



HAL
open science

Miscellanées de l'archipel monde : tout est îles, tout est archipels

Christian Depraetere

► **To cite this version:**

Christian Depraetere. Miscellanées de l'archipel monde : tout est îles, tout est archipels. 2024. hal-04663296

HAL Id: hal-04663296

<https://hal.science/hal-04663296v1>

Preprint submitted on 27 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain



À la mémoire de Joël Bonnemaïson (1940-1997)
"l'homme de Tanna"

A tribute to Grant McCall (1943-2023)
the man who knew islands and makes me discover
the Scottish whisky from the Isle of Arran and
the leatherwood honey from Tasmania

* -----*

À mes enfants Marion, Aline, Hélène, Camille, Noémie et Zoé

À mon petit-fils Mélis

À mon neveu Tom

SOMMAIRE

	INTRODUCTION	1
I	PARTIE 1 : MISCELLANEEES INSULAIRES ET NISSOLOGIQUES	13
	Les Études insulaires en quête d'une plus large légitimité	14
1	Les géographes et les indices côtiers	15
2	Qu'est-ce que l'archipel monde ?	18
3	Des îles	26
4	Les Études insulaires entre marginalité et affirmation	31
5	Positionnement et méthodes des Études insulaires	42
6	Études insulaires et nissologies, un mariage de raison	52
7	Grandeur et misères des Études insulaires	57
8	Nouvelles spatialités des Études insulaires	59
9	Le dénombrement des îles	70
10	L'apparente complexité de la forme des îles	73
11	Les îles dénombrées	76
12	Fractalité versus fragmentologie des îles et des archipels	90
13	Abduction et simulation de « paysage insulaire »	95
14	Nissologie de l'archipel monde par-delà les Études insulaires	97

II	PARTIE 2 : L'ARCHIPEL MONDE	115
	Un certain regard géographique sur les espaces insulaires	116
1	De la forme des îles	116
2	Du relief des îles	120
3	Visibilité et intervisibilité entre les îles et en mer	134
4	Hiérarchies et structures des archipels	139
5	Typologie des îles péricontinentales et océaniques	144
6	Les densités insulaires	147
7	Processus dynamiques et fragmentation insulaire	158
8	La fabrique de l'archipel monde ou la valse des terres émergées	165
9	Eustasie et variations du Niveau moyen des mers (NMM)	171
10	Isostasie et mouvements verticaux de la lithosphère	180
11	Géomorphologie et paysages insulaires	184
12	Fragmentation insulaire et processus géomorphologiques	187
13	Typologie géologique et géomorphologique des espaces insulaires	191
14	Les îles alluvionnaires	198
15	Îles à fjords et de rebond isostatique post-glaciaire (RIPG)	204
16	Les îles volcaniques et à trapps basaltiques	210
17	Les îles coralliennes	224
18	Les îles d'enneigement du plateau continental et hauts-fonds	229
19	Fragmentologie et densimétrie des espaces insulaires	244
20	Changement climatique, ressources en eau et biomes insulaires	249
21	La vie sur terres... émergées	271
22	Géogénétique et flux culturels	284
23	Territorialités des populations animales et humaines	287
24	Biodiversité et paléogéographie des îles	292
25	Géomatique et « chasse au trésor » de la biodiversité micro insulaire	297
26	Epilogue de la deuxième partie et prologue à la troisième	303

III	PARTIE 3 : GEOHISTOIRE D'UN ARCHIPEL D'ARCHIPELS	305
	Ecce Homo sapiens ou l'impromptu attendu	306
1	Structure de l'archipel monde et évolution de l'homme	309
2	La transition de phase du Néolithique et l'évolution climatique	324
3	La lente évolution de la révolution néolithique	386
4	Les premières civilisations en divers lieux de l'archipel monde	394
5	Le désenclavement partiel des humanités pré colombiennes	401
6	Le désenclavement planétaire du XV ^e au XVIII ^e siècle	436
7	L'arpentage de l'archipel monde (1915-1914)	461
8	Conflictualisation structurelle de l'archipel monde (1914-1991)	477
9	Le puzzle actuel d'un archipel monde fragmenté en voie de globalisation	511
10	Géohistoire comparée de la Méditerranée et de la Baltique	553
	CONCLUSIONS	591
	ANNEXES	607
	Références	646
	Liste des figures	681
	Liste des tableaux	690
	Liste des photos	690
	Liste des formules	690
	Glossaire	692

Résumé

Par archipel monde, il faut comprendre l'ensemble des terres émergées passées présentes et futures. Toutefois, l'ouvrage s'intéressera principalement à ses plus petits fragments actuels soient les îles, ce que **Frank Lestringant** appelle les "terres menues". Dans ce cadre géohistorique, il y a les faits de nature, l'environnement au sens large, et les faits humains notamment depuis l'Anthropocène mais pas seulement. Les phénomènes liant la donne géographique aux processus historiques est si forte qu'il faut parler d'une intrication géohistorique dont les miscellanées racontent l'évolution de notre planète en interaction avec le vivant, notamment l'humanité ces derniers temps. Fonctionnellement "tout est îles, tout est archipels" au sens où tout lieu est à la fois isolé tout en étant lié à ses voisins quels que soit le processus, l'époque ou l'échelle considérées.



Le fil conducteur est celui de la communauté des scientifiques de toutes disciplines travaillant sur les Études insulaires pour qui le terme "insularité" implique que des qualités spécifiques ou paradigmatiques sont attribuées aux îles, que "l'île" est donc élevée au rang de catégorie de lieu à part entière, qui se distingue essentiellement des lieux non insulaires. Ce travail s'inscrit dans le sillage des l'École des Annales et de l'histoire sérielle de **Pierre Chaunu** en particulier, de l'Îlétité du géographe **Joël Bonnemaison**, à la science des îles ou Nissologie voulu par l'anthropologue **Grant McCall**. Enfin, les travaux et réflexions sur l'archipel monde se veulent une contribution à la géohistoire de **Christian Grataloup** qui n'a cesse de nous rappeler que "l'Histoire a une Géographie".

Pour ce qui est des méthodes et des concepts, les recherches s'appuient sur la loi surface-nombre de **Jaromir Korcak**, de la Théorie des îles de Mac Arthur et Wilson, la théorie de la percolation de **Pierre-Gille de Gennes**, du concept de métapopulations de **Ika Hanski**, de la chorématique de **Roger Brunet**, de la relation espèces-superficie de **Mark Lomolino**, etc. Ces divers éléments serviront de base d'étude et de réflexion sur les processus de Dispersion-Diffusion-Migration (DDM) à l'œuvre à travers le puzzle insulaire de l'archipel monde. Les analyses se baseront sur la Base de données Insulaires Mondiale (BIM) de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

La première partie évoque des "miscellanées" de réflexion et d'expérience sur les Études insulaires et la nissologie dans ses diverses variantes. La seconde explore l'archipel monde dans le menu détail d'un monde d'îles aux environnements si variés : géographie, géologie, tectonique, climat, biologie. La troisième partie prend la forme d'un essai sur la géohistoire de l'homo sapiens à travers l'archipel monde depuis le *out of Africa* suivi de son expansion sur les périphéries insulaires hors du domaine de l'ancien monde.

Enfin, l'inspiration, toute profane celle-là mais ô combien féconde, doit être mise au crédit de **Julien Gracq** lorsqu'il évoque l'île imaginaire de Vezzano dans son livre *Le Rivage des Syrtes*

Note liminaire sur la Base de données Insulaires Mondiale

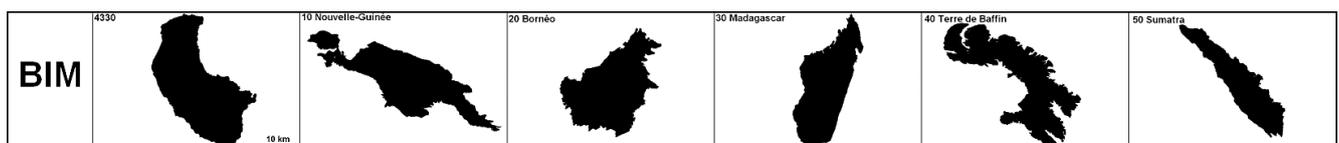
« Nous avons constaté que les caractéristiques climatiques et environnementales étaient beaucoup plus difficiles à déterminer pour les îles que pour les régions continentales, car les petites îles ne sont pas bien représentées dans la plupart des ensembles de données environnementales mondiales qui sont fréquemment utilisées dans les études macroécologiques. »

Traduit de
Kreft et al., Global diversity of island floras from a macroecological perspective.
Ecology Letters, 2008

Une partie des traitements et des cartes utilisés dans l'ouvrage sont issues la Base de données Insulaires Mondiale (BIM) qui a pour objet de faciliter l'accès et de documenter de façon plus spécifique les terres émergées de moins d'un million de km², la plus grande île étant la Nouvelle-Guinée. En terme plus succinct, il s'agit de **réduire le « data gap »** relatif à l'étude des espaces insulaires.

Afin de permettre des études comparatives à l'échelle globale, seules les données homogènes à cette échelle ont été retenues. Elles sont donc particulièrement adaptées à une approche macrogéographique de l'insularité. Toutefois, BIM ne prétend pas se substituer à des bases de données régionales, nationales *a fortiori* locales qui sont *de facto* plus détaillées sans être pour autant comparables avec d'autres régions ou sites.

La plupart des informations sont issues de données mondiales disponibles en libres accès. Dans certains cas, il s'agit d'un sous-ensemble ne couvrant que les îles ce qui diminue sensiblement la quantité de données à traiter, les îles de BIM ne couvrant que 7 738 000 km² soit l'équivalent de l'Australie. **BIM contient 180 527 îles** dont toutes celles de plus de 5 hectares. Environ 500 attributs sont associés à chaque île : planimétrie, topographie, toponymie, géologie, climat actuel et futur, population, etc. Chaque île a un identifiant unique par ordre décroissant de superficie (IIC/CII).

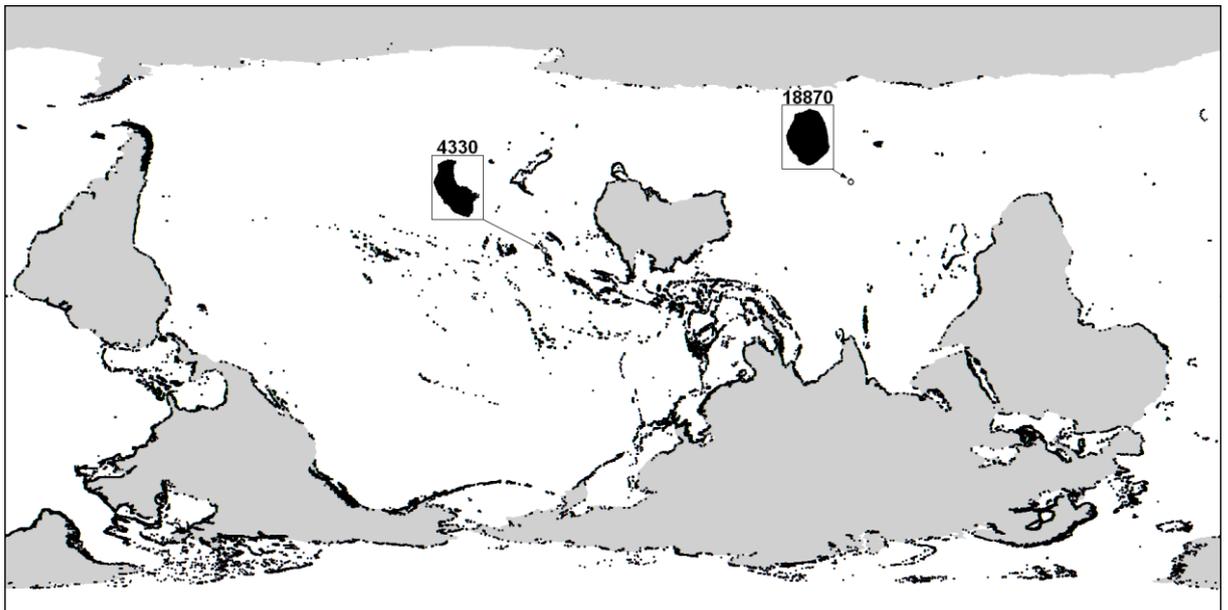


Le développement de BIM a été fait dans le cadre de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Une version test a été installée en ligne sur le site du World Conservation Monitoring Centre (WCMC) de l'UNEP à Cambridge (UK) en janvier 2010 dans le cadre du Global Island Partnership (GLISPA) sous le nom de Global Island Database (GID). La version test de GID n'ayant pu être maintenue faute de moyens, la présente version de BIM met à disposition les données de la version de 2010 avec de nombreux ajouts, corrections et reconfigurations des données.

Les données avec leurs métadonnées sont disponibles sur le DATAVERSE (DATAsuds) de l'IRD, ceci afin de faciliter les éventuelles vérifications que souhaiterait faire le lecteur. Voir : <https://doi.org/10.23708/T37S0K>

PARTIE 2

L'ARCHIPEL MONDE



*« Ma seule ambition de poète est de recomposer,
de ramener à l'unité, ce qui n'est que fragment, énigme, effroyable hasard. »*
Friedrich Nietzsche, *Ecce Homo*

2. Un certain regard géographique sur les espaces insulaires

Dans leur ouvrage de référence traitant de l'analyse de données statistiques spatiales à partir d'exemples, les géostatisticiens Daniel Griffith et Larry Lane évoquent non sans humour un domaine reconnu pour austère par nombre de praticiens des sciences humaine et sociale y compris les géographes (Figure 47). Dans le cadre qui est le nôtre, il n'est pas question de faire un déballage de géostatistiques mais de mettre en avant des méthodes à la fois simples et pertinentes¹⁸⁹ pour qui voudrait mieux comprendre ce que sont les espaces insulaires et archipélagiques. À l'instar d'un Pythagore placardant que « Nul n'entre ici s'il n'est géomètre », faut-il avertir le lecteur peu enclin à ce genre d'approche qu'il devra s'imposer une forme d'ascèse intellectuelle afin de ne pas jeter le bébé avec l'eau du bain ? L'objectif peut se limiter à « comprendre qu'il y a matière à comprendre »¹⁹⁰ l'intérêt des résultats à défaut d'avoir saisi le détail des méthodes. Le présent préambule est donc une incitation à ne pas rejeter tout ce qui relève d'une « mathématisation du réel »¹⁹¹ se faisant aux dépens du bon sens, qui s'avère parfois un faux-ami en matière d'interprétation statistique¹⁹².

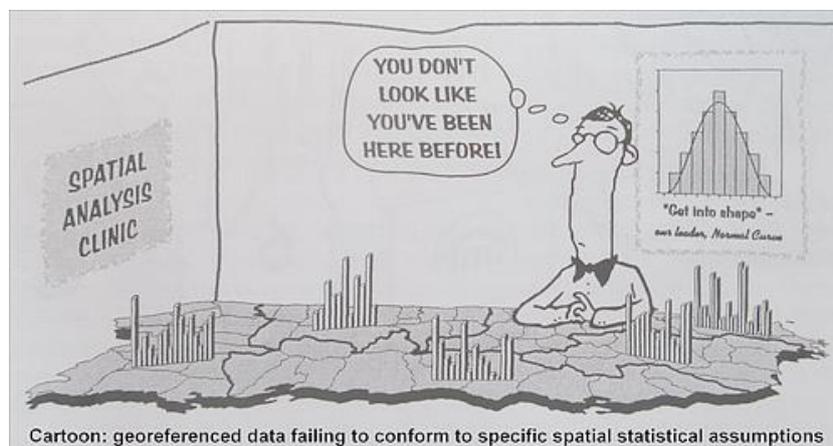


Figure 47 : oscultation de l'île de Porto Rico : «Données géoréférencées non conformes à des hypothèses statistiques spatiales spécifiques » (Griffith & Layne, 1999, p. 485)

Oscultons les patients insulaires.

2.1. De la forme des îles

Dans un commentaire inédit sur un article traitant des indices de forme des objets géographiques, le professeur Ian Evans de l'université de Durham a eu des mots très durs concernant cet exercice qu'il jugeait d'un intérêt mineur et quelque peu galvaudé¹⁹³. Pourtant, ces indices de forme permettent de dégager certaines caractéristiques qui peuvent être mises en relation avec les processus responsables du festonnement du littoral et de la forme des îles

¹⁸⁹ Les méthodes utilisées dans ce qui suit ne sont pas propres à la géostatistique mais relèvent davantage de la géométrie et de l'analyse statistique.

¹⁹⁰ Expression reprise de Michaël Fœssel lors de l'émission Profession philosophe.

¹⁹¹ Fait référence au titre du livre du philosophe des sciences Giorgio Israel (1996).

¹⁹² Les méthodes statistiques, y compris celles traitant de structures spatiales, apparaissent cependant pour certains mathématiciens comme une branche secondaire de leur discipline de par un degré moindre abstraction et de conceptualisation.

¹⁹³ Voir en particulier les réserves précédemment développées concernant l'indice côtier de François Doumenge.

(Depraetere C., 1991). La formulation et le calcul d'indicateurs de forme n'a pas seulement un intérêt quantitatif mais aussi didactique et heuristique :

- À l'instar des chorèmes, cela suppose un certain niveau d'abstraction, d'exégèse pourrait-on dire, par rapport à la nature du phénomène que l'on souhaite analyser ;
- Ils permettent des études comparatives et l'établissement d'une terminologie plus précise ;
- Ce sont de outils pédagogiques *ad hoc* pour l'enseignement d'une géographie faisant plus appel à la réflexion qu'à la mémoire.

Établir manuellement le grand axe du rivage à partir de cartes est facile pour peu que l'échantillonnage soit restreint. L'automatisation de son calcul à partir de données numériques pose quelques problèmes qui peuvent être résolus par la géométrie et l'algorithmique. Premier constat, le grand axe d'un polygone est obligatoirement formé par deux points appartenant à son polygone convexe ; deuxièmement, l'algorithme du « zipper » permet de réduire sensiblement le nombre de calculs élémentaires de distance par rapport à celui consistant à les mesurer toutes¹⁹⁴. Il faut retenir que le grand axe et le polygone convexe sont peu sensibles à l'échelle — ou au pas de mesure — comme c'est le cas de la surface projetée. À partir de ces mesures robustes, on établit un indice d'allongement (I_a) et un indice d'« embaïement » (I_e) reflétant l'importance des baies par rapport à l'île :

En posant S superficie de l'île en km^2 , L_{ga} longueur du grand axe en km et S_{pc} la superficie du polygone convexe en km^2 , il advient que :

$$[8] \text{ Indice d'allongement : } I_a = L_{ga} / (2 \cdot (S/\pi)^{0.5}) \quad [9] \text{ Indice d'embaïement : } I_e = S_{pc}/S$$

La Figure 48A résume ce qui précède sur quelques exemples. La Réunion a un faible allongement et comporte peu de baie, ce qui indique son origine volcanique récente alors que Palawan est très allongée et fortement échancrée par de grandes baies indiquant que sa formation est due à la collision entre deux plaques tectoniques.

En revanche, les indices côtiers de Doumenge (I_c) et sa version modifiée (I_{cm}) dépendent de la précision dont trait de côte est défini par les cartes ou des données numériques. Enfin, on doit rappeler que les indices côtiers modifiés (I_{cm} , voir [2]) et d'allongement (I_a , voir [8]) sont établis par rapport à une île supposée parfaitement circulaire de rayon R (cercle équivalent) de superficie ($S=\pi \cdot R^2$) et de périmètre ($P=2 \cdot \pi \cdot R$). Il faut que les indices côtiers modifiés et d'allongement soient complémentaires pour rendre compte de ce qui relève d'une part du festonnement de la côte et d'autre part de la forme de l'île. Comme dans le cas de la relation entre la superficie et l'indice côtier modifié (voir Figure 23), on observe que l'indice d'allongement tend à croître en fonction de la superficie des îles (Figure 48B).

Ces mesures ont un intérêt générique et peuvent être utilisées dans d'autres domaines que la nissologie nomothétique. Néanmoins, les atolls, en particulier ceux ayant un lagon fermé comme Clipperton, posent problème : faut-il ne tenir compte que sa rive océanique extérieure ou intégrer aussi sa rive interne ? Dans le premier cas, les deux indices côtiers seront faibles et, à l'inverse, extrêmement forts dans le second. Il faut aussi évoquer par

¹⁹⁴ Pour un polygone de N points, le nombre calculs élémentaires $N_e = N+(N-1)+(N-2)+\dots+2+1!$! L'optimisation qu'autorise l'algorithme du zipper (N_z) diminue fortement les temps de traitement ($N_z \ll N_e$). Cette méthode est implémentée dans la plupart des SIG pour établir le polygone convexe.

exemple la forme singulière de Miquelon qui voit deux hautes terres raccordées par un tombolo dunaire au ras des flots. Là encore, les premières ont une forme circulaire alors que l'ensemble de Miquelon est allongé. C'est aussi le cas pour l'île de Yan Mayen dont la silhouette évoque une cuillère et juxtapose un cône volcanique avec une longue péninsule qui correspond à une dorsale océanique émergée. On citera, à titre anecdotique, les péninsules résultant de la formation d'un tombolo entre une ancienne île et la côte du mainland ou d'un continent : Giens sur la côte méditerranéenne française, la presqu'île d'Hafun à l'est de la Somalie, la péninsule d'Omara au Pakistan.

