisseurs de récifs était comparable à celle des pentes des îles dépourvues de coraux, contrairement à ce que l'on pourrait penser. Les habitats coralliens sont en effet souvent considérés comme riches en biodiversité, suite à plusieurs études sur le sujet (Henry Roberts 2007). Il est donc encore trop tôt pour conclure en faveur d'une forte richesse spécifique, bien que l'hypothèse reste plausible. [18]

3.3.3 Mont sous-marin et effet d'île : connectivité et endémisme

Les monts sous-marins ont souvent été considérés comme des **îles sous-marines**, propices au développement de communautés uniques par leur isolation géographique (Hubbs, 1959). Cette hypothèse a ensuite été renforcée par la découverte de courants de circulation fermée et de colonnes de Taylor (cf. partie 3.1) au niveau des monts sous-marins (Roden, 1987). Ces mouvements d'eau favoriseraient la réclusion des larves, limitant les échanges de populations entre les monts (Dower Perry, 2001). Cet effet d'île pourrait alors être responsable d'un fort taux d'**endémisme**. [18]

L'étude de Richer de Forges [2] trouve de nombreuses espèces benthiques endémiques potentielles sur les monts sous-marins du sud-ouest du Pacifique. Sur les 850 espèces observées, le taux maximal d'endémisme serait de 29 à 34% en fonction des régions. L'article de Stocks Hart (2007), le plus exhaustif sur le sujet estime plutôt le **taux d'endémisme à 20%**. Des valeurs beaucoup plus faibles (0 à 5 %) ont cependant été relevées pour les invertébrés benthiques (Hall-Spencer, 2007 et O'Hara, 2007).

Ces données ont été consolidées par les recherches sur la **connectivité entre les populations** des monts sous-marins. Celle-ci dépend de multiples facteurs dont le contexte hydrodynamique, le temps de développement et de survie des larves ou la présence d'un milieu de vie favorable à leur installation.

Les études génétiques sur les poissons commerciaux **à l'échelle océanique** témoignent d'une **proximité génétique** entre les populations des monts, des pentes des îles ou des plateaux continentaux (Sedberry et al. 1996, Hoarau Borsa 2000). **A l'échelle régionale**, des **différenciations génétiques** ont été observées sur des populations habitant ou non sur des monts sous-marins, notamment pour la Légine australe (*Dissostichus eleginoides*) (Rogers et al. 2006). L'**effet de la distance** sur la proximité génétique entre les populations de homard *Jasus tristani* a également été mis en évidence par von der Heyden et al. (2007) au niveau du mont Vema, de l'archipel Tristan da Cunha et de l'île Gough. [13]

Des proximités génétiques significatives se retrouvent également chez les invertébrés non commerciaux, comme montré par Samadi et al. (2006) sur des populations de Galathées (homards) en Nouvelle-Calédonie. Les échanges génétiques seraient favorisés par la dispersion des larves par le courant.[13]

S'il est difficile de conclure sur les similitudes génétiques entre populations, qui peuvent être dues à l'histoire du peuplement plutôt qu'à des échanges génétiques récents, **la connectivité** entre les populations des monts sous-marins est **plus faible** qu'entre populations en eau profonde. Certaines populations semblent plus isolées que d'autres, en fonction de la **distance du mont au continent** ou à d'autres monts sous-marins. [13]

La découverte d'**espèces panchroniques** ou "fossiles vivants" (Crinoïdes, Brachiopodes, Holothuries) par Lévi (1991) et Kelly (2000) a contribué à l'image de **refuge biologique** associée aux monts sous-marins. [21] Une étude de Tittensor (2010) a notamment observé que les coraux des monts sous-marins étaient moins impactés par l'acidification des océans que sur d'autres habitats.[18]