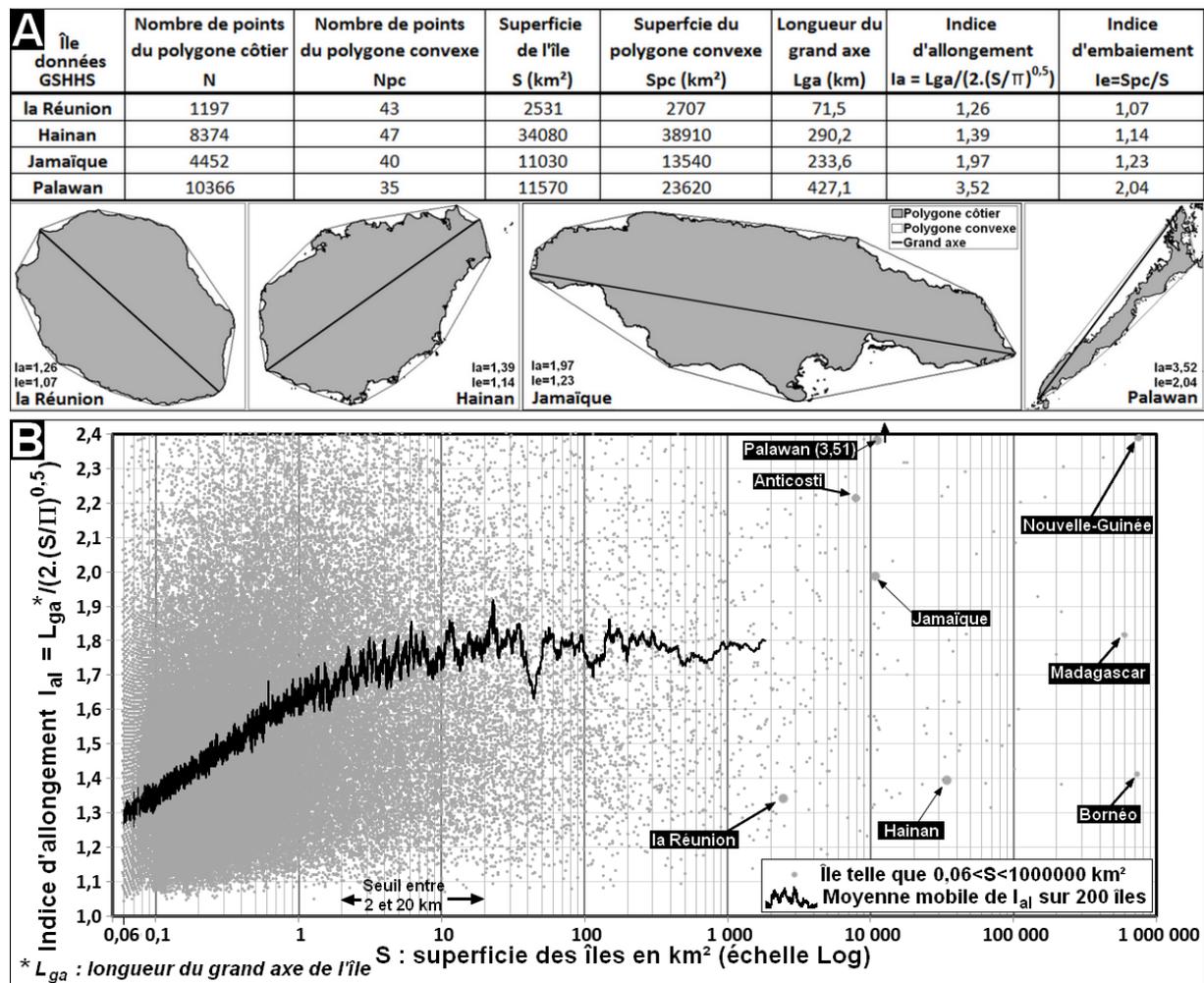


Figure 48 : Indices de forme des îles.

(A) Polygones convexes, grands axes, indices d'allongement et d'embaïement.

(B) Relation entre la superficie des îles et leurs allongements.

Ces réserves étant faites, les formes insulaires et les indices qui s'y rapportent reflètent leurs origines, voire leur âge ; une île presque circulaire ou légèrement elliptique peut signaler un cône volcanique (Tristan da Cunha, les îles secondes des Galapagos, l'archipel des Lipari), voire deux (la Réunion) ou trois volcans coalescents (Big Island à Hawaï) ; des atolls soulevés sans lagon tendent aussi à être circulaires (Tubuāi dans les Australes, Henderson à l'est de Pitcairn). À l'opposé, les terres présentant un net allongement peuvent être liées aux marges des plaques tectoniques, qu'elles soient associées (l'arc externe des grandes îles de la Sonde depuis Sumatra jusqu'à Bali et Florès) ou non (Nouvelle-Calédonie, Géorgie du Sud) à du volcanisme. Les cordons dunaires frangeant en pointillé ou plutôt en tireté certaines côtes sont

de longs rubans sableux séparés par quelques passes étroites comme c'est le cas sur les littoraux du Delaware et de la Caroline du Sud. Les côtes découpées par les fjords se traduisent par une multitude d'îles séparées par d'étroits chenaux marins. Outre leur emboîtement labyrinthique et leur extrême variété de forme, elles se caractérisent par un découpage extrême de la côte, ce qui se traduit par de forts indices côtiers (côte pacifique de la Colombie-Britannique, Labrador, Terre de Baffin). Nous verrons que leur position relative les unes par rapport aux autres se révèle être également un indicateur quant à leurs origines géologique et morphoclimatique, d'où la notion de « signature morphologique » tant à l'échelle d'une île qu'à celle d'un archipel. Pour être complète, l'analyse de l'empreinte des processus géotectoniques dans les formes géographiques requiert que soit prise en compte la troisième dimension, celle du relief.

Miscellanées	IIC/CCI	Île	km ²	Population	Densité
				2 020	Hab./km ²
	10240	Tessel	163,9	15 407	94
	15250	Terschelling	91,0	6 299	69
	19360	Ameland	60,4	5 108	85
	24640	Schiermonnikoog	39,4	1 265	32
	26480	Vlieland	35,5	1 475	42
	27650	Borkum	33,1	7 439	225



Le zoom sémantique via google earth vers « l'île ».

Le zoom sémantique correspond à la fonctionnalité SIG permettant de partir d'une visualisation à l'échelle de la sphère terrestre posée dans l'espace et de plonger vers un lieu précis de la Terre en faisant apparaître progressivement des informations adaptées à toutes les échelles intermédiaires : Pour qui l'a vécu non comme un jeu mais en tant d'expérience scientifique et philosophique, l'esprit passe de l'impression de « Terre-île » comme l'avait ressenti les astronautes dès 1968 à celle d'un atterissage vers une île posée dans sa matrice océane, puis vers sa maison, îlot intime isolé du monde. Pour n'évoquer que l'échelle intermédiaire, l'île ou l'îlot stricto sensu donne à lire en premier lieu leur forme, une sorte d'épure géographique où l'émotion esthétique à toute sa place à côté d'un regard purement scientifique d'un observateur pour l'objet observé. Il y a là une sensibilité nissologique à la façon d'Abraham Moles et c'est tant mieux.

Les îles plaisent et cela profite autant qu'il dessert la nissologie, science des îles. Combien de chorographies ô combien diverses, nous donne à percevoir la forme des rivages et l'agencement des fragments émergés, ces éléments suggérant de multiples histoires évolutives ayant pour dramaturgie la lutte entre les éléments terrestres et océaniques redessinant sans cesse les traits de côte et les reliefs agrémentant les lignes d'horizon. Dans le chapitre suivant, il sera donc question de préciser la lecture des formes paysagères et géographiques des îles et archipels depuis l'échelle du monde appréhender dans sa globalité jusqu'à celle des terres en miniature qui frangent les continents et autres mainlands océaniques. En corollaire à cet aperçu géographique de l'état présent des fragments insulaires l'archipel monde, il nous faudra les inscrire dans la profondeur historique de leur évolution passée dans un autre chapitre consacré à leur géomorphologie.

2.2. Du relief des îles

La physionomie des îles vues du large, autrement dit leur silhouette insulaire posée sur la ligne d'horizon, permet de toute évidence la distinction entre des îles hautes accrochant des panaches nuageux et des îles basses qui ne font qu'ourler le manteau océanique dans le lointain et n'apparaissent distinctement qu'à la jumelle. Ce contraste est le plus net dans le Pacifique mais se retrouve curieusement sur les côtes norvégiennes et groenlandaises. Entourées de terres au relief tourmenté, certaines îles périarctiques sont parfaitement plates, d'où leur nom de « strandflat »¹⁹⁵ indiquant leur profil surbaissé. Les exemples les plus connus sont ceux qui se trouvent parmi quelques petites îles des Lofoten et au Svalbard¹⁹⁶ mais s'observent aussi sur l'arc insulaire externe de la côte orientale du Groenland sur les grandes îles de Shannon et celle ayant le nom d'« Île de France »¹⁹⁷. Le même contraste se retrouve entre l'arc externe des Petites Antilles plates et coralliennes et l'arc interne montagneux et volcanique. En Méditerranée, il est connu que la Corse est « une montagne sortie de la mer » alors que sa grande voisine, la Sardaigne, présente un modelé plus souple fait de hautes collines et de larges plaines. Pour les îles les plus montagneuses, les reliefs correspondent à une longue chaîne de hautes crêtes les parcourant sur toute leur longueur : par exemple la Nouvelle-Guinée, Formose, l'île du Sud dite aussi île de Jade en Nouvelle-Zélande. Dans la même catégorie, il est des cas où les massifs orographiques alternent avec de larges ensellements comme Isabella aux Galapagos (voir Figure 27) ou la Crête, si bien qu'au large elles apparaissent comme un archipel. La question reste de savoir comment analyser la topographie de manière à faire avec précision la différence entre les deux types d'îles et celles qui ont des profils intermédiaires, en particulier lorsque se juxtaposent des montagnes, des plateaux, des collines et des plaines.

La typologie la plus élémentaire consiste à pouvoir définir des « îles basses » ayant un faible relief et, inversement, des « îles hautes ». Dans ce but, l'utilisation des Modèles numériques de terrain globaux¹⁹⁸ permet de calculer l'altitude maximale (Z_{max}) et l'altitude moyenne (Z_m) par île et d'ajuster deux fonctions rendant compte de l'augmentation des deux types d'altitude en fonction de la surface (Figure 49A) ; ces fonctions permettent de définir une valeur moyenne de l'altitude comme suit :

$$Z_{max}(S) = 55.S^{0,33} \text{ et } Z_m(S) = 23.S^{0,3} \text{ avec } Z_{max} \text{ et } Z_m \text{ en mètres et } S \text{ en km}^2.$$

En faisant le rapport entre les valeurs observées et ces valeurs moyennes, on obtient deux indices altitudinaux :

$$\text{Pour l'île } i \text{ de surface } S, I_{zmax}(i) = Z_{max}(i)/Z_{max}(S) \text{ et } I_{zm} = Z_m(i)/Z_m(S)$$

Quelques exemples : prenons l'Formose avec une superficie de 35 900 km² et une altitude maximale de 3916 mètres ($I_{zmax} = 3916/Z_{max}(35900) = 2,24$), de même pour Terre-Neuve avec une surface de 109 300 km² pour une altitude maximale de 833 mètres sera telle ($I_{zmax} = 833/Z_{max}(109300) = 0,33$). La première a une altitude maximale plus de deux fois

¹⁹⁵ L'origine géomorphologique des strandflats fait encore débat de nos jours. Cf. Guilcher & al., Le problème des strandflats en cinq pays de hautes latitudes, 1986.

¹⁹⁶ Archipel dont l'île principale est le Spitzberg.

¹⁹⁷ Suite au passage de Charcot.

¹⁹⁸ Par exemple les MNT STRM et GTOPO30 utilisés par la suite. Localement d'autres MNT type Litto3D seront à l'occasion.

supérieure à la moyenne des îles de même taille ; inversement, dans le second exemple, le sommet principal de l'île est trois fois moins élevé que la valeur de référence. En posant que lorsque la valeur de l'indice I_{zmax} est supérieure à 2 alors l'île sera définie comme « haute » (exemple de Formose), ou, lorsque cet indice est inférieur à 0,5, elle sera dite « basse » (exemple de Terre-Neuve).

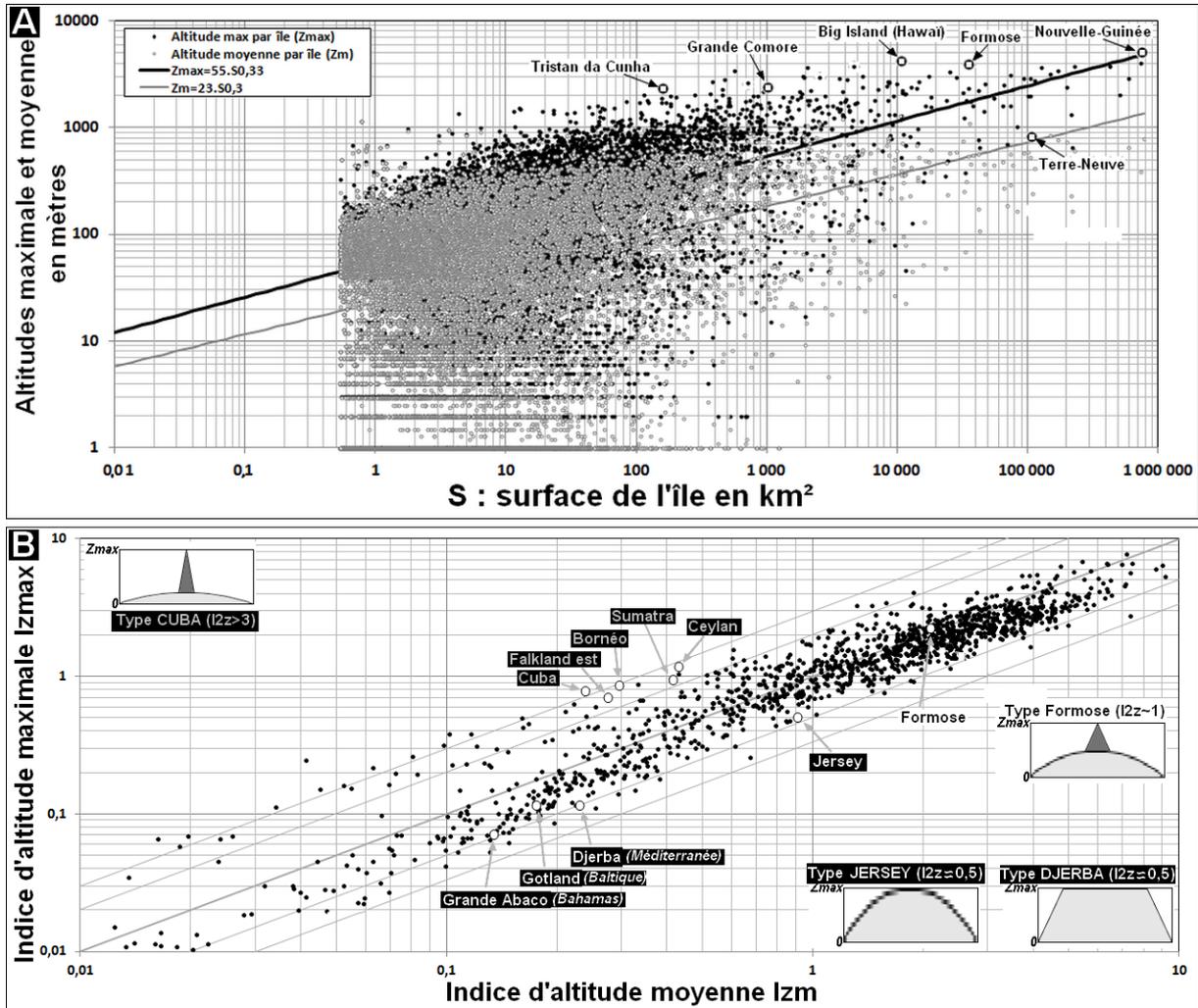


Figure 49 : Le relief des îles.

- (A) Calibrage des fonctions de type $Z = a.S^b$ établissant une relation entre la superficie (S) des îles d'une part, et leur altitude maximale (Z_{max}) et moyenne (Z_m), d'autre part
- (B) Topographie relative par île entre les zones basses (I_{zm} , plaines ou plateaux) et les zones hautes (I_{zmax} , montagnes ou collines) avec indice de forme relative $I_{zz} = I_{zmax}/I_{zm}$.

Partant de ces deux indices portant sur les altitudes relatives, un indice I_{zz} faisant le rapport entre l'indice d'altitude maximale I_{zmax} et l'indice d'altitude moyenne I_{zm} tel que $I_{zz} = I_{zmax}/I_{zm}$ permet de comparer les amplitudes altitudinales relatives entre les zones basses et hautes (Figure 49B). En fonction de cet indice de topographie relatif, trois types principaux peuvent être distingués :

- $I_{zz} \approx 0,5$ et $<0,5$: le dispositif topographique correspond à des îles à la topographie homogène sans aucune partie haute dominant les zones plus basses : type collinaire de Jersey ($I_{zz} = 0,56$) ou type tabulaire (plateau) de Djerba ($I_{zz} = 0,51$) ;

- $I_{2z} \approx 1$: la proportion de zones basses et hautes s'équilibre comme dans le cas de Formose avec $I_{2z} = 1,07$;
- $I_{2z} \approx 2$ ou >2 : les zones basses occupent la majeure partie de l'île mais sont dominées localement par quelques reliefs (montagnes, hautes collines, chicots rocheux de type monadnock...) comme par exemple dans le cas de Cuba ($I_{2z} = 3,31$), de Bornéo ($I_{2z} = 2,91$) ou de Falkland est ($I_{2z} = 2,55$).

L'ensemble de ces valeurs altitudinales et les indices qui en dérivent donnent des informations pertinentes quant à la nature morphostructurale des îles. Elles seront utilisées par la suite pour définir des ensembles insulaires présentant des contrastes topographiques tels que ceux existant entre des îles hautes (volcans, chaînes de montagne émergées), des îles tabulaires (cratons érodés par les glaciations, plateaux sédimentaires...) et des îles basses (atolls, strandflats, îles et bancs sableux...).

Quels sont les éléments remarquables du relief ? Longtemps directeur du Comité français de cartographe et ingénieur-géographe de l'IGN, Henri Dufour a commis un article au titre évocateur pour notre propos : « Éléments remarquables du relief : définitions numériques utilisables » (Dufour & Abgrall, 1983). Dans cette note, Dufour fait des cols une clé de voûte du relief puisqu'ils sont les seuls points remarquables à l'intersection des lignes de crêtes (ou d'interfluve) et des lignes de points bas des thalwegs qui se prolongent jusqu'à ces enlèvements de la topographie¹⁹⁹. En reconsidérant les idées de Dufour dans le cadre de la théorie de la percolation de Pierre-Gilles de Gennes (voir Figure 16), les cols sont les points où se produisent les transitions de phase plus ou moins importantes en fonction de l'importance relative des « massifs et des vallées topographiques » dont ils sont l'articulation, la charnière, le « nœud topologique » dans ce cadre théorique (Leleu-Merviel, 2005, pp. 63-64). Supposons qu'une surface topographique insulaire²⁰⁰ se voie progressivement ennoyée par la montée du NMM. Lorsque le niveau atteint l'altitude du col le plus bas, la surface se sépare en deux fragments donnant naissance à un chenal marin.

Cette transition de phase insulaire façon de Gennes se traduit numériquement par l'incrémentation du nombre de fragments dépend de la taille relative de ces deux éléments ; si l'un est très grand par rapport à l'autre, la transformation géographique sera mineure alors que si les deux ont une superficie du même ordre, l'île se verra transformée en un archipel comportant deux fragments de superficie comparable faisant de cette transition géographique autant que topologique un événement majeur. En poursuivant le processus jusqu'à ce que le niveau marin dépasse le plus haut sommet et en comptabilisant le nombre de fragments au fur et à mesure, on est à même de suivre l'évolution de l'île initiale devenant progressivement un archipel depuis son point initial jusqu'à son point final en ayant le détail des transitions de phase fragmentologiques de la topographie. On verra que cette dynamique n'est pas sans rappeler les problèmes de fragmentations des espaces naturels et la question des corridors écologiques qui en découlent.

En pratique, il est possible de se limiter à une analyse discrète de la topographie en utilisant des courbes de niveau ou isohypses, issues de numérisation de carte ou dérivées de MNT/MNS²⁰¹. Lorsque le nombre de fragments passe de N_f à $N_f + n$ entre deux contours topographiques cela implique que le nombre de cols ayant une altitude comprise entre les

¹⁹⁹ Les Anglo-saxons utilisent le terme de « *saddle point* » ou « point de selle » pour évoquer de larges cols comme ceux des barres appalachiennes appelés aussi « *gaps* ».

²⁰⁰ Donc sans effet de bord lié coupant arbitrairement une surface topographique.

²⁰¹ Les MNT donnent l'altitude du sol alors que les MNS correspondent à l'altitude du sursol incluant les bâtiments, le sommet des arbres et des forêts, etc.

deux valeurs des courbes de niveau est aussi égal à n . Que se passe-t-il lorsque cette méthode est appliquée à des surfaces théoriques simples ? Appliquée à un cône, l'évolution de la topologie de la surface ne connaîtra aucune transition de phase donc pas de fragmentation, la superficie du seul fragment restant à chaque étape se verra seulement réduit progressivement, soit un processus d'île qui rétrécit, à l'instar de ce qui s'est produit lors de la dernière glaciation²⁰². Il en sera de même pour un plateau parfaitement tabulaire, une combinaison de deux de ces formes se recouvrant partiellement ou une combinaison de ce dernier avec un cône comme relief postiche²⁰³. Qu'en est-il pour deux cônes coalescents ? Il tombe sous le sens qu'un ensellement doit apparaître à la jointure entre ces deux formes impliquant l'existence d'une transition de phase fragmentologique majeure lorsque la mer atteint l'altitude Z_c de ce col : si le niveau est inférieur à cette valeur, il n'y aura qu'un fragment alors qu'il y en aura deux au-dessus de ce seuil. Cet exercice de réflexion topologique théorique, pour simple qu'il paraisse, nous prépare à l'interprétation de courbes fragmentologiques de la relation altitude-fragmentation (AF) appliquées à des topographies insulaires réelles bien plus complexes.

La Figure 50 considère des îles présentant des topographies contrastées liées à des contextes morphotectoniques différents. Sur la dorsale médioatlantique, Tristan da Cunha (Figure 50A) est un cône volcanique partiellement émergé et peu disséqué du fait de sa jeunesse et de l'absence de traces d'effondrement ou d'érosion significatives à l'exception de la caldera sommitale née de l'affaissement de la poche magmatique. La courbe AF établie à partir de courbes de niveau d'intervalle 20 mètres dérivées d'un MNT démontre que cet édifice est bien un cône à la fois parce qu'il n'y a pas de transition de phase majeure et du fait que la superficie du plus grand fragment ($MaxF$) connaît une décroissance régulière qui ne serait pas survenue pour une forme de plateau. La précision du MNT ainsi que l'intervalle choisi de 20 mètres ne permet pas de saisir les ultimes transitions de phase et fragmentations lorsque le niveau marin atteint l'altitude des rebords du cratère qui ne peuvent être parfaitement horizontaux.

Le cas du mainland de l'archipel maltais s'apparente à celui d'un plateau sédimentaire légèrement basculé et fortement disséqué par des vallées et des vallons secondaires. Sa fragmentation a connu une augmentation majeure entre 0 mètre et 20 mètres (Figure 50B) qui peut se résumer ainsi :

- Pour $Z(0)$ soit le NMM : $Ni(0) = 1$ fragment dont la superficie est égale à celle du mainland actuel $S(0) = 251,5 \text{ km}^2$;
- Pour $Z(20)$ soit 20 mètres au-dessus du NMM : $Ni(20) = 25$ fragments totalisant $S(20) = 221 \text{ km}^2$ ($S(20)/S(0) \sim 88\%$) dont le fragment le plus grand a une superficie de $S_{max}(20) = 215 \text{ km}^2$ ($S_{max}(20)/S(20) \sim 97\%$).

²⁰² Les hauts fonds actuels du banc de Dogger ou *Dogger bank* en mer du Nord contiennent des artefacts du Paléolithique ainsi que des ossements animaux comme le mammoth.

²⁰³ Par relief postiche, il faut comprendre des formations rocheuses posées sur un socle de nature pétrographique tout différent. C'est le cas notamment pour les volcans mais aussi pour les formations coralliennes.

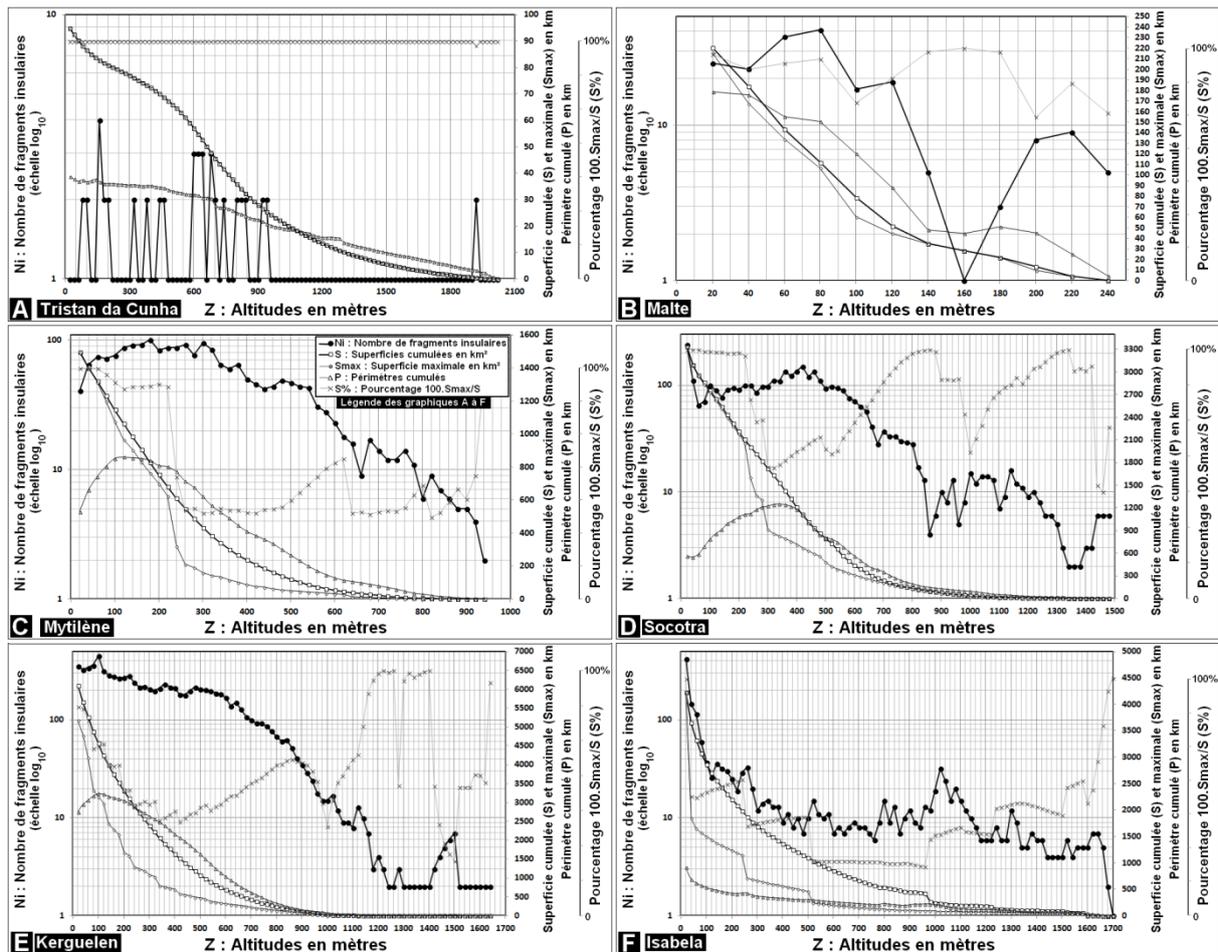


Figure 50 : Courbes altitude-fragmentation (AF) de quelques îles et archipels présentant des topographies et des morphostructures contrastés (légende des graphiques en (C).

- (A) Tristan da Cunha est un cône volcanique peu disséqué et aplati à son sommet.
 (B) Le mainland maltais est un plateau de roches sédimentaires essentiellement calcaires.
 (C) Lesvos est un horst avec plusieurs massifs disjoints par des plaines et des vallées.
 (D) Socotra présente un plateau aux basses altitudes coiffé par un massif montagneux.
 (E) Isabela est une chaîne de volcans coalescents séparés par de vastes ensellements.
 (F) Kerguelen est trapp basaltique découpé par les phénomènes glaciaires (fjords).

À ne considérer que l'évolution de la fragmentation entre ces deux altitudes, la transformation peut paraître forte mais elle reste modérée si l'on prend en compte le fait que le fragment principal représente 97 % de la surface totale. Cette dernière information reflète l'apparition de 24 « îlots » périphériques encadrant le mainland du plateau resté émergé pour l'essentiel ($S_{max}(20)/S(0) \sim 85\%$). La courbe AF est assez stable entre 20 et 120 mètres, le nombre de fragments restant compris entre 17 et 41 assortis d'une diminution progressive des surfaces des fragments et de celui du fragment principal. La transformation la plus drastique de « l'archipel des fragments » se produit entre 120 mètres et 200 mètres avec deux phases bien distinctes. De 120 à 160 mètres la fragmentation passe de 19 à 1 (submersion de plusieurs îlots) pour remonter à 8 à 200 mètres (ce qui suppose l'existence de 7 cols entre 160 et 200 mètres). Au-dessus de 200 mètres, le nombre de fragments reste du même ordre, alors les surfaces tendent vers 0. Il n'est pas inutile d'insister sur le fait qu'une montée du NMM n'implique pas une diminution et encore moins une disparition des îles mais au contraire une augmentation de celles-ci comme c'est le cas pour le mainland de Malte entre 0 et 20 mètres puis entre 160 et 200 mètres. Cette archipélisation pendant certaines phases peut surprendre

car le bon sens tend à nous faire croire que si la mer monte alors il y a moins d'îles. S'il est vrai que certaines îles seront totalement submergées, il est tout aussi certain que de nouvelles vont apparaître. Si tant est qu'une preuve soit nécessaire, la courbe Altitude-fragmentation de Malte démontre que la montée progressive du NMM peut augmenter le nombre d'îles, ce qui est parfaitement cohérent et prévisible dans le cadre des transitions de phase de la théorie de la percolation qui s'articule sur les fécondes intuitions d'Henri Dufour. En résumé, l'évolution de la fragmentation d'une terre émergée sous l'effet d'une transgression marine dépend du nombre de cols de la surface originelle.

L'exemple de l'île de Lesbos en mer Égée se caractérise par la fracturation de son socle se traduisant par un compartimentage de son relief à diverses échelles impliquant l'existence de nombreux cols. Les éléments majeurs concernant sa courbe AF sont les suivants (Figure 50C) : forte augmentation de la fragmentation jusqu'à 40 mètres suivie d'une stabilisation entre cette altitude et 540 mètres, chute brutale de la taille du plus grand fragment entre 240 et 260 mètres, etc. Socotra, située au large de la corne de l'Afrique, est un plateau sédimentaire flanqué, au nord, d'une petite chaîne de montagnes. Sa courbe AF (Figure 50D) rappelle celle de Lesbos si ce n'est que la fragmentation décroît entre 20 et 60 mètres. Cette différence s'explique par le fait que les plaines côtières de l'île grecque sont parsemées de petits massifs collinaires alors que celle du Yemen ne comporte pas de relief significatif situé entre le rivage et les piémonts du plateau. Entre 640 et 860 mètres, la fragmentation de Socotra diminue fortement du fait de la transition entre le plateau et le piémont de la chaîne de montagnes. Le mainland de Kerguelen est formé pour l'essentiel de trapps basaltiques sur lesquels repose le relief postiche du volcan du Mont Ross lui-même coiffé d'un glacier (Figure 50E). Sa courbe AF est proche de celle de Lesbos et dans une moindre mesure de Socotra. Elle s'en démarque néanmoins par la régularité avec laquelle la fragmentation décroît de façon progressive entre 20 et 840 m. Au-dessus de 1 180 m, la faible fragmentation ne fait que refléter la massivité du Mont Ross et de la calotte glaciaire qui l'encapuchonne.

Enfin, l'île d'Isabela (Voir Figure 27) offre un dispositif fort différent caractérisé par une nette diminution de la fragmentation de 20 à 120 m suivie d'une longue phase de stabilisation ou de faible décroissance jusqu'aux plus hauts sommets vers 1 620 m (Figure 50F). La tendance observée dans les basses altitudes procède du micromodelé chaotique résultant de la présence de nombreux fronts de laves plus ou moins effondrés et disséqués, leur fréquence tendant à décroître au fur et à mesure que l'on s'éloigne du rivage. Plus haut, on atteint progressivement l'altitude des grands ensellements qui séparent les cinq principaux édifices volcaniques de Wolf, Darwin, Calderon, Volcan Grande et Serro Azul, ces derniers étant parsemés de petits cratères adventifs. La Figure 51 rend compte des altitudes remarquables de la courbe AF : maximum de fragmentation à 20 m, stabilisation de sa décroissance à 120 mètres avec un minimum à 760 m suivi d'un nouveau maximum à 1 120 m, alors qu'au-dessus de 1 640 m ne subsistent que sept fragments composant les plus hauts sommets de quatre des principaux volcans.

La courbe AF seule ne reflète que partiellement les évolutions fragmentologiques de l'île d'Isabella. La superficie relative du plus grand fragment ($S\% = 100.S_{max}/S$) est un bon indicateur de la distribution des surfaces (courbe AS%). La forte fragmentation à 20 mètres est en fait un grand fragment représentant presque 100 % de la surface totale entourée par une multitude de petits fragments. En passant à 40 mètres, la courbe AS% décroît brusquement en passant à 50 %, ce qui signifie que la grande île de ce nouvel archipel ne représente plus que la moitié du total. La carte de la Figure 52A montre que cette transformation est due à l'ennoiement de l'ensellement entre le volcan Calderon (M3) et le volcan Grande (M4), ce qui correspond à une transition de phase puisque l'océan « percole »

par le détroit entre les deux grands fragments restants. Il en va de même lors de la transition entre les altitudes 240 et 260 m (Figure 52B, double transition de phase entre le volcan Darwin [M2] et le volcan Calderon [M3] d'une part, et le volcan Grande [M4] et le volcan Cerro Azul [M5], d'autre part) et entre les altitudes 500 et 520 m (Figure 52C, transition de phase entre le volcan Wolf [M1] et le volcan Darwin [M2]). Au-dessus de 520 m, la surface relative des grands fragments reste du même ordre, soit environ 23 % jusqu'à 960 mètres. La courbe AS% montre alors des paliers ascendants qui correspondent à l'enneioement des calderas du volcan Calderon (M3) et du volcan Grande (M4) entre 960 et 980 m (Figure 52D) puis de la caldera du volcan Cerra Azul (M5) entre 1 500 et 1 520 m (Figure 52E).

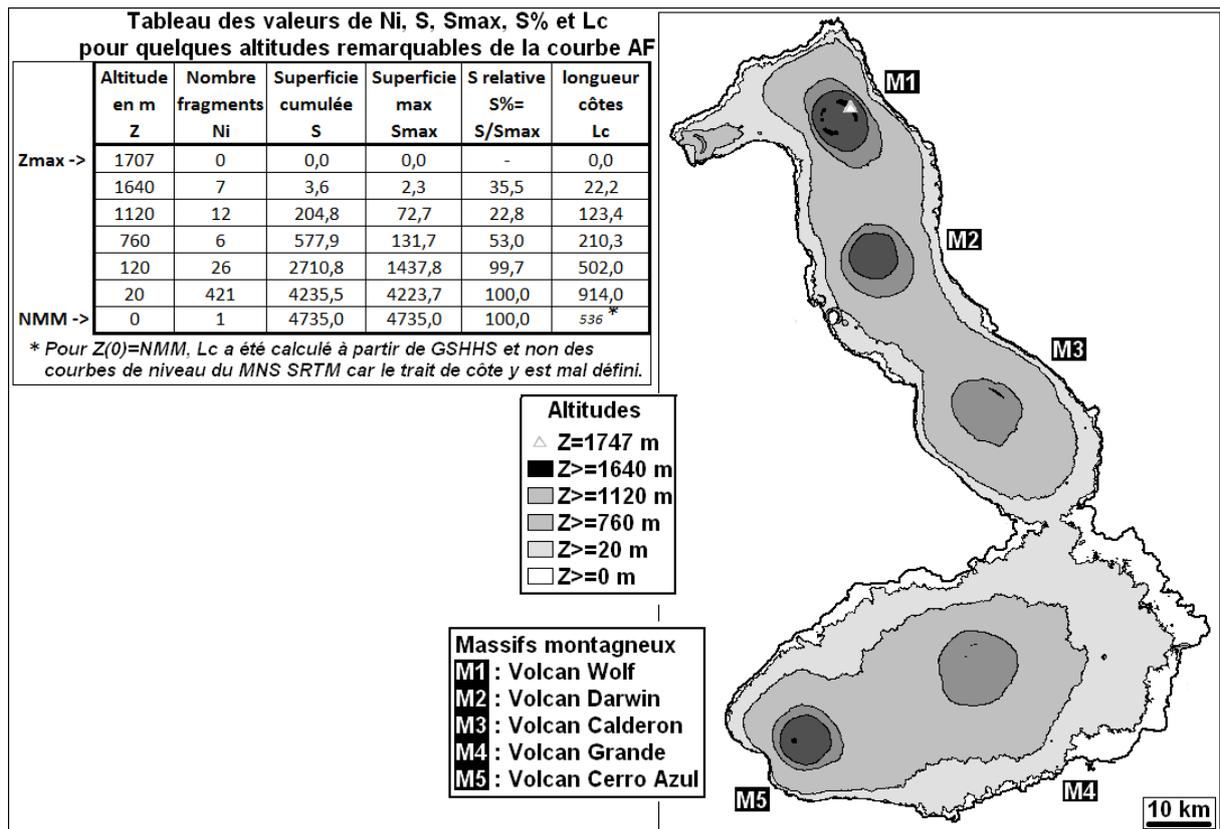


Figure 51: Altitudes correspondant à des minima ou maxima de fragmentation dans la courbe AF.

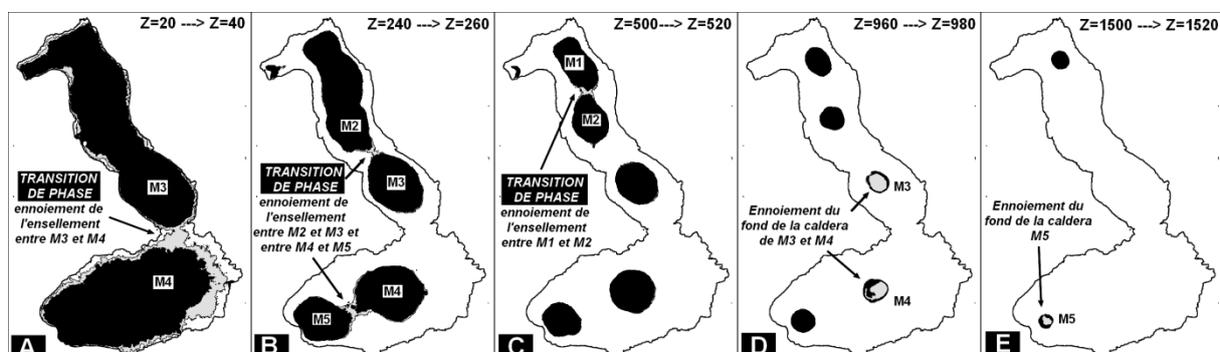


Figure 52 : Plages d'altitudes correspondant à des changements importants dans la courbe entre les altitudes (Z) et la superficie relative du fragment le plus grand (S%).

On commentera rapidement la courbe faisant le lien entre l'altitude et la longueur cumulée des traits de côte (courbe ALc) ; la tendance générale est à la diminution de la longueur des littoraux des fragments avec cependant une augmentation possible aux basses altitudes comme c'est le cas pour Lesvos, Socotra et Kerguelen avec des maxima de longueur respectifs à 120, 360 et 100 m. La longueur des littoraux dépendra en partie de la forme des fragments : plus ils auront une forme ronde ou peu allongée comme c'est le cas pour les cônes volcaniques, plus faible sera sa valeur (voir Indice d'allongement /a décrit plus haut).

Il va de soi que ces exercices d'analyse se limitant à la topographie doivent être mis en regard avec la géomorphologie (météorisation, érosion, transport et sédimentation), la tectonique et l'étagement bioclimatique depuis la côte jusqu'aux plus hauts sommets et de ses conséquences sur les températures, les précipitations (liquides ou solides) et la nébulosité. En premier lieu, il faut avoir à l'esprit que les basses altitudes sont davantage associées à des processus hydrologiques de bas de versant et de fond de vallée alors que les hautes altitudes reflètent plus la lithologie et la tectonique du socle géologique. Il en résulte que la topographie présente un étagement de nature géomorphologique indépendamment de celui des conditions climatiques et biologiques. Pour ces dernières, le cas de Kerguelen peut être mis à contribution puisque cette île périantarctique connaît un climat frais mais pratiquement sans gel au niveau de la mer alors que son plus haut sommet, qui ne culmine qu'à 1 850 m, est occupé par un glacier. La topographie, telle qu'elle nous est connue par les isohypses ou par des MNT, procède d'un équilibre dynamique dans le long terme entre les processus géomorphologiques et les formes de terrain. Nous verrons que les surfaces topographiques ne sont pas des surfaces quelconques se laissant facilement modéliser à partir de prémisses statistiques ou fractales. Notamment, elles ne sont pas inversibles, au sens où un relief inversé n'est pas réaliste puisque les points bas d'une surface réelle sont liés à un niveau de base qui est le plus souvent le NMM. Pour en revenir aux îles ou plus exactement aux fragments insulaires, ils ont l'avantage d'être topographiquement exhaustifs puisque la surface n'est pas tronquée arbitrairement par les limites d'une carte ou d'une couverture télédétection ou lidar. On retrouve ainsi la notion de modèle insulaire si chère aux insularistes et aux géographes.