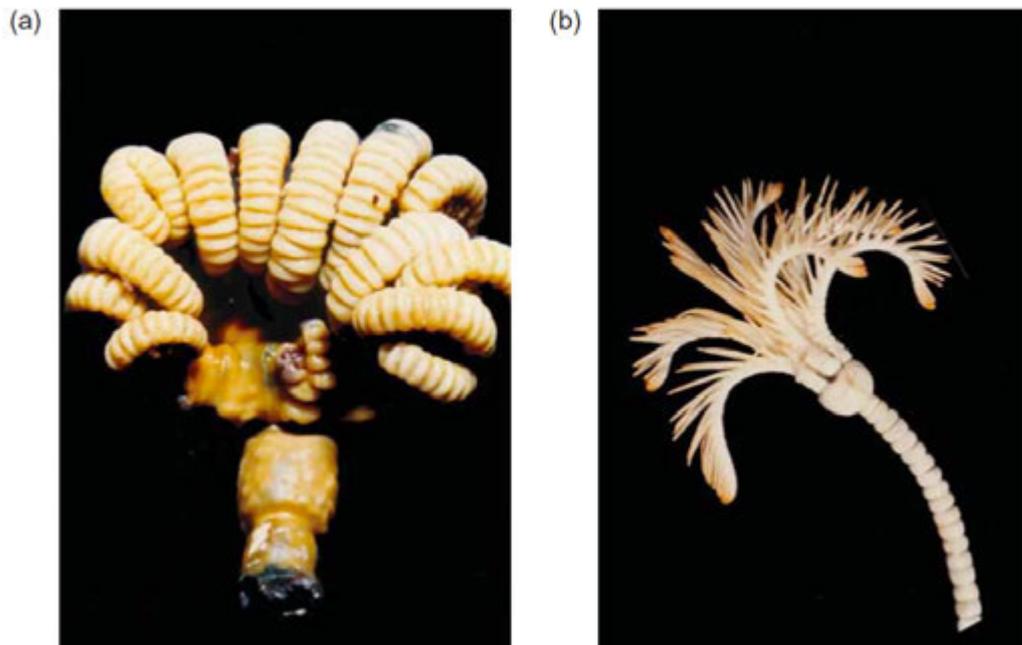


FIGURE 3.16: Espèces panchroniques observées sur le mont Antigonina au sud de la Nouvelle-Calédonie, à 300m de profondeur : (a) *Gymnocrinus richeri*, (b) *Caledonicrinus vaubani*
Source : [21]

Les monts sous-marins ne sont donc pas nécessairement isolés mais fonctionnent plutôt en "stepping stones". La dispersion des populations pouvant s'effectuer entre monts ou entre monts et continents, notamment par les larves. Certains peuvent être vus comme des refuges, aux conditions environnementales plus stables et moins sensibles aux perturbations climatiques, s'ils sont suffisamment éloignés du continent.

3.3.4 Architecture trophique

Les monts sous-marins ne présentent pas tous les mêmes **propriétés géophysiques** (hydrodynamisme, substrat, activité hydrothermale...) et le fonctionnement des écosystèmes associés est nécessairement différent. Nous nous attacherons ici à décrire les mécanismes biologiques à l'origine de l'agrégation de certains poissons, et la **chaîne trophique** associée. Comme peu de données propres aux monts sous-marins de Polynésie française sont disponibles, les familles d'espèces citées ici sont celles observées dans le sud-est du Pacifique.

L'apport de matière organique à la base de la chaîne trophique est majoritairement due à l'**advection du zooplancton** par les courants marins (partie 3.1.2). En effet, Tseytlin (1985) a montré par une étude énergétique que la production primaire du phytoplancton (partie 3.1.1) ne suffirait pas à nourrir l'ensemble de la chaîne trophique. [18]

Cette matière organique est alors absorbée par les **suspensivores** qui dominent la faune benthique, tels que Holothuries, Crinoïdes ou Coraux durs (Scleractinia, Antipatharia, Zoanthidea, Octocorallia, Stylasteridae), dont l'installation est favorisée par un substrat dur et des courants forts. Ces organismes sont caractérisés par une **croissance très lente** et une **grande longévité**. [21]

Comme peu de monts sous-marins atteignent la zone euphotique, les espèces de coraux qui s'y trouvent ne forment **pas de symbiose avec la zooxanthelle**, algue photosynthétique. Parmi eux, seuls quelques espèces d'eau profonde (Scleractinia) sont capables de former des récifs coralliens et ont été observées sur des monts sous-marins, en Nouvelle-Zélande et Australie. Les autres forment des jardins de coraux ou des colonies pouvant vivre plusieurs centaines de milliers d'années. [21]

Ces habitats favorisent l'installation d'espèces benthiques mobiles se nourrissant de zooplancton, **Mollusques, Crustacés** (Anomura, Caridea, Palinura, Brachyura, Astacidea) [2]) ou **Echinodermes**. Des espèces de **poissons mésopélagiques, benthopélagiques ou démersaux** (Beryx, Sebastes, Moridae) se rassemblent également autour des monts sous-marins, pour se nourrir de zooplancton, de Mollusques et Crustacés ou pour se reproduire. Il est aujourd'hui ardu de distinguer les espèces résidant spécifiquement sur les monts sous-marins de celles qui s'y rendent occasionnellement. [21]

Les **prédateurs pélagiques** tels que les thons, bonites, espadons ou requins seraient ensuite attirés par la biomasse présente, les lieux de reproduction potentiels que représentent les monts sous-marins ou par l' "effet DCP" comme expliqué dans la partie 3.2.2. Dans l'est du Pacifique, les relevés du nombre de requins pêchés pour 100 hameçons lancés (catch per unit effort), entre 1978 et 1987, ont mis en évidence le rassemblement de requins bleus mâles (*Prionace glauca*) sur la ride Nazca et autour de monts dans les Galapagos. Des requins-renards (*Alopias superciliosus*) ont également été observés en quantité supérieure au niveau de monts sous-marins. [21]