La topographie a des conséquences directes sur les processus hydrométéorologiques à méso-échelle β^{204} (De l'ordre de 10^4 km²), en particulier sur les reliefs montagneux insulaires exposés aux advections de masse d'air venant de l'océan. François Doumenge donne quelques indications précises sur ce point :

« Les enchaînements de phénomènes et les rapports avec les influences extérieures seront fonction de la surface mais aussi du volume émergé : dès qu'une île aura un relief capable de générer par lui-même des effets climatiques, elle présentera des caractéristiques plus ou moins continentales. Ce seuil en pratique est atteint dès qu'une masse montagneuse de plus de 1 000 m d'altitude en moyenne s'étend sur plus de 20 000 km². » (Doumenge, 1985, p. 298)

La seule île correspondant à ces deux critères est Formose avec ses 29 900 km² et une altitude moyenne de 1 114 m, et, dans une moindre mesure, l'Île de Jade en Nouvelle-Zélande (150 000 km², 856 m alt.), Vancouver en Colombie-Britannique (31 947 km², 753 m alt.).

²⁰⁴ Quelques milliers de km².

Les normales climatiques spatialisées obtenues de nos jours prennent en compte le relief pour les phénomènes hydrométéorologiques²⁰⁵ en considérant que certaines topographies, comme un grand ensellement entre deux massifs, peuvent avoir un effet d'engouffrement sur les masses d'air advectées (Bénichou & Le Breton, 1997) (Canellas & al., 2014). Toutefois, l'absence de relief n'implique pas que l'île n'a aucun effet sur les champs précipitants puisqu'elle peut provoquer des phénomènes de convections thermiques dues à la différence de température de surface entre la terre et l'océan. Sans aller jusqu'à modéliser de façon aérologique la microphysique des processus d'advection en région montagneuse, la simple analyse des courbes AF et autres informations annexes que sont celles altitude-surface cumulée (ASC), altitude-surface maximale (ASM) fournissent déjà quelques pistes sur la répartition des précipitations en tenant compte de la direction des vents dominants²⁰⁶. À titre de comparaison, la massivité de Formose a un réel effet de barrière sur les flux de la mousson venant du sud-est ainsi que l'île de Jade et sa cordillère montagneuse exposées aux perturbations venant de l'ouest alors que la Crête et l'île Isabela des Galapagos, de par le caractère délié de leur topographie, auront moins d'effets orographiques, donc sur les précipitations.

Dans un tout autre domaine, la topographie joue un rôle dans la délimitation des territoires, en particulier dans les sociétés traditionnelles. Les interfluves et plus encore les crêtes²⁰⁷ sont des obstacles plus ou moins marqués pour les échanges de toute nature. À l'inverse, les cols apparaissent potentiellement comme des lieux d'échanges, voire de conflits. Les cols les plus importants peuvent le plus souvent être mis en relation avec des transitions de phase majeures observées sur les courbes AF de sorte qu'ils doivent être considérés comme des points stratégiques dans l'étude des flux et des phénomènes de diffusion. Cette remarque fait écho au fait que les forces militaires ont toujours eu besoin de cartes topographiques aussi détaillées que possible, notamment les anciennes cartes françaises dites d'*état-major*²⁰⁸.

Comme nous l'avons vu, la surface topographique peut être fragmentée en fonction des isohypses. D'autres types de partition sont envisageables. Par partition, il faut comprendre que chaque point de la surface appartient à un fragment et un seul, ce qui n'est pas le cas avec les classes d'altitude. Une surface topographique génère *de facto* un champ de gradient, donc des pentes et des systèmes de pente qui s'apparentent à la dérivée première au sens algébrique. L'ensemble de ces gradients s'organise en fonction de deux types de points : les points les plus bas correspondent aux exutoires des rivières et de leurs bassins versants le long du littoral, les points les plus hauts sont les sommets, des dunes, des collines, des

²⁰⁵ Voir la méthode AURELHY utilisée par Météo-France ou le modèle MESO-NH appliqué sur l'Observatoire Cévennes Vivarais.

²⁰⁶ Il existe le plus souvent un gradient pluviométrique en fonction de l'altitude jusqu'à un seuil au-delà duquel les précipitations décroissent (i.e. le versant au vent de l'île de la Réunion). Ce seuil pourrait bien correspondre aux piémonts des reliefs encadrant les grands enselllements, l'effet barrière jouant moins sur les grands sommets isolés.

²⁰⁷ La distinction entre interfluve et crête est assez subtile puisque la plupart des crêtes sont aussi des interfluves et inversement, d'où l'expression « crête d'interfluve ». Toutefois, les crêtes font référence à la topographie et constitue une des familles de lignes caractéristiques qui structurent le paysage (voir travaux de Henri Dufour). Les interfluves ou lignes de partage des eaux (les « *watersheds* » des auteurs anglo-saxons, *shed* faisant référence à la ligne faitière entre les deux pans d'un toit) sont liés à la délimitation des bassins versants, ce qui en fait des objets hydrographiques plutôt que topographiques. Une autre distinction peut être faite en sachant que les crêtes tendent à se traduire par des ruptures de pentes de part et d'autre de leurs deux versants, alors qu'un interfluve évoque davantage un raccordement progressif sans rupture de pente entre deux vallées.

²⁰⁸ Cf. la phrase d'Yves Lacoste "La géographie, ça sert d'abord à faire la guerre". L'analyse de la topographie se révèle également utile pour les robots envoyés sur Mars ou d'autres planètes. J'avais été contacté au début des années 90 par le CNES afin de contribuer au développement d'un algorithme d'optimisation de parcours dans des régions vallonnées ou montagneuses, les systèmes de pente étant moins contraignants dans les zones de plaine. Ma contribution s'est limitée à indiquer que les cols et les enselllements aisément identifiables sur les MNT doivent être considérés comme des points privilégiés de passage adéquat dans l'heuristique visant à optimiser l'utilisation du robot, sachant que ce dernier doit se piloter lui-même en temps réel et non à distance par un opérateur humain. Un autre de mes apports a été celui de la recherche des « lignes de montée minimale » afin de minimiser l'utilisation d'énergie en tenant compte toutefois du facteur distance à parcourir par rapport à un trajet à vol d'oiseau.

interfluves et des crêtes. Pour atteindre les points les plus bas (minima locaux), il suffit de suivre la ligne de plus grande pente (« *steepest descent* ») comme le ferait une goutte d'eau. De même, pour rejoindre les sommets, il est possible de prendre la ligne de montée maximale (« *steepest ascent* ») comme le ferait un montagnard pressé d'arriver au sommet. Il faut se garder de croire que la descente maximale (D_{max}) n'est que l'inverse de la montée maximale (M_{max}) et qu'il suffit de prendre les « chemins » de la topographie à l'envers pour déterminer les deux types de parcours. L'application de la D_{max} à l'ensemble d'une surface revient à établir un modèle de drainage de type hydrographique permettant de connaître l'ensemble des « chemins de l'eau » superficiels²⁰⁹. En partant de tous les exutoires situés sur la côte et en explorant vers l'amont ce modèle de drainage²¹⁰, on obtient une partition de la surface en bassins versants, ce qui est une des applications hydrologiques les plus évidentes dans l'exploitation des MNT dans de nombreux SIG (exemple de Socotra en Figure 53A).

Quel est le résultat lorsque la même heuristique est appliquée aux montées maximales vers les sommets ? La partition de l'espace obtenue fragmente la surface en « massifs » élémentaires, chaque massif représentant tous les chemins de montée maximale vers un sommet et un seul (Figure 53B). Autant l'extraction des bassins s'avère pertinente puisqu'elle correspond à des unités fonctionnelles hydrologiques, autant le partitionnement en massifs peut sembler d'une utilité marginale. En effet, la moindre surélévation du sol est susceptible d'être classée comme étant un « massif » alors que le terme fait référence à des proéminences majeures du relief liées à un ou plusieurs sommets. Pour qu'elle soit pleinement utile, il est nécessaire d'itérer la procédure d'extraction des massifs en forçant le chemin vers les cols ayant la plus faible dénivelée avec le sommet déjà atteint (Figure 53C ; Depraetere & Riazanoff, 2004 ; Depraetere C. , 2013, p. 102). Entre ces sommets et leurs cols associés, l'exploration ne suit plus le principe de la M_{max} mais celui de la descente minimale (« *lowest descent* », D_{min}). Au fur et à mesure des itérations, les massifs fusionnent progressivement en s'organisant autour de sommets de plus en plus élevés (Figure 53D) jusqu'à ce que l'ensemble de la surface soit associée avec le plus haut sommet de la région ou de l'île. On retiendra que le partitionnement d'une surface topographique en fonction des massifs qui paraissait *a priori* d'un intérêt mineur constitue une méthode de segmentation des paysages pertinent pour estimer le compartimentage lithologique et tectonique tel qu'il se voit reflété dans la topographie.

Chaque famille d'objets, bassins ou massifs, contient des lignes privilégiées où viennent converger les cheminements : pour les bassins versants, c'est une arborescence de thalwegs potentiellement parcourus par des ruisseaux, des rivières et des fleuves, pour les massifs un réseau hiérarchisé de crêtes secondaires et principales faisant office de lignes de partage des eaux. Conformément à la conception dufourienne de la topographie, l'ensemble du paysage est donc organisé selon des points hauts et bas, autour des lignes caractéristiques de la topographie que sont les thalwegs et les crêtes, les cols se situant à l'intersection de ces deux réseaux topographiques. Sur l'île de Socotra, on note que deux lignes principales de points bas traversent l'île depuis la côte sud jusqu'à la côte nord (Figure 53D) ; elles intersectent les crêtes faitières parcourant l'île d'ouest en est, ce qui correspond à la ligne de partage des eaux entre les bassins se déversant vers le sud et ceux s'écoulant vers le nord (voir bassins versants de la Figure 53A) ; de toute évidence, ces deux ensellements séparant les massifs sont des lieux stratégiques de passage aussi bien dans le passé que dans le présent. L'aspect algorithmique de ces partitionnements en bassins et en massifs est décrit en annexe 3.

²⁰⁹ Expression de l'hydrologue Pierre Chevalier (1990)

²¹⁰ Utilisation de l'algorithme du labyrinthe pour explorer de façon exhaustive un graphe arborescent.

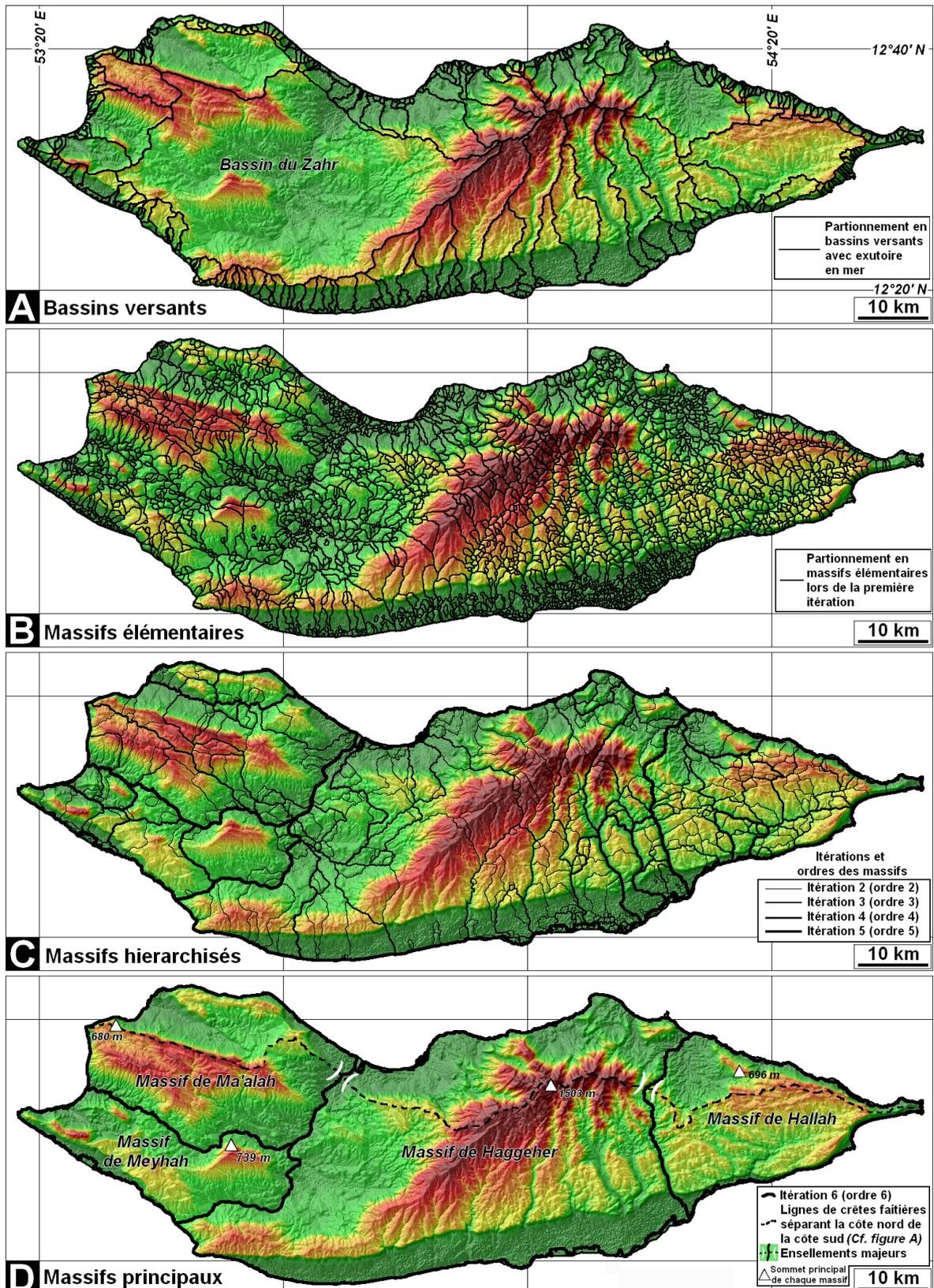


Figure 53 : Partitionnement d'une surface topographique en fonction des points bas (exutoires de la côte) et des points hauts (sommets) de Socotra.

(A) Partition en bassins versants selon la descente maximale (« *steepest descent* »).

(B) Partition en « massifs » élémentaire selon la montée maximale (« *steepest ascent* »).

(C) Hierarchisation pas à pas (*stepwise merging*) des massifs élémentaires de la carte (B).

(D) Dernière itération ne comportant plus que quatre grands massifs.

La même méthode de fragmentation peut être généralisée sur le cas de l'île de Lesbos qui présente un relief plus complexe sur une côte bien plus découpée que l'île de Socotra (Figure 54A). De plus, cette île fait partie du large échantillonnage insulaire de la mer Égée, qui permet de comparer les caractéristiques fragmentologiques de cette région avec les propriétés de la topographie de Lesbos. La surface peut être segmentée en fonction des courbes de niveau (polygone supérieur à Z mètres par intervalle de 50 mètres, Figure 54B), des bassins versants (Figure 54C) ou des massifs montagneux (Figure 54D) : il faut noter que les trois types de fragments n'ont pas la même topologie :

- Courbes de niveau ou « îles altimétriques » : il s'agit des fragments tels que Z supérieur à Z_i avec i intervalle de 50 en 50 mètres. Il va de soi qu'un fragment $Z > Z_i$ est obligatoirement inclus dans un fragment tel que $Z > Z_{i-1}$. La somme des superficies sera donc supérieure à celle de l'île ;
- Bassins versants : en ce cas chaque point topographique appartient à un fragment et un seul. Il s'agit d'une partition de l'île en fragments dont la somme des superficies sera égale à celle de l'île ;
- Massifs montagneux : en considérant une à une les itérations d'ordre 1 (Figure 53B) à n (en l'occurrence 2 à 5 sur Figure 53C), on obtient une partition hiérarchisée en fonction des points hauts. Par construction les massifs d'ordre i sont emboîtés dans des massifs d'ordre $i+1$. La somme des superficies de tous les massifs sera égale à n fois celle de l'île.

L'analyse de l'organisation des surfaces topographiques en fonction des points bas et des points hauts permet de dégager deux types « d'empreinte » complémentaires : d'une part l'empreinte hydrologique procédant du fonctionnement des écoulements de surface, d'autre part l'empreinte lithologique davantage liée à la nature des roches et à leur fissuration. C'est en fonction de cette trame complexe que les flux vont s'organiser. Ainsi, les réseaux de transports, en particulier les routes, tendent-ils à suivre les lignes de points bas définies par les limites de massifs comme c'est le cas pour l'île de Lesbos (Comparer les Figure 54A et D). Pour ce qui est des variantes dialectales de la langue Soqotri, la différenciation majeure s'observe entre celle de la côte nord par rapport à celle du sud de part et d'autre de la ligne de crête est-ouest majeure traversant l'île (Simeone-Senelle, 2003).

Les divers types de fragments topographiques définis pour Lesbos peuvent se voir appliquer la méthode de Korčák déjà utilisée pour les îles afin d'en étudier leurs propriétés de distribution statistique. Il apparaît notamment intéressant de les comparer avec la fragmentologie des îles à l'échelle de la mer Égée (Figure 55E), l'objectif étant d'évaluer le degré de similarités entre d'une part les courbes NS des courbes de niveau, des bassins versants et des massifs à l'échelle d'une île, et, d'autre part, celle des îles à l'échelle régionale. La distribution des fragments des quatre types d'objets s'ajuste plus ou moins selon des fonctions puissance. Le résultat le plus remarquable tient à ce que la distribution statistique des superficies des « îles altimétriques » définies par les courbes de niveau de Lesbos est assez semblable à celle des îles de la mer Égée. Bien que prévisible en théorie, ce résultat s'avère d'autant plus étonnant que les deux sources de données sont différentes : pour la topographie de Lesbos, il s'agit de données raster MNT SRTM à 3" d'arc de résolution (≈ 100 mètres) alors que pour la mer Égée, elles proviennent de données vecteur GSHHG. Ce constat démontre que la topographie générale de la mer Égée au sens des propriétés de la courbe de niveau 0 mètre possède des caractéristiques analogues à celles observées à l'échelle de la topographie d'une île, en l'occurrence Lesbos. Les deux autres courbes NS des bassins

versants et des massifs présentent une pente tendancielle plus forte que celle des « îles altimétriques » ; pour les bassins versants, l'hyperfragmentation vient du fait que les espaces disponibles entre les grands bassins sont déjà fragmentés et en bord de mer, le phénomène s'accroissant au fur et à mesure que la surface des bassins devient petite ; pour les massifs il peut s'agir d'un suréchantillonnage dû à l'emboîtement d'objets de plusieurs ordres.

Pour ce qui est des partitionnements en massif, une analyse des fragmentations par ordre permet de dégager les éléments sous-jacents à la tendance fonction puissance ($N=913.S^{-0,84}$, $R^2=0,997$) observée pour l'ensemble des massifs tous ordres confondus entre 2 et 300 km² (Figure 55). Il en advient que, pour les massifs d'ordre 1 à 4, la fonction d'ajustement la plus adaptée est de type exponentielle ($N=a.e^{-b.S}$) ou dans une moindre mesure logarithmique ($N=a.Ln(S)+b$). Ceci démontre que la tendance d'ensemble de type fonction puissance parfaitement ajustée à la distribution ($R^2=0,997$!) résulte de la combinaison d'au moins quatre fonctions exponentielles ayant des coefficients de corrélation compris entre 0,9 et 0,98 ; en d'autres termes l'exposant de Korčák b établi sur l'intégralité de l'échantillonnage de massifs provient de quatre « vagues » de fragments d'échelles différentes se recouvrant l'une l'autre, chaque vague ayant une distribution hybride exponentielle-logarithmique.

Ce résultat s'appliquant aux massifs et non aux îles n'est pas sans rappeler le phénomène déjà noté entre la distribution statistique des îles à l'échelle mondiale parfaitement corrélée à une seule et même fonction puissance et celles bien plus variées aux échelles régionales et locales (Voir Figure 29, Figure 30, Figure 31, Figure 32, Figure 35 et Figure 37). En d'autres termes, l'homogénéité d'une distribution à grande échelle sur un large échantillonnage de surfaces peut résulter d'une combinaison de sous-échantillons ayant des propriétés statistiques bien différentes. Tel est le cas pour les massifs de Lesbos (Figure 55) tout autant que pour les fragments insulaires considérés à l'échelle mondiale par rapport aux résultats régionaux et locaux. Ces quelques analyses fragmentologiques nous conduisent à penser que la régularité apparente d'une tendance nombre-superficie ne permet pas de conclure qu'un seul processus dominant permettrait d'expliquer les propriétés statistiques d'ensemble de l'échantillonnage des fragments considérés. Ce constat possède un intérêt à la fois théorique et pratique. D'un point de vue strictement statistique, il y a matière à recherche si l'on veut comprendre les propriétés combinatoires à diverses échelles de différents objets et les relations entre elles, par exemple entre les empreintes hydrologiques des bassins versants et des massifs. En résumé, il y a non-stationnarité spatiale des fragmentations insulaires²¹¹. D'un point de vue pratique, au sens géomorphologique, l'objectif reste bien évidemment de mettre en relation ces « signatures » statistiques et ces « empreintes » géographiques avec des processus morphogéniques expliquant l'agencement des formes topographiques²¹². Ce point capital devant être repris plus en détail dans un chapitre spécifique, nous ne ferons que rappeler que le relief terrestre (émergé ou immergé) résulte de la combinaison de plusieurs processus s'étant succédé et surimposés dans le temps si bien que la plupart des surfaces topographiques sont polygéniques. Il est en quelque sorte cohérent que les résultats fournis par les méthodes utilisées reflètent cette complexité et cette variabilité, toutes deux inhérentes à l'équilibre dynamique entre formes et processus dans le temps long de l'évolution des paysages.

²¹¹ La « stationnarité » temporelle ou spatiale d'un processus ou de sa mesure suppose une homogénéité du phénomène observé sur des sous-échantillons (périodes pour le temps, sous-régions pour l'espace). Dans le cas contraire, les réalisations à l'échelle des sous-parties deviennent aléatoires et s'apparentent à un processus poissonien. Ce constat est cohérent avec ce que l'on sait des propriétés pétrographiques et géomorphologiques à savoir leur variabilité dans l'espace (voir (Garcia-Morales, 2003)).

²¹² Partant de la notion de raisonnement et méthode abductifs, il s'agit d'une démarche de type empirico-déductive.

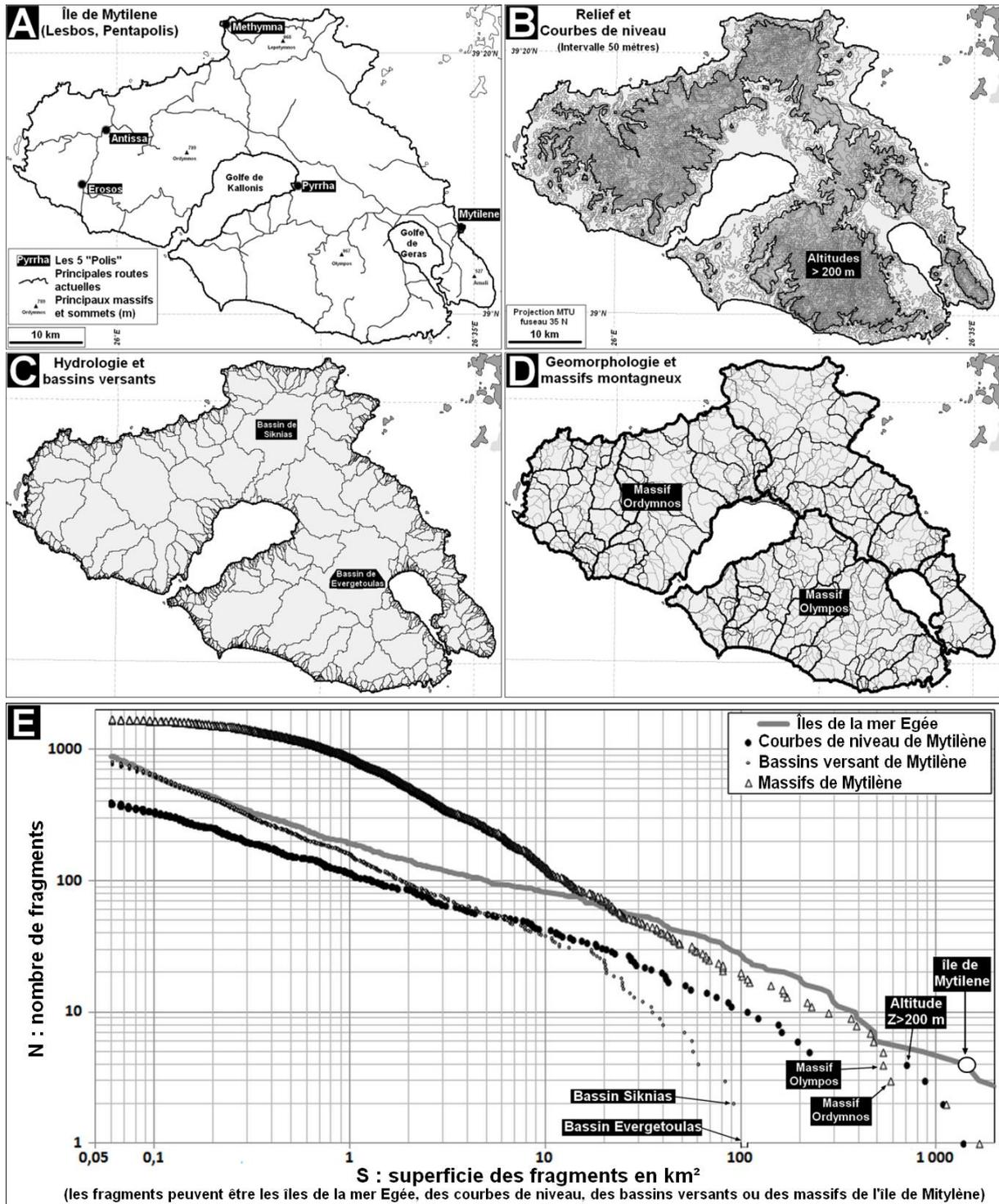


Figure 54: geomorphometrie de Lesbos (A à D) comparée aux autres îles de mer Égée (E).
 (A) Les principaux massifs et les routes principales selon les cartes
 (B) La topographie et fragments Z>200 mètres
 (C) Les bassins versants (fragmentation en fonction des points bas)
 (D) Les massifs et sous-marins (fragmentation en fonction des points hauts)
 (E) Comparaison des courbes NS des îles de la mer Égée (dont Lesbos) et celles obtenues pour les courbes de niveau, les bassins versants et les massifs montagneux de Lesbos.

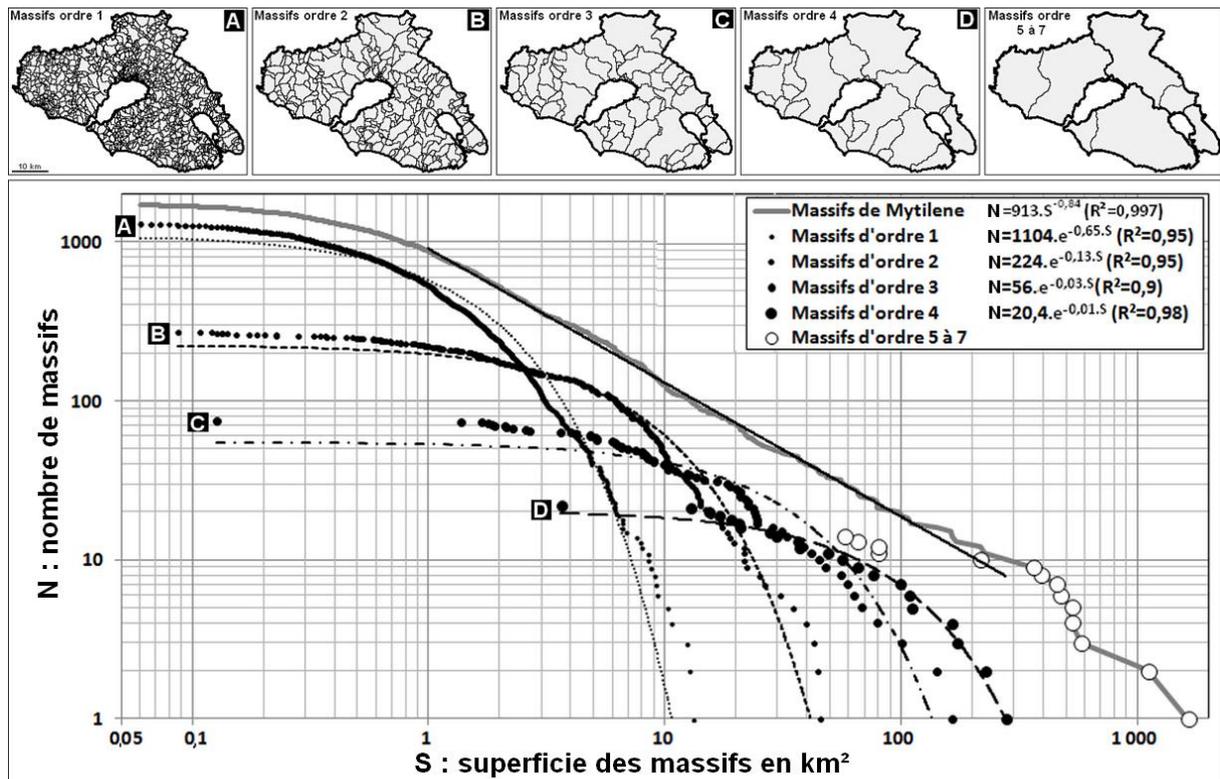


Figure 55: Fonctions de distribution exponentielles ($N = a \cdot e^{-b \cdot S}$) des superficies de massif d'ordre 1 à 4 et fonction de distribution puissance ($N = a \cdot S^{-b}$) pour tous les massifs.

2.3. Visibilité et intervisibilité entre les îles et en mer

Le relief a un rôle déterminant dans la visibilité d'une terre vue du large, ce qui en fait un élément à considérer dans sa découverte et son peuplement. La distance de la ligne d'horizon peut être établie de façon simple en connaissant le rayon moyen de la Terre R et l'altitude au-dessus du Niveau moyen des mers (NMM) du point considéré²¹³.

$$[10] Lg = 3,554 \cdot Z^{1/2}, \text{ avec } Lg \text{ en km et } Z \text{ en m.}$$

Du fait de la réfraction de la lumière dans l'atmosphère, les rayons lumineux ont une trajectoire courbe avec une concavité vers le bas qui fait que la visibilité effective est plus importante que celle donnée par la formule précédente, qui n'est que géométrique. Ce point ne sera pas détaillé ici mais il correspond à un facteur de l'ordre de 9 %²¹⁴. En l'appliquant à la précédente formule, on obtient la distance de la ligne d'horizon réelle Lr telle que :

$$[11] Lr = 1,09 \cdot Lg = 3,874 \cdot Z^{1/2}, \text{ avec } Lg \text{ en km et } Z \text{ en m.}$$

Par défaut, lorsque le mot « visibilité » sera utilisé, il s'agira de Lr . Les courbes altitude- Lg et altitude- Lr sont données en Figure 56. À titre d'exemple, elles indiquent que le sommet

²¹³ On posera que $R = 6377 \cdot 10^3$ est le rayon moyen de la Terre en mètres, Z l'altitude en m et Lg la distance géométrique de la ligne d'horizon en km. Par la relation de Pythagore, il vient que $(R+Z)^2 = R^2 + Lg^2 \rightarrow Lg^2 = (R^2 + 2 \cdot R \cdot Z + Z^2) - R^2 \rightarrow Lg^2 = 2 \cdot R \cdot Z + Z^2$; Z étant très petit par rapport à R ($Z \ll R$), la valeur de Z^2 devient négligeable par rapport ($2 \cdot R \cdot Z$) d'où $Lg^2 \approx 2 \cdot R \cdot Z \rightarrow Lg = 2^{0,5} \cdot R^{0,5} \cdot Z^{0,5} \rightarrow Lg_m = 3554 \cdot Z^{0,5}$. La distance géométrique en km de l'horizon Dg sera : $Lg = 3554 \cdot Z^{0,5} / 1000 = 3,554 \cdot Z^{0,5}$.

²¹⁴ L'atmosphère et notamment les gradients de pression et de températures ont un effet prismatique sur les rayons lumineux pouvant dans certaines conditions augmenter la distance de l'horizon d'un facteur de 15 %.

enneigé du Puncak Jaya²¹⁵ en Nouvelle-Guinée est visible jusqu'à 271 km, soit suffisamment loin pour être vu depuis la côte. Ce fait est corroboré par les navigateurs hollandais Jan Karstens²¹⁶ en 1623 puis par de Jacob Roggeveen en 1722 alors qu'il longeait la côte nord de l'Irian Jaya actuel et signalait un point blanc posé sur l'horizon montagneux de la grande île (Hope, Peterson, Allison, & Radok, 1976), et qu'il interpréta comme étant un glacier, ce que ses supérieurs ne purent croire car il était bien connu qu'il ne pouvait y avoir de neige sous l'Équateur.

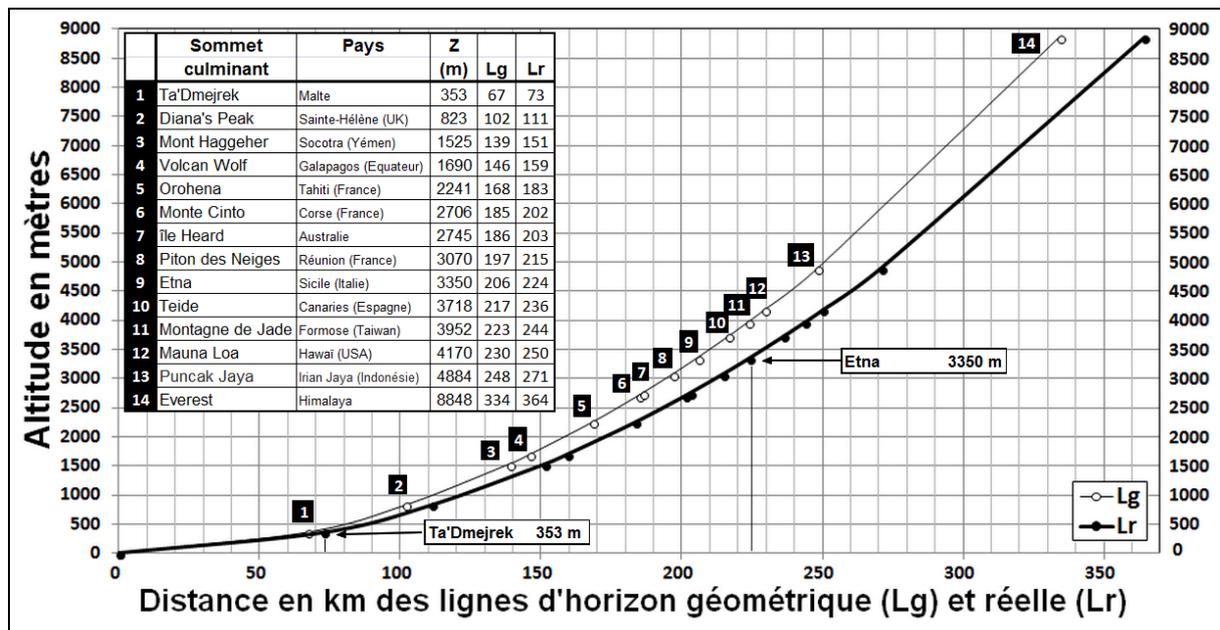


Figure 56: Courbes des relations altitudes-lignes d'horizon géométrique (Lg) et réelle (Lr).

Dans le cas de Malte, est-ce que le sommet de l'Etna en Sicile (3350 m) visible depuis le plus haut sommet de l'île de Malte le Ta'Dmejrak (253 m) ? (Figure 57A)

Le calcul théorique des lignes d'horizon à partir de ces deux points permet de répondre par l'affirmative. Peut-on aussi voir la côte de la Sicile depuis le sommet de Malte ? S'agissant d'un cas limite, la question fut posée à Godfrey Baldacchino professeur à l'Université de Malte. Il ne put me répondre mais il m'indiqua la Photo 2 prise depuis ce sommet ; elle démontre que c'est bien le cas puisque la lumière d'un phare est visible ainsi que les lumières des villes côtières²¹⁷.

En serait-il de même sur la côte ou sur un bateau à quelques mètres d'altitude ?

Un navire partant de Malte vers la Sicile devrait traverser une zone d'intervisibilité où les hauteurs des deux îles seraient visibles simultanément (Figure 57B). Cette notion d'intervisibilité pour les navires navigants « à vue » puisqu'elle n'est qu'une prolongation du cabotage qui était le mode de navigation principal avant l'apparition des boussoles et des compas. Les lignes d'horizon peuvent également être calculées à partir de courbes de niveau ou de sommets des principaux massifs comme illustré pour le cas de Chypre par rapport à la côte turque anatolienne (Figure 58).

²¹⁵ Anciennement Pyramide de Carstenz supposée dépasser les 5 000 mètres. Le sommet n'a pu être atteint par une expédition hollandaise qu'en 1933 lorsque le glacier était beaucoup plus étendu qu'aujourd'hui. Il ne subsiste que quelques grands névés actuellement (Ballard, Vink, & Ploeg, 2001).

²¹⁶ En fait le toponyme est mal orthographié puisque que le nom du navigateur était Carstenszoon.

²¹⁷ L'Etna n'est pas visible car caché par des nuages.

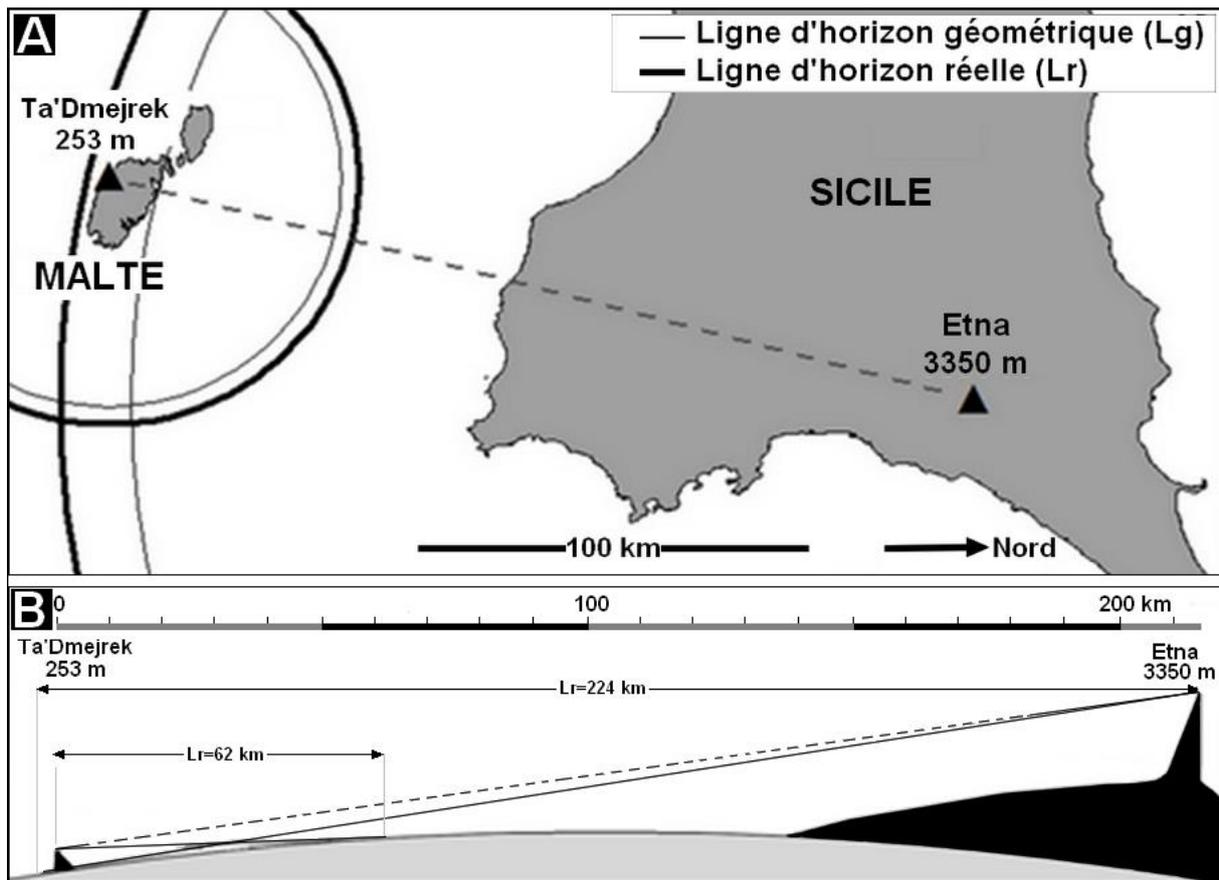


Figure 57: les lignes d'horizon depuis (Ta'Dmejrek Malte) l'Etna (Sicile).