La répartition des cétacés dans l'océan étant corrélée avec les reliefs sous-marins abrupts, il est possible que ceux-ci se retrouvent également au niveau des monts sous-marins. Quelques recherches dans le Pacifique nord témoignent d'une **plus forte concentration de mammifères marins** (Dauphin commun, Globicéphale du Pacifique, Marsouin de Dall) au niveau de rides et de hauts-fonds (Hui, 1985, Griffin, 1997, Tynan et al., 2005). Cependant il n'existe pas à ce jour d'étude spécifique aux monts sous-marins sur la question. [21]

Enfin des **oiseaux marins** ont été observés au-dessus des monts sous-marins. Reid et al. (2002) a notamment utilisé les données d'observation des oiseaux de mer depuis les navires au sud-est de l'Australie entre 1975 et 1993 pour établir la répartition de différentes espèces. 4 espèces d'albatros et 1 espèce de pétrel se retrouvaient en plus grand nombre au-dessus des monts. [21]

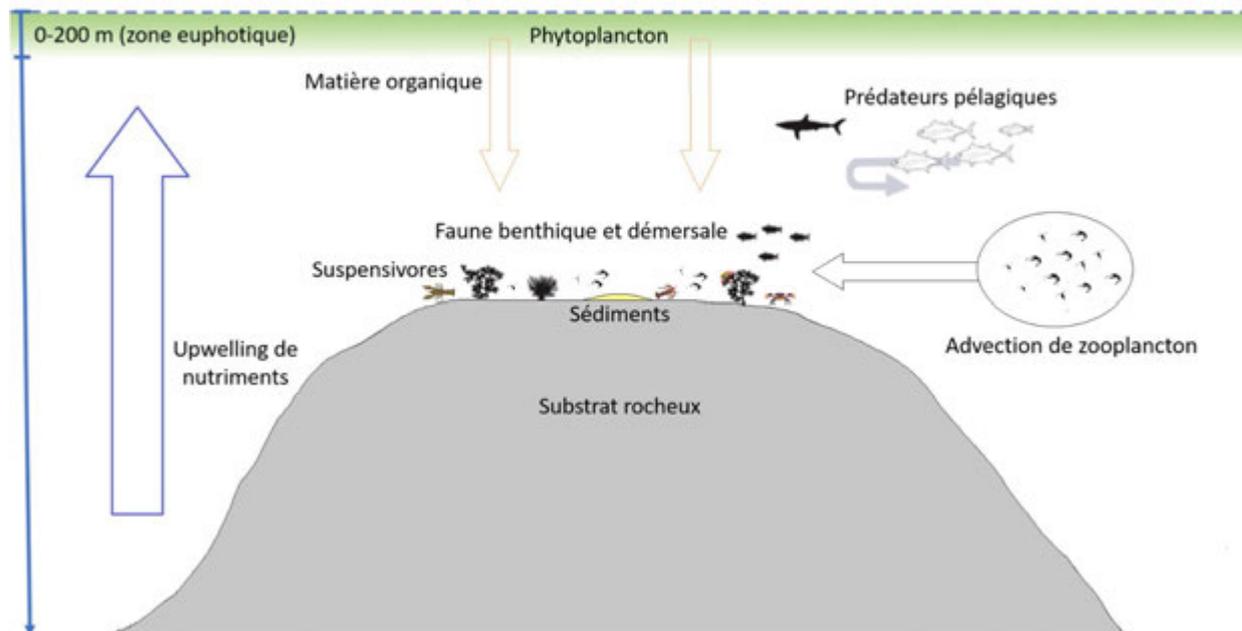


FIGURE 3.17: Écosystème associé à un mont sous-marin riche en matière organique

L'écologie des monts sous-marins est donc caractérisée par une **grande variabilité** entre les différents monts en fonction des conditions environnementales. La **composition biologique** de la plupart des monts reflète celle **de la région océanique** dans laquelle ils s'inscrivent, mais certains monts abritent des communautés biologiques particulièrement riches avec un taux d'endémisme élevé. Lorsque les monts agrègent une grande quantité de matière organique, des **chaînes trophiques longues et complexes** se mettent en place, favorisant les rassemblements de bancs de poissons pélagiques. Les monts sous-marins fonctionneraient donc comme des **"stepping stones"** pour la dispersion des populations et les espèces migratrices. Il est à noter que de nombreuses recherches sur les écosystèmes des monts sous-marins sont à mener avant de pouvoir comprendre pleinement la complexité de ces écosystèmes, notamment en Polynésie française où les **données restent encore très parcellaires**.

4. Les ressources minières des monts sous-marins

4.1 Les différentes formations minérales sous-marines

Les fonds sous-marins sont le lieu de quatre formations minérales majeures [16] : les nodules polymétalliques, les encroûtements cobaltifères, les sulfures hydrothermaux et les boues enrichies en terres rares.

Les **nodules** et les **encroûtements** sont des couches respectivement concentriques ou planes de plusieurs centimètres (5 à 10 cm en moyenne) formées par la précipitation d'oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse. Ils sont particulièrement riches en métaux comme le cobalt, le nickel ou le cuivre, ainsi qu'en terres rares. Cependant, les nodules sont observés au niveau des **plaines abyssales** tandis que les encroûtements se retrouvent sur les **édifices volcaniques**. [16]

Le cobalt

Le cobalt Co est un métal de transition plus dur et plus cassant que le fer mais assez malléable pour être forgé. Il est utilisé en métallurgie (alliages durs, superalliages), en électromagnétique (accumulateurs lithium-ion, aimants), en chimie (catalyseurs de l'industrie pétrolière) ou encore en agronomie (additif alimentaire des ruminants pour la production de vitamine B₁₂).

Les terres rares

Les terres rares désignent un ensemble de métaux ductiles aux propriétés chimiques similaires, composé du Scandium Sc, de l'Yttrium Y et des lanthanides. Ils sont utilisés dans de multiples domaines : l'électromagnétique (lasers, aimants, supraconducteurs), la chimie (batteries, agents oxydants, colorants des verres) la mécanique (alliages légers, bougies d'allumage) ou encore la médecine (radiothérapie, traitement du cancer).

Les **sulfures hydrothermaux** sont des gisements de sulfures de fer et autres métaux tels que le cuivre, le zinc ou le plomb. Ils se forment dans des zones à forte activité hydrothermale telles que les dorsales océaniques ou les bassins arrière-arc ¹. [8]

¹Espace océanique formé par l'étirement de la croûte terrestre en arrière d'un arc volcanique au niveau d'une zone de subduction



FIGURE 4.1: De gauche à droite : nodule polymétallique, encroûtement cobaltifère, sulfure hydrothermal. Source : Ifremer

4.2 Les ressources minières observées sur les monts sous-marins de Polynésie française

En Polynésie française, plusieurs champs de nodules polymétalliques ont été observés sur le plancher océanique au nord-ouest de la ZEE, mais jamais sur des monts sous-marins. Concernant les sulfures hydrothermaux, la ZEE ne présente pas de formation géologique favorable à leur formation, leur présence paraît donc peu probable. La formation minérale majoritaire sur les monts sous-marins semble donc être les **encroûtements cobaltifères**. La campagne de recherche TARASOC (2009), menée dans le cadre du programme Tropical Deep-Sea Benthos (TDSB) et le programme ZEPOLYF (1996-1999) en ont notamment identifiés sur les monts sous-marins de la **chaîne Tarava et de l'archipel des Tuamotu**. L'archipel des Australes en serait également pourvue. [16]

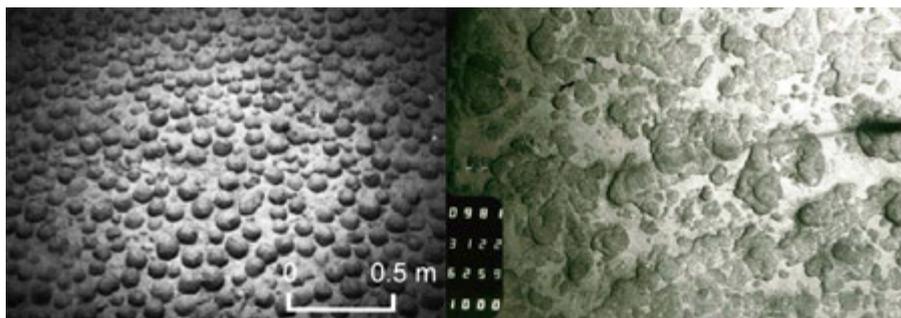


FIGURE 4.2: Nodules polymétalliques sur la plaine abyssale au large de la Nouvelle-Zélande à gauche et encroûtement cobaltifère sur le plateau des Tuamotu à droite. Source : Niwa et Ifremer [6]

La formation des encroûtements nécessite un **apport de métaux dissous** dans l'eau et un **faible taux de sédimentation**. Au niveau des monts sous-marins, ces conditions sont remplies grâce aux courants ascendants ou **upwellings**. La précipitation des métaux, de quelques millimètres par millions d'années, est facilitée par une faible teneur en dioxygène dissous. Les encroûtements les plus épais se retrouvent donc sur les monts sous-marins les plus âgés, dans la **zone de minimum d'oxygène**. Celle-ci est présente dans la plupart

des océans à des profondeurs de 400 à 1000m où un flux de matière organique descendant favorise une forte consommation en dioxygène des organismes. [8]