Photo 2: vue de la côte sicilienne depuis le sommet du Ta'Dmejrek (Photo J.P. Gauci)

La méthode peut s'appliquer à d'autres régions que la méditerranée, permettant là encore d'évaluer les solutions de continuité visuelle entre les continents, les archipels et les chapelets d'îles, notamment pour des navigateurs voulant éviter de s'aventurer en pleine mer. Ces estimations de la visibilité de proche en proche est importante pour comprendre les modalités des migrations en « saut d'îles en îles » (*island hopping*). Toutes les îles de la Méditerranée appartiennent à ce type de navigation à vue, y compris l'archipel des Baléares (Figure 59A) ; ceci pourrait expliquer que certaines d'entre aient pu être coloniser ou au moins visiter dès le Néolithique, pour sûre au Néolithique alors que les esquifs de ces époques n'étaient que des troncs creusés manœuvrés à la rame et sans voile. De même pour l'arc insulaire de la Nusantarie, il existe une visibilité inter-îles depuis la péninsule malaise et les côtes continentales chinoises via Formose jusqu'aux Salomon et l'Australie (Figure 59B). Exploitant la visibilité et l'intervisibilité entre ces îles nusntariennes, les ancêtres des Aborigènes, des Papous et des peuplesMélanésiens ont pu en plusieurs vagues peupler le paléo-continent de Sahul par un processus de island hopping sans jamais avoir à naviguer en haute mer sans amer à l'horizon. Ces éléments seront repris dans la partie 3 concernant la géohistoire de l'archipel monde.

Il faut tenir compte du fait que le NMM à pu être de -130 mètres pendant les maxima glaciaires du Paléolithique ce qui augmente la visibilité entre les îles²¹⁸ et diminue la largeur des détroits et des chenaux marins. En considérant le cas de l'Afrique, les îles de la ligne Bioko²¹⁹-Annobon via Sao-Tomé et Príncipe ainsi que Socotra sont en visibilité continue depuis les côtes continentales alors qu'il n'en va pas de même pour les Comores et les Canaries. Dans la Caraïbe, toutes les petites et Grandes Antilles sont visibles de proche en proche depuis le continent sud-américain, seules les Bahamas et l'archipel des Caïmans font exception. En Asie, les atolls des Laquedives et des Maldives, les Nicobar et les Andaman sont hors de vue depuis le continent. En Europe, Les Orcades et les Shetland prolongent la navigation vers le Nord depuis l'Écosse, ce qui n'est pas le cas des îles Féroé. Enfin en Australie, les îles du détroit de Bass assurent une continuité depuis le mainland jusqu'à la Tasmanie. Les archipels montagneux localisés en haute mer sont le plus souvent en intervisibilité d'une île à l'autre pour peu qu'elles présentent un certain relief : le Cap-Vert, les Açores, le groupe de Tristan du Cunha²²⁰, les Comores, les Galapagos, la Nouvelle-Calédonie²²¹, le Vanuatu²²², les Fidji, les Marquises, les îles de la Société, l'arc des îles Hawaï, les Samoa²²³... Les Seychelles ne sont archipelagiques que sur les îles granitiques émergeant de la microplaque du même nom. Le chapelet insulaire des Kouriles assure la continuité de la visibilité depuis Hokkaïdo jusqu'au Kamchatka mais pas les Aléoutiennes entre l'extrême orient russe et l'Alaska.

Les archipels apparaissent donc souvent comme des groupes de fragments en intervisibilité constituant des unités fonctionnelles qui les apparentent à un archipel monde en miniature²²⁴. Est-il possible de définir de manière objective ce que sont les archipels et la façon dont ils se structurent statistiquement et spatialement ?

²¹⁸ Cela revient à augmenter l'altitude relative par rapport au NMM de 110 mètres pour le calcul de la visibilité.

²¹⁹ Anciennement Fernando Poo.

²²⁰ Sauf l'île de Gough.

²²¹ Sauf les îlots Matthew, Hunter et les Chesterfield.

²²² Sauf les îles Santa Cruz et Vanikoro qui font partie des îles Salomon bien que plus éloignées.

²²³ Y compris les Samoa américaines.

²²⁴ Voir en particulier l'archipel des Trobriand, lieu d'étude de l'anthropologue Bronislaw Malinowski.

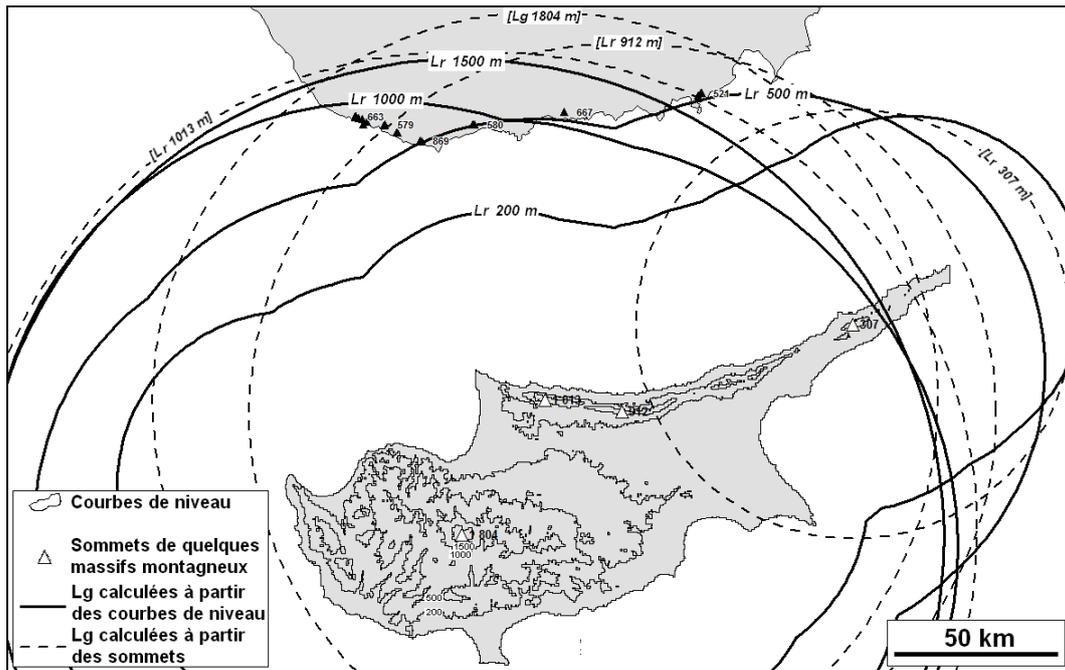


Figure 58 : les lignes d'horizon à partir de courbes de niveau et des sommets de Chypre.

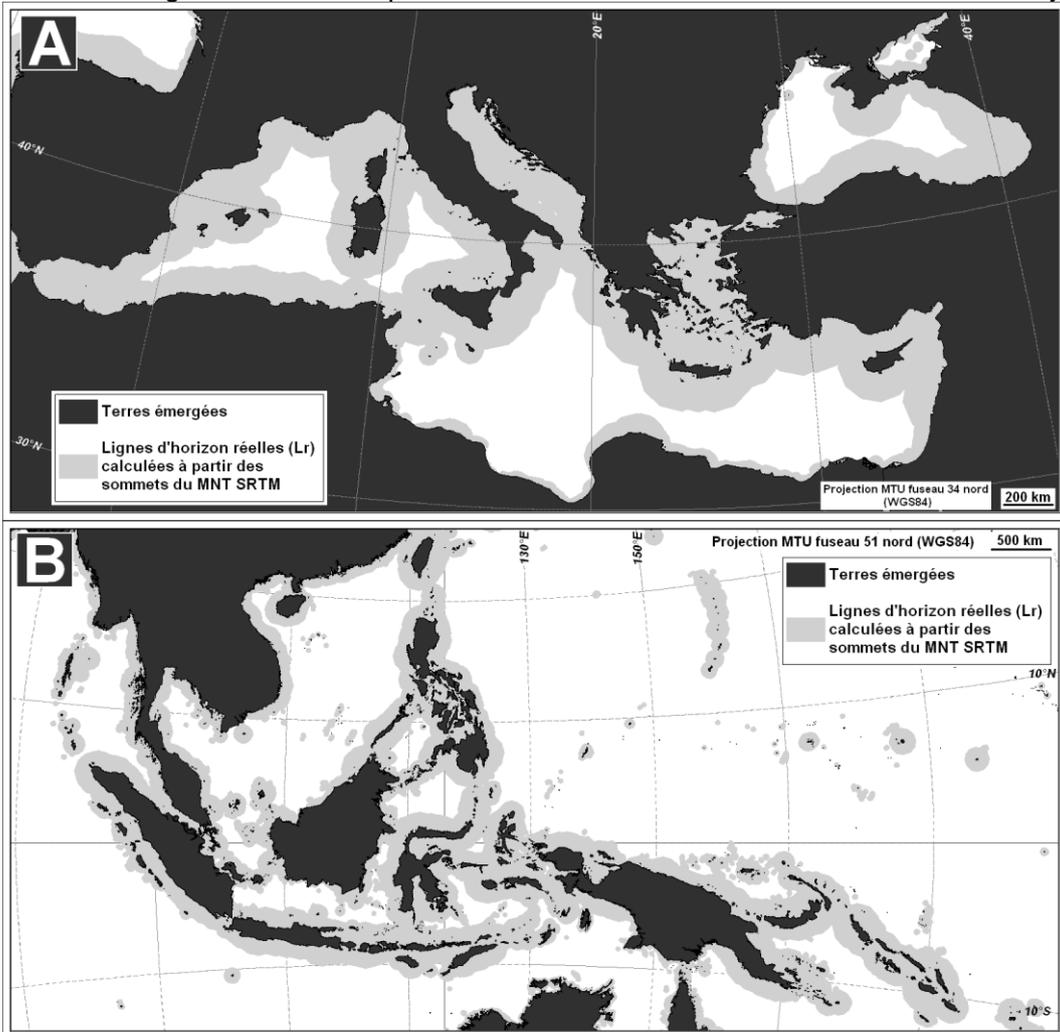


Figure 59 : Régionalisation du calcul des lignes d'horizon Lr à partir des sommets
 (A) Les continuum de visibilité et d'intervisibilité depuis les côtes des continents.
 (B) Idem depuis la péninsule indochinoise et la Chine jusqu'aux îles Salomon et l'Australie.

2.4. Hiérarchies et structures des archipels

D'un point de vue géostatistique, un archipel doit former un « *cluster* » d'îles proches entre elles par rapport à la distance qui les séparent des autres *clusters* de terres émergées²²⁵. Ainsi, les îles du Cap-Vert, les Galapagos, les Comores, les Fidji ou les Baléares appartiennent à cette catégorie. À l'inverse, certains groupements insulaires semblent être définis arbitrairement, comme le Dodécanèse ou les Cyclades en mer Égée, les Lofoten sur la côte norvégienne, les Philippines au sein de la Nusantarie, les Orcades et les Shetland au nord de l'Écosse, etc. Enfin, certaines configurations archipélagiques se révèlent globalement assez bien délimitées sauf sur une portion de leur territoire. Par exemple, l'île Sakhaline au nord de l'archipel nippon peut être considérée alternativement soit comme un prolongement géographique du mainland russe dont il est seulement séparé par le détroit de Tartarie, soit comme le prolongement naturel vers le nord des îles japonaises²²⁶. De fait à l'instar des Îles britanniques, la géographie des fragments insulaires l'archipel nippon pourra être perçue soit comme une péninsule continentale du fait de la faible largeur des détroits, soit comme un archipel incluant Sakhaline. De même pour le chapelet des îles Kouriles, il est difficile sans une analyse détaillée de l'assimiler plutôt à un prolongement du Kamchatka qu'à celui de l'île Hokkaïdo. Il en est de même pour les petites et Grandes Antilles par rapport à l'Amérique du Sud ou pour l'archipel britannique vis-à-vis de l'Europe. Le choix peut être fondé sur d'autres critères que la seule géométrie fragmentologique, et qu'il peut l'être sur la géologie, notamment la lithologie ou la tectonique par rapport aux plaques continentale ou océanique.

La même analyse peut s'appliquer *mutatis mutandis* aux masses continentales : est-ce que l'archipel Ancien Monde, Nouveau Monde et Australie fait sens au regard de leur fragmentologie périinsulaire? À l'échelle régionale, la Nouvelle-Zélande a un profil archipélagique avec ses trois grands fragments que sont l'Île du Nord, l'Île du Sud flanquée du triangle de l'île Stewart ; *a contrario*, Madagascar n'est jamais assimilé à un archipel du fait de la taille énorme de son mainland par rapport à son cortège microinsulaire. C'est à l'échelle macrocontinentale, celle des grands fragments de l'archipel monde, que le défi s'avère le plus délicat. Une remarque liminaire s'impose puisque la topologie de cette composition géographique des principales terres émergées est de nature sphérique alors qu'aux moindres échelles elle peut être assimilée à un plan. Considérées dans leur globalité, les terres émergées forment plus ou moins un continuum, la connexion se faisant soit par des détroits de faible largeur comme celui de Béring, soit par un pont insulaire tel que celui de la Nusantarie entre l'Asie et les terres sahariennes de la Nouvelle-Guinée, du mainland australien et de la Tasmanie pour lesquelles il existe une continuité en termes de visibilité. Au regard des processus historiques aussi bien que biologiques, il faut toutefois avoir à l'esprit que ce vaste domaine a fonctionné comme un ensemble fragmenté avec peu d'échanges entre les masses continentales jusqu'à une période récente en particulier pour les faits humains avant le grand désenclavement du XVI^e siècle. Il n'est pas inutile de rappeler que les relations entre les différents fragments de l'humanité étaient limitées voire inexistantes et se traduisaient par une méconnaissance partielle ou totale aussi bien aux échelles intercontinentales qu'intracontinentales comme par exemple entre les mondes chinois et européens. S'il y a bien eu continuum pour les migrations au cours de la préhistoire et du Paléolithique, elles ne sont pas traduites par des échanges constants et importants, sauf diffusion réduite au niveau des

²²⁵ *Cluster* peut se traduire par amas, agrégat, groupe.

²²⁶ La partie sud de Sakhaline a été sous domination japonaise de 1855 à 1875 sous le nom de Karafuto.

goulets d'étranglement géographique que sont la charnière Alaska-Sibérie orientale et la mosaïque insulaire de la Nusantarie.

Peut-on définir un critère d'archipélagie autrement dit de *clusters* de fragments émergés valable à toute échelle ? En considérant en premier ce qui relève de Dispersion-diffusion-migration (DDM) la visibilité et l'intervisibilité telles que définies ci-dessus font figure de modèles parce qu'elles sont adaptées aux processus de perception de l'environnement et de navigation pour les sociétés humaines. Pour les autres êtres vivants, la migration ne peut être volontaire que pour les oiseaux et les animaux terrestres capables de percevoir et d'interpréter la présence d'une terre à l'horizon comme étant un éventuel environnement favorable pour leur espèce. Sinon, il est probable que la dispersion se faisait le plus souvent de façon passive et aléatoire sans que la visibilité soit un facteur notable.

Une méthode géographique prenant en compte à la fois la distance de l'archipel par rapport aux autres terres les plus proches et les distances entre les îles elles-mêmes a l'avantage de se baser uniquement sur des mesures géométriques. Ces deux critères permettent d'évaluer l'importance des flux potentiels inter et intra-archipélagiques sans pour autant prendre en compte des facteurs aussi déterminants que la vitesse et la direction des courants atmosphérique et océanique ou les routes migratoires des oiseaux. Il s'agit d'une hypothèse *a minima* ayant un intérêt comparatif, sa pertinence fonctionnelle n'étant qu'approximative. Le calcul des polygones convexes déjà utilisée pour définir les eaux intra-insulaires à l'échelle d'une île (voir Figure 48) peut être mis à contribution pour établir les eaux intra-archipélagiques. L'établissement de *buffers* de 200 milles marins²²⁷ à partir des enveloppes ceinturant les archipels permet de quantifier et de comparer l'importance des terres voisines, par exemple sur les deux archipels des Canaries et des Comores (Figure 60A). Ainsi, en considérant le pourcentage des terres situées dans les *buffers* de 200 milles marins, il apparaît que les Canaries sont plus proche du mainland africain (14,6 %) que ne le sont les Comores par rapport aux deux mainlands de l'Afrique et de Madagascar (7,1 %). Toutes choses égales par ailleurs, les flux d'échanges entre les Canaries et le mainland voisin devraient être plus faciles et fréquents que pour les Comores. Cela expliquerait en partie que le premier archipel ait été peuplé dès 1000 av. JC par les Guanches alors que le second ne le fut qu'au début de l'ère chrétienne par des populations venues des côtes africaines.

Cette analyse d'ensemble des archipels par rapport à leur contexte géographique se doit d'être complétée par l'examen de leur structure insulaire interne. Dans ce but, la méthode des graphes avec une pondération de type gravitationnel sera supposée refléter les interrelations entre les fragments insulaires constitutifs d'un archipel (Depraetere & Dahl, 2007, pp. 89-90) notamment en termes de navigation d'une terre à une autre (Doumenge, 1966). Par analogie avec la loi newtonienne de la gravitation, les superficies des îles seront assimilées à des masses et les distances inter-îles seront calculées en fonction des centroïdes. L'indice « gravitationnel » Ig entre deux îles (i et j) se définit comme suit :

$$[12] Ig_{ij} = (S_i \cdot S_j) / D_{ij}^2 \text{ avec } i \text{ et } j \text{ deux fragments insulaires, } S \text{ en km}^2, D \text{ en km.}$$

En fonction de l'application envisagée et des données de calage éventuellement disponibles, il est possible de modifier la formulation de plusieurs façons : changer les paramètres, et notamment la puissance appliquée aux distances, utiliser une autre variable

²²⁷ 200 milles marins = 371 km.

que la superficie ou modifier le mode de calcul des distances entre les fragments²²⁸. En établissant les indices Ig pour tous les couples de fragments, il devient possible de hiérarchiser les relations de voisinage considérées deux à deux. Dans le cas des Canaries, la valeur la plus forte est obtenue entre les îles de Grande Canarie et de Ténérife dans la partie centrale de l'archipel, suivie par celle entre Fuerteventura et Lanzarote dans sa partie orientale (voir carte et tableau de la Figure 60B). On notera que les résultats auraient été différents si la distance retenue avait été celle de la largeur des chenaux marins séparant les îles. Partant des indices calculés deux à deux, un indice gravitationnel synthétique (Igs) peut-être établi pour chaque fragment (i) en faisant la somme de tous les Ig avec les n autres îles :

$$[13] Igs_i = \sum_{j=1 \text{ à } n} Ig_{ij} = S_i \cdot \sum_{j=1 \text{ à } n} S_j/D_{ij}^2$$

Comme indiqué ci-dessus, la surface de l'île i (S_i) peut être mise en facteur en permettant de ne considérer que l'effet propre des îles voisines ($\sum_{j=1 \text{ à } n} S_j/D_{ij}^2$) indépendamment de la superficie de l'île considérée. Un indice d'isolement $Iiso$ sera défini de la façon suivante :

$$[14] Iiso_i = S_i / \sum_{j=1 \text{ à } n} Ig_{ij} = S_i / (S_i \cdot \sum_{j=1 \text{ à } n} S_j/D_{ij}^2) = 1 / (\sum_{j=1 \text{ à } n} S_j/D_{ij}^2)$$

En appliquant cet indice à l'ensemble des fragments insulaires, il apparaît que les îles de Palma ($Iiso = 4,27$), Ferro (4,2) et Fuerteventura (4,15) sont bien plus isolées sur les marges orientales et occidentales de l'archipel que ne l'est Gomera (1,61) qui se situe au milieu du triangle insulaire formé par Ferro, Palma et Ténérife (Figure 60C). Les fragments insulaires de moins de 100 km² se distinguent des grandes îles par leur faible indice d'isolement. Deux raisons expliquent ce résultat insolite. La première s'avère d'ordre géographique puisque la plupart d'entre eux sont proches d'une grande île (Isleta del Rio liso = 0,1) à l'exception d'Alegranza (liso = 1,34) et du Roque del Este (1,24). La seconde tient au mode de calcul de l'indice qui dépend de la somme des superficies autres que celle du fragment considéré si bien que plus il sera petit plus il sera soumis à l'« attraction » d'une « masse » (alias superficie) cumulée plus importante.

Le même principe s'applique aux terres situées en dehors de l'archipel pour peu qu'elles soient suffisamment petites. Ainsi l'attraction exercée par les îles Selvagens au nord des Canaries ne pose aucun problème ; en revanche, évaluer celle du mainland africain à l'est suppose quelques réflexions sur la méthodologie de calcul de l'indice gravitationnel. Si la masse considérée est celle de la superficie de l'Afrique voire de l'ensemble de l'Ancien Monde, il sera patent que les îles Canaries seront fortement attirées dans l'orbite de cette immense terre continentale. Pour les mesures de distance, l'utilisation des centroïdes ou du barycentre d'une telle étendue n'a guère de sens alors que le critère pertinent est celui de la distance à la côte continentale la plus proche. Un choix peut être fait de ne considérer que la partie du continent située à moins d'une certaine distance, par exemple 200 milles marins, bien que ce choix ne soit pas satisfaisant dans le cas des îles ou archipels situés au-delà de cette distance seuil. Ce problème de pondération se retrouve à toutes les échelles lorsqu'il s'agit d'évaluer l'attractivité d'un mainland par rapport à ses terres environnantes. Une solution serait de parvenir à définir une distance seuil variant en fonction de l'échelle des îles et archipels

²²⁸ La formule générale à 3 paramètres est de type $Ig_{ij} = a \cdot (M_i \cdot M_j)^b / D_{ij}^c$; la formule newtonienne n'est donc qu'un cas particulier tel que $a = 1$, $b = 1$ et $c = 2$. Les « masses » M_i et M_j peuvent faire références à des populations, des données économiques, des services, des biodiversités, etc. Les distances D_{ij} peuvent être établies à partir des centroïdes, des barycentres ou des points les plus proches des deux fragments.

considérées. Toutefois parvenir à un tel objectif valable à toutes les échelles reste une gageure tant sont variées les relations de proximité pertinentes quelle que soit la configuration des fragments émergés.