Dans la ZEE française, les formations les plus riches en cobalt seraient situées entre **800 et 2500m de profondeur**. Sur certains échantillons, des teneurs supérieures à 20% pour le manganèse et à 1% pour le cobalt ont été relevées, ce qui représente une concentration 10 fois plus élevée que dans les minerais terrestres de sulfures cobaltifères [16]. Si des encroûtements à forte valeur économique ont été identifiés sur certains monts ou sur le plateau volcanique des Tuamotu, aucune estimation de la quantité totale de cobalt n'est aujourd'hui disponible. L'exploitation de la ressource nécessiterait également de localiser les zones suffisamment planes et accessibles pour des installations minières. [8]

	Mn (%)	Fe (%)	Co (%)	Ni (%)	Cu (%)
Nodule (Clarion-Clipperton)	29	6	0.25	1.4	1.2
Encroûtement (Tuamotu)	28	15	1.1	0.6	0.1

FIGURE 4.3: Teneurs en métaux majoritaires d'un nodule de la zone de Clarion-Clipperton et d'un encroûtement des Tuamotu. Source : Ifremer [6].

4.3 Les écosystèmes associés aux encroûtements cobaltifères

Lors des trois campagnes MUSORSTOM9 (1998), BENTHAUS (2002) et TARASOC (2009) du programme TDSB d'exploration des fonds marins de Polynésie française, de nombreux échantillons biologiques ont été récoltés. Les sommets de **13 monts sous-marins** et les flancs de **25 îles** ont été explorés pour un total de 539 stations de prélèvement, à des profondeurs allant **jusqu'à 1800 m**. Diverses techniques ont été utilisées pour l'échantillonnage comme le dragage, le chalutage ou la pose de pièges. Ces données ont été croisées avec celles du programme ZEPOLYF de cartographie des monts sous-marins de Polynésie française afin de caractériser les **effets de la présence d'encroûtements cobaltifères sur les communautés biologiques**. [7]

Les principaux taxons échantillonnés sont **les Crustacés, les Mollusques, les Brachiopodes et les Échinodermes**. Deux ensembles de données à des échelles géographiques et biologiques distinctes ont été analysés : un premier contenant les échantillons des trois campagnes sur les quatre taxons et un deuxième sur les Mollusques de la campagne TARASOC. Sur ces deux ensembles de données, des analyses PERMANOVA et de redondance (db-RDA) ont été effectuées pour déterminer si la présence d'encroûtements explique les différences observées entre les assemblages d'espèces de chaque site. Enfin la taille de la coquille des mollusques a été comparée en fonction de la présence ou non d'encroûtements. [7]

Les résultats des deux premiers tests montrent que la présence d'encroûtements cobaltifères est associée à des **différences significatives de composition spécifique**. Certaines espèces sont donc plus particulièrement associées aux encroûtements cobaltifères et d'autres à leur absence. Par ailleurs, le nombre de coquille de Mollusques inférieure à 5mm

était plus important au niveau des encroûtements. [7]

Il est à noter que cette étude ne représente qu'un faible nombre de taxons. En effet, malgré la diversité des organismes benthiques collectés pendant ces campagnes, de nombreux échantillons n'ont pas pu être identifiés avec certitude. Par ailleurs, certains habitats observés sur d'autres encroûtements cobaltifères du Pacifique central n'ont pas été retrouvés lors de ces campagnes, comme des agrégations de coraux, crinoïdes ou éponges. [7]

Dans le Pacifique central, les véhicules submersibles du programme Hawaii Undersea Research Laboratory (HURL) ont également récolté de nombreuses données sur la faune des monts sous-marins, entre 1983 et 2007. Au niveau de l'archipel hawaïen se distingue une zone à fort potentiel en encroûtements cobaltifères. Les données biologiques ont été catégorisées selon leur position par rapport à cette zone (dedans ou dehors). Une analyse PERMANOVA a ensuite été effectuée pour déterminer si les différences de composition et d'abondance des espèces entre les stations visitées étaient corrélées avec leur position relative à cette zone. [19]

Les résultats de l'analyse indiquent que les communautés benthiques sont bien distinctes à l'intérieur et à l'extérieur de la zone à fort potentiel en encroûtements. Les variations entre les communautés biologiques sont principalement dues à une abondance relative de chaque taxon différente entre l'intérieur de la zone et l'extérieur. En effet, **61% des 252 taxons présents de chaque côté sont plus abondants en dehors de la zone à encroûtements**. Ces différences concernent une grande variété de taxons tels que les Coraux, les Echinodermes, les Eponges, les Crustacés ou les Pennatules (Cnidaires). Il n'a pas été relevé de différence significative sur la richesse spécifique ou le nombre d'espèces exclusives à l'un des côtés. Il n'y aurait donc **pas de taxons caractéristiques aux encroûtements cobaltifères**. [19]

Si ces analyses montrent que les écosystèmes associés aux monts sous-marins peuvent différer en fonction de la présence ou non d'encroûtements cobaltifères, cet effet reste encore très peu étudié. De nouvelles données biologiques sur d'autres monts sous-marins seraient nécessaires avant d'acquiescer toute certitude.

4.4 Exploitation minière : vulnérabilités et résilience des écosystèmes

Toute forme d'exploitation des encroûtements cobaltifères des monts sous-marins commencerait par l'exploration des monts susceptibles d'être exploités et leur cartographie. L'exploitation en elle-même comporterait 3 étapes :

1. la **fragmentation et broyage** du minerai par un collecteur de fond
2. le **transport vertical** de la roche
3. la **séparation** des matériaux en surface avec rejet des sédiments. [9]

Si les experts suggèrent que les campagnes d'exploration n'auraient qu'un faible impact sur les communautés biologiques, l'exploitation pourrait avoir de multiples conséquences sur les écosystèmes marins.[9]

La collecte des encroûtements entraînerait immédiatement une **destruction partielle du milieu de vie ainsi que des organismes** vivant sur le substrat par broyage ou ensevelissement. La destruction de l'habitat et des ressources nutritives associées mènerait indirectement à la mort d'autres espèces. Il convient de prendre en compte le type de collecteur pour estimer rigoureusement les effets, qui pourraient considérablement varier d'un mont à l'autre. [8]

La décharge des sédiments dans l'océan serait responsable de la **formation de nuages de particules fines** de quelques mètres de hauteur pouvant s'étaler sur plusieurs kilomètres. Ces sédiments en suspension modifieraient les **paramètres physico-chimiques du milieu** (absorption ou diffraction de la lumière, ressource nutritive pour le phytoplancton...) et pourraient interagir avec le zooplancton. Les particules peuvent aussi obstruer les systèmes olfactifs et respiratoires de la **faune pélagique**, dont les milieux de vie comportent habituellement peu de sédiments en suspension. [8]

Par ailleurs, la **resédimentation** de ces particules sur des sites beaucoup plus éloignés pourrait drastiquement changer la composition biologique de ceux-ci. Les sédiments pourraient parcourir **2 à 20km** en fonction des courants et de la topographie, la vitesse de sédimentation étant d'autant plus faible que les particules sont petites. Une étude des courants profonds serait ainsi nécessaire pour prévoir la dispersion des sédiments.[8]

L'ensemble des processus augmenterait également la concentration en **composés toxiques** dans le milieu, acides forts comme métaux dissous (cobalt, fer, plomb...). Une **pollution sonore** non négligeable pour les écosystèmes serait générée, pouvant notamment perturber les organismes migrants.[16]