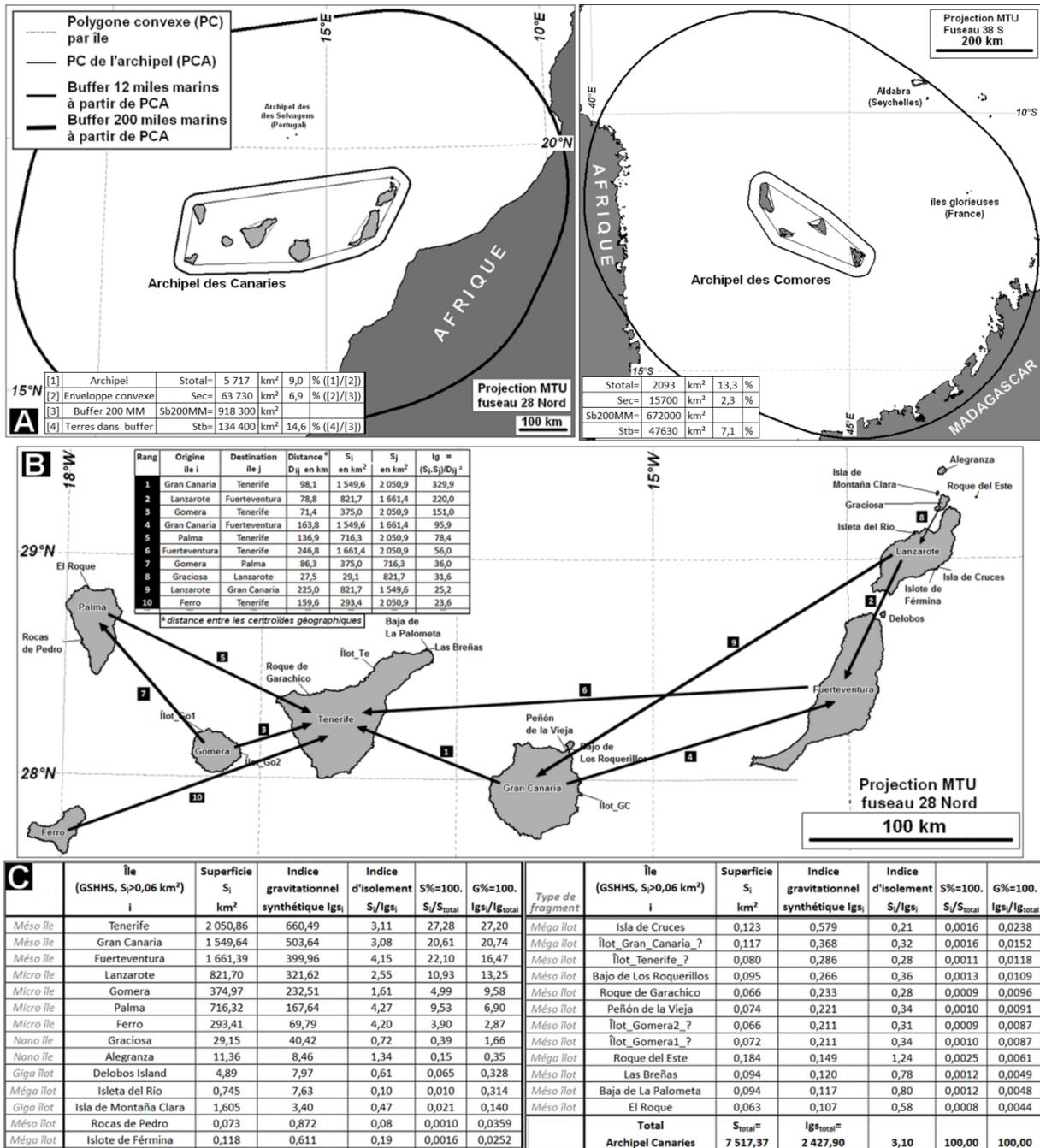


Figure 60 : Analyse du voisinage et de la structure d'archipels.

- (A) Comparaison géographique entre les archipels des Canaries et des Comores en fonction des polygones convexes et de leur *buffer* de 200 milles marins de leur ZEE.
- (B) Un modèle gravitationnel quantifiant les relations deux à deux entre les îles canariennes.
- (C) Indice gravitationnel synthétique par île pour les Canaries.

Concernant les structures archipélagiques, il convient de définir une hiérarchie basée sur la superficie relative des fragments insulaires qui les composent. Pour ce faire, la méthode du classement des îles par rang de taille (*size ranking*) s'avère à la fois simple et pertinente. Il suffit de faire le rapport des surfaces prises deux à deux par ordre décroissant ; l'indice

hiérarchique (Ih) au sens des rapports de surface aura une valeur supérieure ou égale à 1. Sur l'exemple de l'archipel des Canaries de la Figure 61A, l'indice hiérarchique de rang 2 consiste à diviser la superficie de l'île de rang 1 (Ténérife) avec celle de rang 2 (Fuerteventura) soit $Ih_2 = S_1/S_2 = 2\,051/1\,661 = 1,23^{229}$; afin de distinguer les « grands » fragments des « petits », il suffit de déterminer l' Ih ayant la valeur la plus élevée, soit le rapport entre les îles de Ferro et de Graciosa avec $Ih_8 = 10,1$. Cela signifie que l'archipel est composé de huit « grandes îles » (méso et micro-îles) de magnitude bien supérieure à leur cortège de nano-îles (Graciosa et Alegranza) et îlots (giga, méga et micro). Cette méthode de hiérarchisation à la fois simple et objective permet de différencier deux classes d'îles pouvant éventuellement être mises en relation avec des caractéristiques morphotectoniques expliquant leurs différences de taille (Depraetere C. , 1991).

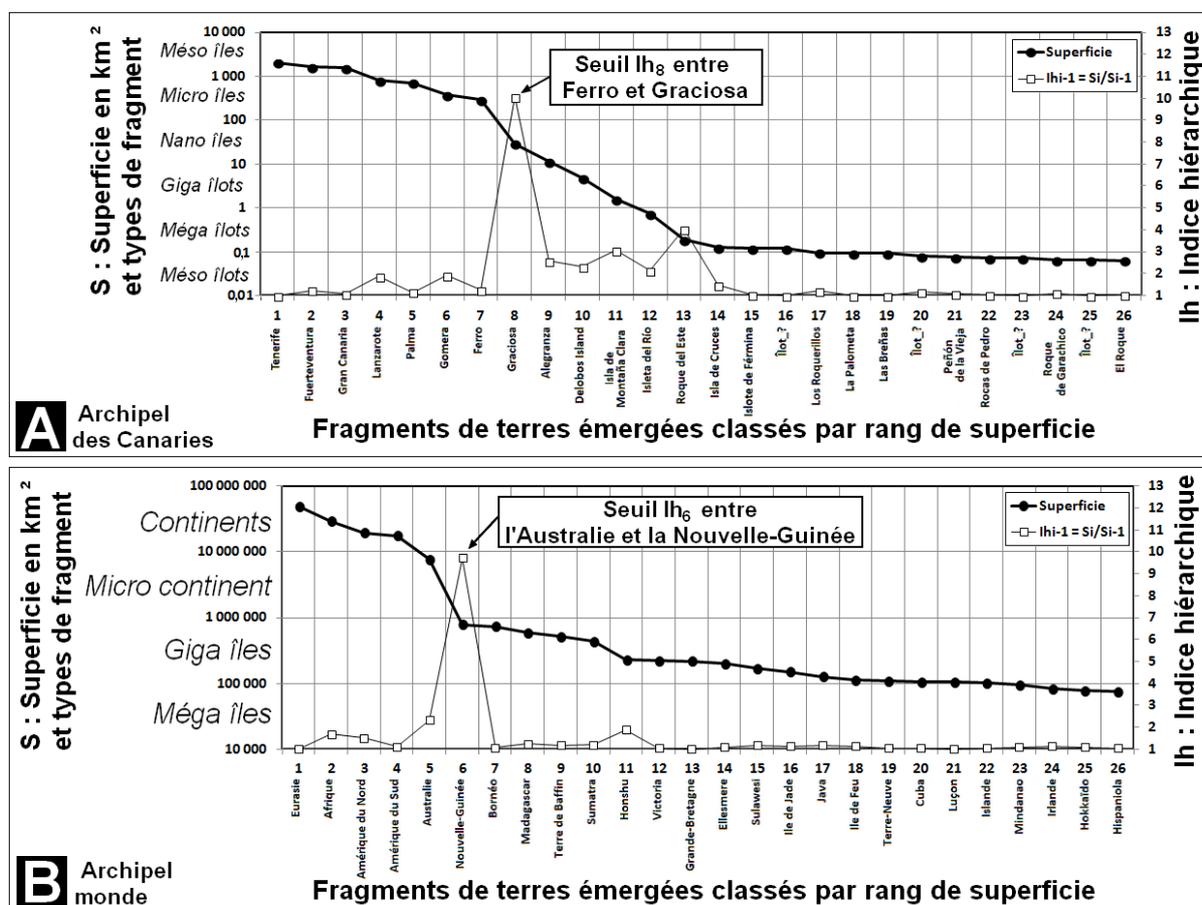


Figure 61 : Indices hiérarchiques par archipels à diverses échelles.

- (A) Les fragments « principaux » de l'archipel des Canaries sont les sept plus grandes îles de rang 1 à 7 en-deçà du seuil maximum de valeur hiérarchique Ih_8 entre Ferro et Graciosa.
 (B) Les fragments « principaux » de l'archipel monde sont les cinq terres continentales en-deçà du seuil maximum de valeur hiérarchique Ih_6 entre l'Australie et la Nouvelle-Guinée.

À l'échelle de l'archipel monde, on obtient un seuil maximum entre le 5^e et le 6^e fragment tel que $Ih_6 = 9,7$ entre le microcontinent du mainland australien et celui de la giga-île la plus grande à savoir la Nouvelle-Guinée (Figure 61B). Comme dans le cas des Canaries, l' Ih maximum (Ih_{max}) correspond à une différence de l'ordre d'une magnitude entre les grands

²²⁹ L' Ih de rang 1 ne peut être calculé puisqu'il n'y a pas de fragments de rang 0.

fragments (alias mainlands) et leur cortège de fragments sensiblement plus petits. En plus de déterminer deux classes de fragments, le critère de l' lh_{max} permet de quantifier leur contraste en matière de taille. Nous verrons que l' lh_{max} est un moyen efficace de distinguer des archipels fortement hiérarchisés avec saut de magnitude ($lh_{max} \geq 10$) comme dans le cas des Canaries et de l'archipel monde avec ceux faiblement hiérarchisés avec $lh_{max} \rightarrow 1$. Enfin, cette méthode s'apparente à celle de Korčák puisque les indices hiérarchiques sont une mesure de la « pente hiérarchique » entre les couples de fragments tout comme l'exposant de Korčák est une estimation de la même pente calibrée sur l'ensemble de l'échantillonnage de superficie²³⁰.

2.5. Typologie des îles péricontinentales et océaniques

Après avoir établi divers critères permettant d'analyser les structures archipélagiques, il apparaît nécessaire de définir des méthodes s'appliquant à des espaces insulaires quelconques. L'objectif étant de disposer d'une méthode aussi large que possible pour déterminer la structure des fragments insulaires et les règles de voisinage à leur appliquer, il apparaît préférable de faire référence à un critère simple de distance autour des côtes, qu'elles soient continentales ou insulaires. Cependant, il n'existe pas de loi universelle permettant de définir une valeur seuil objective tant sont variables les mécanismes de dispersion propre à chaque espèce et chaque milieu. Un choix géomorphologique et non géométrique pourrait être basé sur le fait que les îles se situent sur le plateau continental mais il ne correspond pas à une notion de proximité entre les fragments émergés et ne peut s'appliquer à des structures qui en sont dépourvues. Force est donc d'arrêter un seuil arbitraire de voisinage, ce qui revient à définir *a priori* des *buffers* autour des terres émergées ; les *buffers* (« tampons » en Français) correspondent à l'opération de dilatation de la morphologie mathématique conceptualisée par Serra et Matheron puis développée au Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau à partir de 1967.

Deux définitions serviront de base de réflexion : les Eaux territoriales (ET) de 12 milles marins (22,2 km), ZEE de 200 milles marins (370 km), chacune de ces zones pouvant être mise en relation avec des distances de lignes d'horizon Lr (voir ci-devant). Les ZEE s'étendent sur de vastes étendues autour des côtes et des îlots de haute mer : celles de Clipperton, Saint-Paul et Amsterdam, et Sainte-Hélène sont de l'ordre celle de la France. Les *buffers* correspondant sont davantage adaptés à une analyse des voisinages insulaires en matière de cabotage comme nous le verrons dans le prochain paragraphe.

Les insularistes distinguent en général au moins les îles péricontinentales des îles océanes (Verluisé & Dumont, 2016). Nous ne dérogerons pas à cet usage, tout en essayant d'établir une classification sur des critères précis de proximité ou d'éloignement par rapport aux côtes continentales ou à un mainland, fût-il insulaire (Depraetere & Dahl, 2007, pp. 71-78). Le *buffer ET* retenu offre la possibilité de définir un glacis insulaire formé par les fragments se trouvant tout ou partie dans cette zone. Partant de ces îles péricontinentales (IP) de premier ordre (ou de type α), un second type de péricontinentalité est établie lorsque les *buffers ET* des fragments du premier touchent d'autres îles plus au large et ainsi de proche en proche.

²³⁰ Les structures archipélagiques ou insulaires faiblement hiérarchisées au sens des lh seront plus adaptées à l'établissement d'une fonction de distribution statistiquement satisfaisante puisque cela se traduit par l'absence de classes manquantes de fragments dans l'échantillonnage des superficies.

Ces fragments seront définis comme des terres péricontinentales de deuxième ordre (ou de type β). Les îles localisées au-delà de ce voisinage seront classées comme océaniques (IO). Là encore, distinction peut être faite entre d'une part les fragments situés à moins de 200 milles marins des côtes continentales (type α) ou de celles des îles péricontinentales et d'autre part ceux localisés au-delà de ce seuil hauturier (type β). La Figure 62A résume les différents cas possibles de relation topologique avec le continent. Une analogie avec la percolation de l'eau dans un sol est possible comme illustrée en Figure 62B ; pour nos « îles », la driving force est l'appel du large (ou de la pêche), pour la colonne de sol c'est la gravité. ???

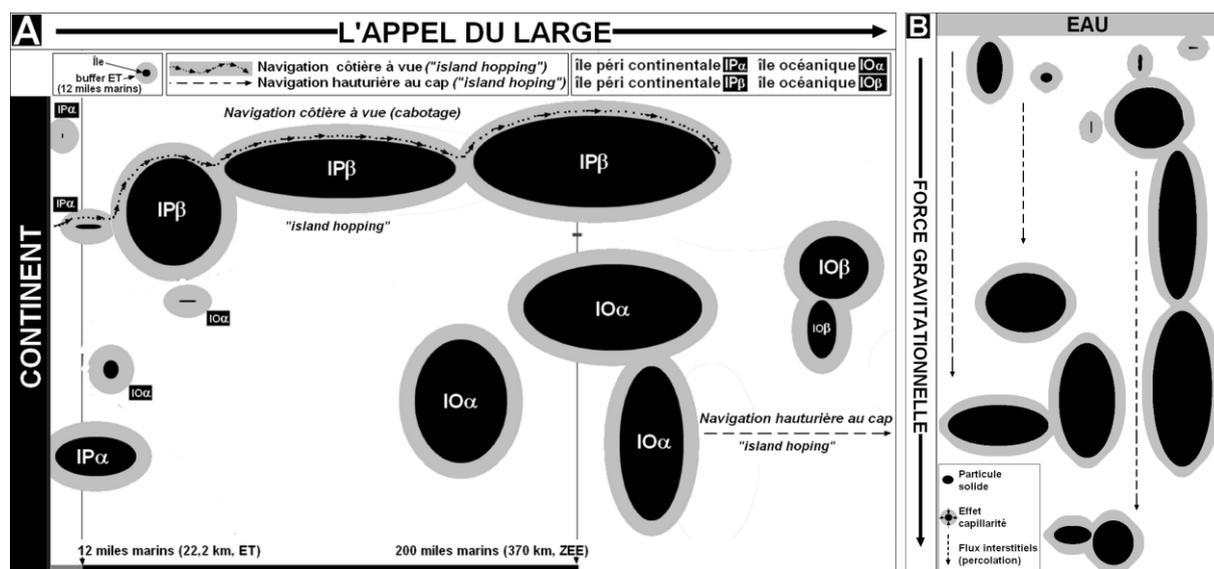


Figure 62 : (A) Schéma topologique des flux de navigation depuis le continent avec typologie des îles péricontinentales et océaniques (α ou β)
(B) Analogie avec la percolation de l'eau dans un sol

Nous évoquerons la « fluidité » des flux de navigation côtière et hauturière sur quelques régions insulaires avec le distinguo entre les processus de « *island hopping* » et « *island hoping* » (Voir précédemment et Depraetere & Dahl, 2007, pp. 87-92). En Figure 63A, l'articulation maritime entre l'Australie et les îles Salomon (IO β) se fait via les petites îles du Détroit de Torres (IP β), les côtes de la Nouvelle-Guinée (IP β), l'archipel Bismarck (Nouvelle-Bretagne IO α et Nouvelle-Irlande IO β) et Bougainville (IO β) (Figure 63A). Dans la Figure 63B, la diffusion depuis la côte marocaine vers les îles Canaries est assurée via le groupe de Fuerteventura (IO α), la Grande Canarie (IO α), le groupe de Ténérife (IO α) et enfin Ferro (IO α) et la Palma (IO β) (Figure 63B). Sur la Figure 63C, le traversée depuis la côte mozambicaine vers Madagascar passe par l'archipel des îles relais des Comores (Grande Comore IO α , Mohéli IO α , Anjouan IO α , Mayotte IO β). La Figure 63C montre la configuration des routes maritimes depuis la côte vénézuélienne jusqu'aux îles Charnière (IO β) via Trinidad (IP α) et Tobacco (IP β) puis le chapelet des Petites Antilles (Grenade IO α , Saint-Vincent IO α , Sainte-Lucie IO α , Martinique IO α , la Dominique IO β et la Guadeloupe IO β) (Figure 63D). Chacune des régions insulaires ci-dessus compose une trame spécifique de possibilité de navigation côtière avec des espacements variables nécessitant une navigation hauturière avec possibilité d'avoir des points d'amer sur l'horizon pour peu que les îles soient montagneuses (Voir visibilité et intervisibilité en Figure 56, Figure 57 et Figure 58). Ces quelques analyses des relations continents-îles ont un rapport avec les phénomènes de dispersion, de diffusion et de migration (DDM) en particulier pour les peuples navigateurs comme cela sera évoqué ultérieurement dans la partie géohistoire du document.