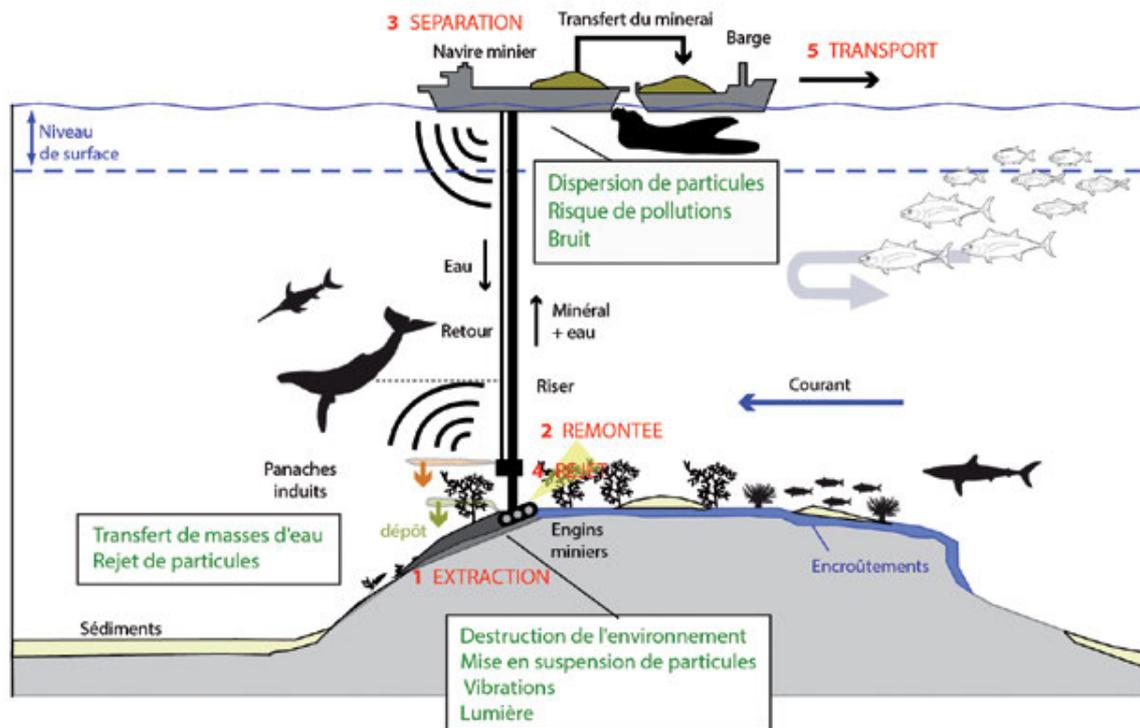


FIGURE 4.4: Impacts de l'exploitation minière des encroûtements cobaltifères sur les écosystèmes. Source : Ifremer [8]

Le processus d'exploitation peut donc engendrer de fortes perturbations du milieu. Or les espèces des monts sous-marins sont caractérisées par des **taux de croissance lents** et une **grande longévité**, adaptés à des milieux aux conditions stables dans le temps. La **connectivité des populations** des différents monts sous-marins représente un dernier facteur à considérer. En effet, la disparition d'une population sur un mont sous-marin pourrait interrompre les échanges entre les populations des autres édifices proches. Bien que leur temps de résilience soit difficile à estimer, il semble probable que les écosystèmes des monts sous-marins soient **peu résilients** à des modifications rapides du milieu. [8]

Cependant les connaissances sur les ressources minérales de la ZEE restent très parcel- laires. Il est aujourd'hui impossible de déterminer si les encroûtements des monts sous- marins peuvent être exploités à des **coûts raisonnables pour l'économie comme pour l'environnement**. [16]

5. Conclusion

Bien que certaines **théories** physiques et biologiques puissent être utilisées pour comprendre quelques effets généraux associés aux monts sous-marins, il ne s'agit en réalité que de **cas particuliers**.

Chacune de ces formations se situe dans un **cadre géologique**, hydrodynamique et topographique distinct (latitude, type de substrat, taux de sédimentation, courants, profondeur du sommet...). Ces contextes différents amènent de nombreux monts sous-marins à être considérés comme des environnements **particuliers** avec des **écosystèmes** et des caractéristiques **géologiques propres**.

Malgré l'apport de quelques campagnes exploratoires, que ce soit sur le plan de l'exploitation des ressources minérales ou de la recherche en biologie marine, la connaissance des monts sous-marins reste encore très parcellaire.

L'acquisition des données satellites et les progrès en traitement numérique ont permis la mise en place d'approches statistiques et globales du sujet. Ces données concernent généralement la situation biophysique à la surface des océans et ne peuvent suffire à saisir pleinement des phénomènes qui se manifestent sur toute la profondeur de la colonne d'eau et qui sont spécifiques à chaque mont sous-marin.

Une meilleure compréhension de ces objets marins si particuliers nécessiterait des investissements substantiels pour réaliser plus de campagnes d'exploration in situ.

La comparaison terrestre, bien que naïve et simpliste, permet de saisir toute la mesure de notre ignorance. La richesse des montagnes européennes se fait gage de son pendant marin en Polynésie, immergé à des milliers de mètres de profondeur...

6. Remerciements et Crédits

Cette étude a été soutenue par un financement du programme Héritage des Océans de Pew et Bertarelli. Les points de vue exprimés dans ce rapport sont ceux des auteurs et ne reflètent pas nécessairement ceux de The Pew Charitable Trusts et de la fondation Bertarelli.

Nous tenons à remercier tous les acteurs suivants pour leur aide dans la réalisation de cette étude.

- La Direction Polynésienne des Affaires Maritimes
- Le Service des Affaires Maritimes de Polynésie française
- La Direction des Ressources Marines
- Le Laboratoire de Géophysique de Pamatai
- La Fédération des Associations de Protection de l'Environnement - Te Ora Naho
- Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
- Le Ministère de l'économie et des finances, en charge des grands travaux et de l'économie bleue
- Ocean Products Tahiti
- Le Bureau de l'Action de l'Etat en Mer
- Le JRCC
- La station Gump
- Le CRIOBE
- Le programme Héritage des Océans de la fondation Pew Bertarelli

Nous tenons également à remercier plus particulièrement les chercheurs suivants pour l'aide et les précisions qu'ils ont pu nous apporter : Astrid B. Leitner, Camille Lepetit, Telmo Morato, Daniel Raoux, Olivier Hyvernaud, Gilles Siu et René Galzin.

Bibliographie

- [1] Fonteneau A. Monts sous-marins et thons dans l'atlantique tropical est. aquat living resour. 1986.
- [2] Gary C. B. Poore Bertrand Richer de Forges and J. Anthony Koslow. Diversity and endemism of the benthic seamount fauna in the southwest pacific. 2000.
- [3] Vigneron Emmanuel (ed.) Gay J.C. (collab.) Morhange C. (collab.) Ollier Corinne (collab.) Peugniez G. (collab.) Reitel B. (collab.) Yon-Cassat F. (collab.) Danard Michel (coord.) Laidet Danielle (réd.) Dupon Jean-François (ed.), Bonvalot Jacques (ed.). Atlas de la polynésie française. 1993.
- [4] ORSTOM EVAAM, IFREMER. Ecotap : étude du comportement des thonidés par l'acoustique et la pêche à la palangre en polynésie française : rapport de la mission ecotap 1 à 18. 1995-1997.
- [5] Pierre Fréon and Laurent Dagorn. Review of fish associative behaviour : Toward a generalisation of the meeting point hypothesis. *Rev. Fish Biol. Fish.*, 10 :183–207, 01 2000.
- [6] P. Saget H. Bougault. Les encroûtements cobaltifères de polynésie française. 2011.
- [7] M. Castelin P. Lozouet P. Maestrati et S. Samadi J. Delavenne, L. Keszler. Deep-sea benthic communities in the largest oceanic desert are structured by the presence of polymetallic crust. 2019.
- [8] N. Le Bris O. Rouxel P.-M. Sarradin S. Lamare C. Coumert M. Morineaux J. Tourolle J. Dymont, F. Lallier. Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes. 2014.
- [9] Kristina M. Gjerde Steven H. D. Haddock Glenn S. Carter C. Anela Choy Malcolm R. Clark Pierre Dutrieux Erica Goetze-Chris Hauton Mariko Hatta J. Anthony Koslow Astrid B. Leitner Aude Pacini Jessica N. Perelman Thomas Peacock Tracey T. Sutton Les Watling Jeffrey C. Drazen, Craig R. Smith and Hiroyuki Yamamoto. Mid-water ecosystems must be considered when evaluating environmental risks of deep-sea mining. 2011.
- [10] Morato T Pauly D Kitchingman A, Lai S. Seamount abundance and locations. 2007.
- [11] Leitner, A.B., Neuheimer, A.B. & Drazen, J.C. Evidence for long-term seamount-induced chlorophyll enhancements. *Sci Rep* 10, 12729. 2020.
- [12] Yasui M. Albacore, thunnus alalunga, pole-and-line fishery around the emperor seamounts (environment and resources of seamounts in the north pacific). 1986.

- [13] Thomas Schlacher Alan Williams Mireille Consalvey Karen I. Stocks Alex D. Rogers Timothy D. O'Hara Martin White Timothy M. Shank Malcolm R. Clark, Ashley A. Rowden and Jason M. Hall-Spencer. The ecology of seamounts : structure, function, and human impacts. 2010.
- [14] Allain V Nicol SJ Morato T, Hoyle SD. Tuna longline fishing around west and central pacific seamounts. 2010.
- [15] Damaso C Machete M Santos M et al. Morato T, Varkey DA. Evidence of a seamount effect on aggregating visitors. 2008.
- [16] C. David et al. P. Le Meur, P. Cochonat. Les ressources minérales profondes en polynésie française. 2016.
- [17] Cédric Ponsonnet. *Les Paru, bilan des connaissances acquises et perspectives d'exploitation en Polynésie française*. Documents et travaux du Programme ZEPOLYF, 3, 215 p., Université de la Polynésie française, Tahiti, Polynésie française, 2004.
- [18] Ashley A. Rowden, John F. Dower, Thomas A. Schlacher, Mireille Consalvey, and Malcolm R. Clark. Paradigms in seamount ecology : fact, fiction and future. *Marine Ecology*, 31(s1) :226–241, 2010.
- [19] A. Rowden T. O'Hara M. Clark C. Kelley T. Schlacher, A. Baco and J. Dower. Seamount benthos in a cobalt-rich crust region of the central pacific : conservation challenges for future seabed mining. 2014.
- [20] Valerie Allain Simon J. Nicol Telmo Morato, Simon D. Hoyle. Seamounts are hotspots of pelagic biodiversity in the open ocean. 2010.
- [21] Paul J.B. Hart Malcolm R. Clark Nigel Haggan Ricardo S. Santos Tony J. Pitcher, Telmo Morato. *Seamounts : Ecology, Fisheries Conservation*. Blackwell Publishing, 2007.
- [22] Serge Andréfouët Franck Magron Malcolm Clark David S. Kirby Frank E. Muller-Karger Valérie Allain, Julie-Anne Kerandel. Enhanced seamount location database for the western and central pacific ocean : Screening and cross-checking of 20 existing datasets. 2008.
- [23] M R ; Taylor M ; Rogers A D Yesson, Chris ; Clark. The global distribution of seamounts based on 30-second bathymetry data. 2011.