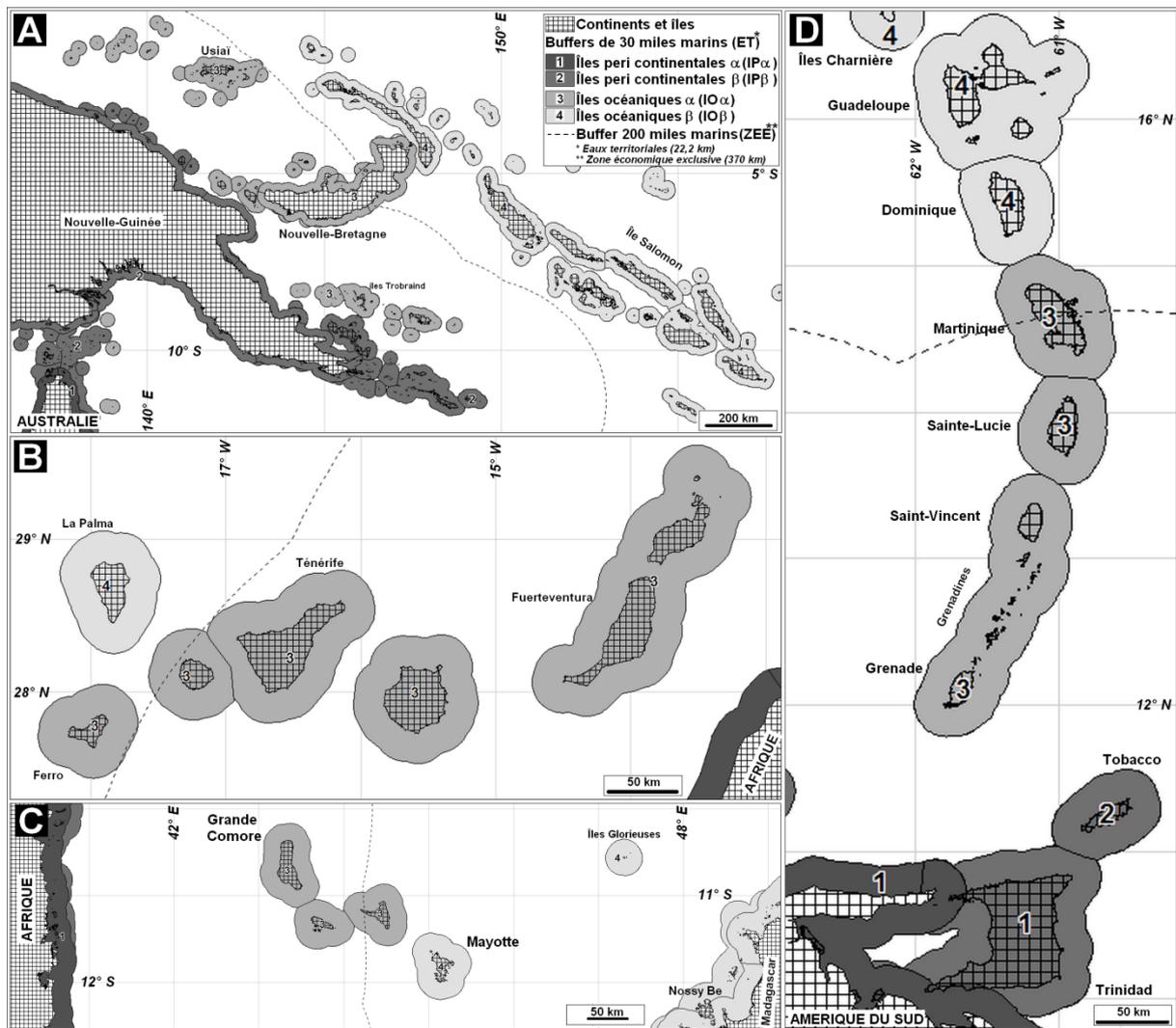


Figure 63: Exemples de typologie des îles péricontinentales (IP) et océaniques (IO)
 (A) Connexions entre l'Australie, la Nouvelle-Guinée, l'archipel Bismarck et les îles Salomon.
 (B) Les Canaries au large du Maroc.(C) Les Comores entre le Mozambique et Madagascar.
 (D) Configuration depuis la côte vénézuélienne les Petites Antilles via Trinidad et Tobacco.

Plus généralement à l'échelle de l'archipel monde, les surfaces élémentaires constituant cette mosaïque de *buffers* autour des terres émergées se définit selon deux modes. Le premier est constitué de tronçons de ruban d'une longueur d'environ 400 km pour une largeur du même ordre que celle des Eaux territoriales, soit des superficies de l'ordre de 9 000 km²³¹. Ces « rubanoïdes » permettent de segmenter et donc de régionaliser les *buffers* côtiers des continents (*IP α*) et des principales îles de plus de 10 000 km² (*IP α* , *IP β* , *IO α* , ou *IO β*). Le second mode consiste simplement à établir un *buffer* autour des fragments insulaires qui peuvent être plus ou moins « clustérisés » en groupe ou archipel. La superficie de chaque élément est variable en fonction de la structure géographique de ces agrégats insulaires. Un cas particulier est celui des îlots de petite taille totalement isolés puisque la surface de leur *buffer* de 12 milles marins sera de 1550 km², ce qui est le cas pour Rockall dans l'Atlantique, Sala-y-Gomez dans le Pacifique, Tromelin dans l'océan Indien, l'île Isla Aves (*Birds Island*)

²³¹ La superficie des « rubanoïdes » des *buffers* ET est de l'ordre 2 700 000 km² et peut être défini comme la zone de cabotage le long des côtes continentales et insulaires.

dans la Caraïbe, Alboran en Méditerranée, l'île Zeberjed en mer Rouge, Abu Nu'Air dans le golfe arabo-persique, l'île de l'Ours dans l'Arctique et l'île Scott dans les eaux antarctiques. Pour ces *buffers* relatifs à des archipels ou des îles plus ou moins jointifs ou déconnectés de leurs voisins, leur superficie moyenne est de 4 633 km²³². En incluant les deux types de *buffers*, on obtient une mosaïque de l'ensemble des espaces insulaires comportant 1962 éléments ayant en moyenne une superficie de 5341 km², soit 10,5 millions de km²³³.

2.6. Les densités insulaires

La notion de « densité insulaire » fait le rapport entre les caractéristiques fragmentologiques des terres émergées et les surfaces océaniques les « entourant de toutes parts ». Cette approche a été peu explorée dans la littérature scientifique faute de données facilement exploitables, homogènes et couvrant de larges espaces insulaires (Depraetere & Dahl, 2007, pp. 89-90 ; Depraetere C. , 2008a, pp. 5-8).

C'est à partir des rubanoïdes et des *buffers* décrits dans le chapitre précédent que vont être calculées les densités insulaires. Elles le seront en fonction du nombre (N_i), de leur surface cumulée (S_i) et la surface maritime du *buffer* (S_b) pour chacun de ces éléments ainsi que la surface totale (S_t) telle que $S_t = S_i + S_b$. Rappelons que N_i et S_i font référence à des fragments de plus de 0,06 km² identifiés à partir des données venant des données GSHHG²³⁴. Quelques îles inférieures à ce seuil seront comptabilisées lorsqu'elles forment à elles seules un *buffer* indépendant des îles plus grandes²³⁵. Distinction sera faite entre la densité absolue D_i prenant en compte la surface des îles et une densité relative D_{i2} ne considérant que la partie maritime du rubanoïde ou du *buffer* entourant le ou les fragments émergés. Elles seront exprimées en nombre d'îles pour 10 000 km², soit un carré de 100 par 100 km correspondant à peu près à la superficie d'un degré carré au niveau de l'équateur. Ces densités sont calculées selon les formulations suivantes :

$$[15] \text{ Densité absolue : } D_i = 10000 \cdot N_i / (S_b + S_i)$$

$$[16] \text{ Densité relative : } D_{i2} = 10000 \cdot N_i / S_b$$

N_i nombre d'îles, S_i superficie km², S_b superficie km² du *buffer* de 12 miles marins
(NB : variantes des formules [5] et [6])

La première méthode de calcul de densité D_i est davantage assimilable à la notion de « paysage insulaire » alors que la seconde D_{i2} ne fait référence qu'à la fréquence des îles ramenée à la surface marine, ce qui donne une estimation de la largeur des chenaux marins interinsulaires lorsque les fragments émergés sont régulièrement dispersés (Depraetere C., 2008a, p. 4). Le détail de la méthode de calcul des densités en fonction des types d'îles IO et IP est décrit en annexe 4 avec cartes sur l'ensemble de l'archipel monde.

On s'intéressera en premier lieu aux terres situées dans le *buffer* Eaux territoriales (ET) à la périphérie des fragments continentaux y compris l'Antarctique et le Groenland. Les densités pour ces îles péricontinentales d'ordre 1 ($IP\alpha$) présentent de forts contrastes en

²³² Ce mosaïquage des terres insulaires $IP\alpha$, $IO\alpha$ et $IO\beta$ représente 1 669 *buffers* dont la superficie est comprise entre 92 et 52 765 km² pour une superficie des S_t (*buffers* maritimes et terres émergées) cumulée de 7 733 161 km².

²³³ Pour avoir le total des espaces insulaires et archipélagiques, il faut y ajouter les *buffers* EA des îles péricontinentales α dépassant le *buffer* EA de la zone α des continents (765 éléments totalisant 271 797 km²) et la superficie des îles de plus de 10 000 km² (6 433 893 km²) non comptabilisées dans leurs rubanoïdes, soit un total global de 17 184 306 km².

²³⁴ Op. Cit Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography (Wessel & Smith, 1996).

²³⁵ Île Scott en Antarctique (4 hectares, découverte en 1902), Rockall (2 hectares) dans l'Atlantique, Isla de Aves dans la Caraïbe (1,25 hectare), Kolbeinsey au nord de l'Islande (1250 m²) et Roca Partida dans le Pacifique nord (1000 m²).

fonction du continent considéré comme le démontre le tableau de la Figure 64A. Les côtes européennes sont de loin les plus insularisées avec une densité relative $Di2$ de 267 fragments/10 000km² ($Di = 253$ f/10⁴km²). À l'inverse, l'Antarctique se singularise par des faibles densités, sachant que cette valeur reflète en partie le sous-échantillonnage des îles géoréférencées dans les données GSHHG. Ce problème de biais d'échantillonnage ne se pose pas pour l'Afrique où effectivement la densité est très faible avec seulement 30 f/10⁴km² (idem pour $Di = 30$ f/10⁴km²). En prenant la valeur de référence de la moyenne de la densité relative pour l'archipel monde, soit $Di2 = 139$ f/10⁴km², il est possible de distinguer les littoraux continentaux « hyperinsularisés » (Europe $Di = 267$, Groenland 223, Amérique du Nord 162) de ceux « hypo-insularisés » (Amérique du Sud 73, Australie 70, Afrique 30). Globalement les côtes continentales de l'hémisphère nord sont plus insularisées que celles du sud. Pour les densités absolues (Di), elles sont par définition moins élevées que les densités relatives ($Di2$) mais dans une faible proportion (~ 6%) et de façon assez homogène (de 0 à 10 %) à l'échelle de l'archipel monde. Seule la densité relative $Di2$ sera évoquée par la suite.

Après avoir comparé les densités des îles péricontinentales α ($IP\alpha$) par continent, les autres types d'îles seront considérées à l'échelle de l'ensemble de l'archipel monde (Figure 64B). Toutes îles confondues, la densité moyenne est de 78 f/10⁴km². Les espaces péricontinentaux sont plus denses ($Di2(IP) = 95$ f/10⁴km²) que leurs pendants océaniques ($Di2(IO) = 43$), ainsi que les $IP\alpha$ ($Di2(IP\alpha) = 108$) par rapport aux $IP\beta$ ($Di2(IP\beta) = 75$). Cette différence s'explique en partie par le mode de définition des *buffers* ET qui sont utilisés pour différents types d'îles. Pour mémoire, ceux établis sur le pourtour des continents et des grandes îles de plus de 10 000 km² sont des tronçons de ruban alors que pour tous les autres il s'agit d'une gangue périinsulaire ou périarchipelagique. Il faut donc distinguer, en les nuanciant, les contrastes de densité entre les périphéries des « grandes terres » (continents et îles de plus de 10 000 km²) et les autres domaines insulaires. Il apparaît que la densité insulaire moyenne des rubanoïdes des premières est de 94 f/10⁴km² pour seulement 59 pour les seconds, soit un rapport de 1,59. Il demeure néanmoins probable que cette différence procède également d'une plus grande densité de la périphérie de ces grandes terres du fait qu'elles comportent le plus souvent un plateau continental d'où émergent de nombreuses îles, ce qui n'est pas le cas notamment pour les îles et archipels volcaniques. Quelques archipels océaniques disposent cependant d'un vaste domaine continental sous-marin, comme les Seychelles et les Kerguelen.

La distribution statistique des densités dans la Figure 65A montre un pic vers 7 fragments/10 000 km² qui correspond aux petites îles éloignées de ses voisines (exemple de Tromelin) en définissant un *buffer* d'environ 1 550 km². Dans le cas d'un petit archipel lui aussi isolé (exemple des îles Bounty à l'est de la Nouvelle-Zélande), le *buffer* aura approximativement la même taille mais la densité sera supérieure à 7. En revanche, une grande île solitaire (telle que la Réunion) sera associée à un *buffer* plus étendu mais ne contenant qu'une seule île, ayant pour effet d'établir une densité qui sera inférieure à 7. Dans les faits, de nombreuses îles volcaniques océaniques suffisamment espacées l'une de l'autre au sens des *buffers* (environ 2 x 12 milles marins soit 44,5 km) ont des densités comprises dans une fourchette assez étroite qui va de 5 à 10. En comparant les densités des cas extrêmes des rubanoïdes jouxtant les continents et des grandes îles ($IP\alpha$) et les îles océanes du grand large ($IP\beta$), il apparaît que les espaces péricontinentaux présentent une fréquence plus marquée des fortes densités supérieures à 40 f/10000 km² que les espaces océaniques lointains (Figure 65B). Le pic de densité en deçà de 8 est clairement observable pour les îles océanes alors qu'il est totalement absent pour les périphéries continentales. Des différences entre les continents apparaissent bien nettes si l'on compare les bandes côtières de

rubanoïdes ($IP\alpha$) de l'Europe et de l'Afrique (Figure 65C). La première présente de nombreuses côtes fortement insularisées avec des densités dépassant 20 et même 200 f/10⁶km² alors que la seconde est surtout marquée par des densités inférieures à 7 voire nulle en de nombreux point de la côte²³⁶.

Par définition, les *buffers* insulaires comptent au moins une île et donc une densité non nulle alors que ce peut être le cas pour certains rubanoïdes continentaux et les grandes îles. Les côtes sans aucune île couvrent des bandes côtières de 16 000 km et sont généralement peu ou pas indentées avec comme exemples emblématiques le littoral bas sur l'horizon, sableux et semi-désertique du golfe de Syrte en Lybie ou les hautes falaises de la plaine de Nullarbor dominant l'ample Grande baie australienne (Figure 66). Voilà pour les faibles densités. Pour les densités les plus fortes dépassant 1 000 îles pour 10 000 km², elles s'observent entre 56°N et 66°N en mer Baltique, sur la côte norvégienne au niveau des Lofoten et sur la côte sud-ouest de la Terre de Baffin. Les autres littoraux comportant des fjords avec des effets de surrection liés au Rebond isostatique post glaciaire (RIPG) présentent fréquemment des densités supérieures à 500 : toutes les rives septentrionales de la Baltique, tout l'ouest de la Norvège, le sud-ouest du Groenland, diverses bandes côtières du Canada et du nord-est des États-Unis mais aussi les côtes de Colombie-Britannique, la Patagonie chilienne et l'ouest de la Terre de Feu. Quatre régions ont des densités du même ordre dans des contextes morphotectoniques différents : les bancs alluviaux à l'embouchure de la Léna dans le nord de la Sibérie, les nombreuses îles et îlots émergeant du plateau continental au sud-ouest de la Corée, le karst ennoyé de la Baie d'Along au Vietnam et les bandes d'îlots coralliens du nord de Cuba. Parmi les îles océanes, des densités comprises entre 50 et 100 sont associées aux atolls (Touamotou, Micronésie, Maldives, ...) et sur la microplaque formée de trapps basaltiques festonnés par de nombreux fjords de Kerguelen²³⁷.

A Densités insulaires par continent pour les îles péri continentales α ($IP\alpha$)						
Code	Continent	Superficie totale St en km ²	Nombre d'îles Ni	Superficie des îles Si en km ²	Densité des îles Di= 10000.Ni/St	Densité des îles Di2= 10000.Ni/(St-Si)
1	Asie	1 295 206	9 910	39 190	77	79
2	Europe	615 724	15 554	32 168	253	267
3	Afrique	661 731	1 990	6 066	30	30
4	Amérique du Nord	1 062 625	16 565	42 392	156	162
5	Amérique du Sud	619 812	4 306	33 864	69	73
6	Antarctique	547 339	465	3 585	8	9
7	Australie	415 859	2 837	8 403	68	70
8	Groenland	282 757	5 681	28 151	201	223
1 et 2	Eurasie	698 616	8 518	36 554	122	129
1, 2 et 3	Ancien monde	981 373	14 199	64 705	145	155
4 et 5	Nouveau monde	1 679 989	22 717	101 259	135	144
1 à 8	Archipel monde	4 262 547	55 421	264 532	130	139
2 à 5 et 7	Archipel monde 2	1 883 942	24 186	126 719	128	138

B Densités insulaires par type d'île pour l'ensemble de l'archipel monde						
Code	Type des îles	Nombre d'îles Ni	Superficie des îles Si en km ²	Superficie totale St en km ²	Densité des îles Di= 10000.Ni/St	Densité des îles Di2= 10000.Ni/(St-Si)
1	péri continentale IP α	66 859	222 172	6 418 323	104	108
2	péri continentale IP β	29 298	647 010	4 532 913	65	75
3	océanique IO α	8 612	181 655	1 962 742	44	48
4	océanique IO β	12 222	273 882	3 372 500	36	39
1 et 2	péri continentale IP	96 157	869 182	10 951 236	88	95
3 et 4	océanique IO	20 834	455 537	5 335 242	39	43
1 à 4	Archipel monde (IP et IO)	116 991	1 324 719	16 286 478	72	78

Figure 64 : Densités insulaires en fonction du type d'île et des continents.
 (A) Densités insulaires pour les îles péricontinentales α ($IP\alpha$) par continent.
 (B) Densités des îles péricontinentales (IP) et océaniques (IO) de type pouvant être de

²³⁶ Ces observations générales seront reprises en détail sur des exemples dans le chapitre suivant.

²³⁷ Un atlas détaillé des densités de l'ensemble de l'archipel monde est joint en annexe 5.

premier ordre (α) ou de second ordre (β) (soit $IP\alpha$, $IP\beta$, $IO\alpha$ et $IO\beta$).

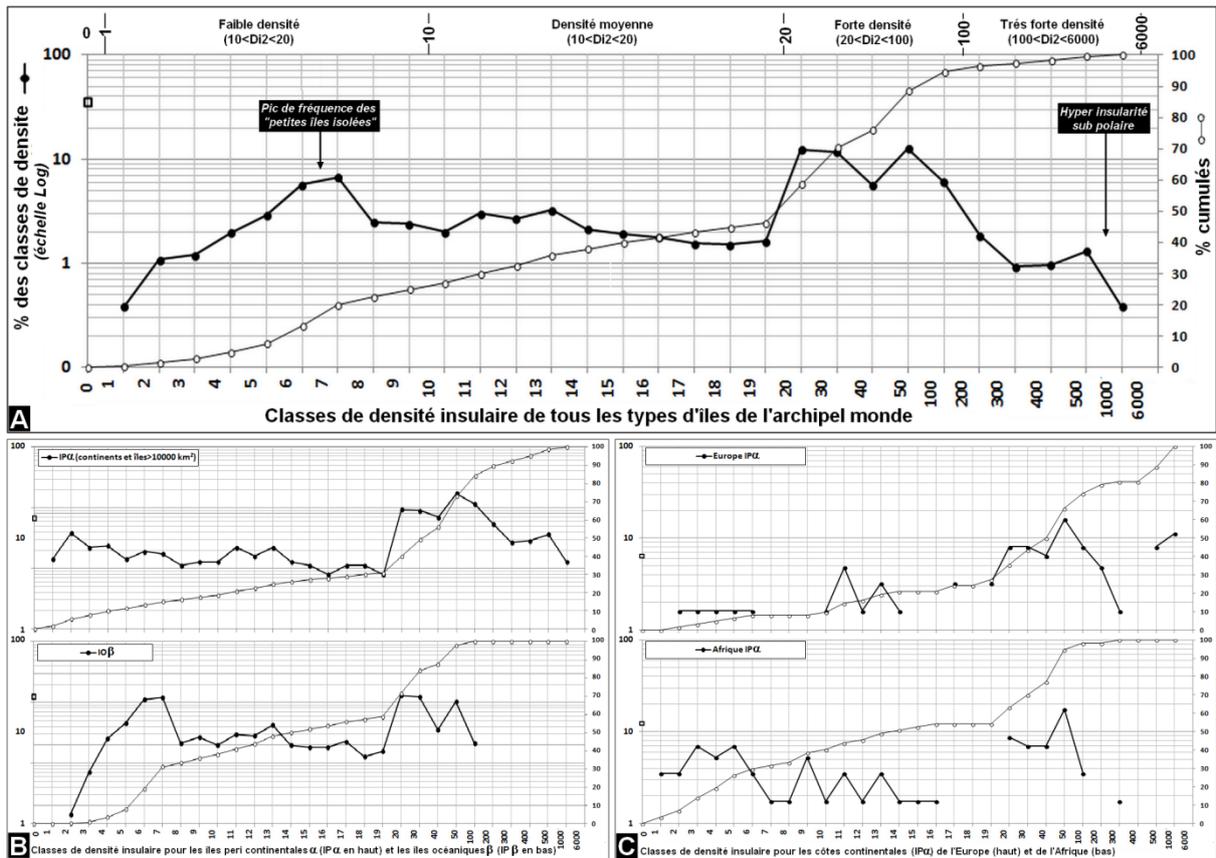


Figure 65 : Distributions statistiques des classes de densité insulaire relative Di_2 .
 (A) Pour l'ensemble des îles et archipels de l'archipel monde (2 485 rubanoïdes et *buffers*).
 (B) Comparaison des densités des îles péricontinentales $IP\alpha$ et des îles océaniques $IO\beta$.
 (C) Comparaison des densités des îles péricontinentales $IP\alpha$ de l'Europe et de l'Afrique.

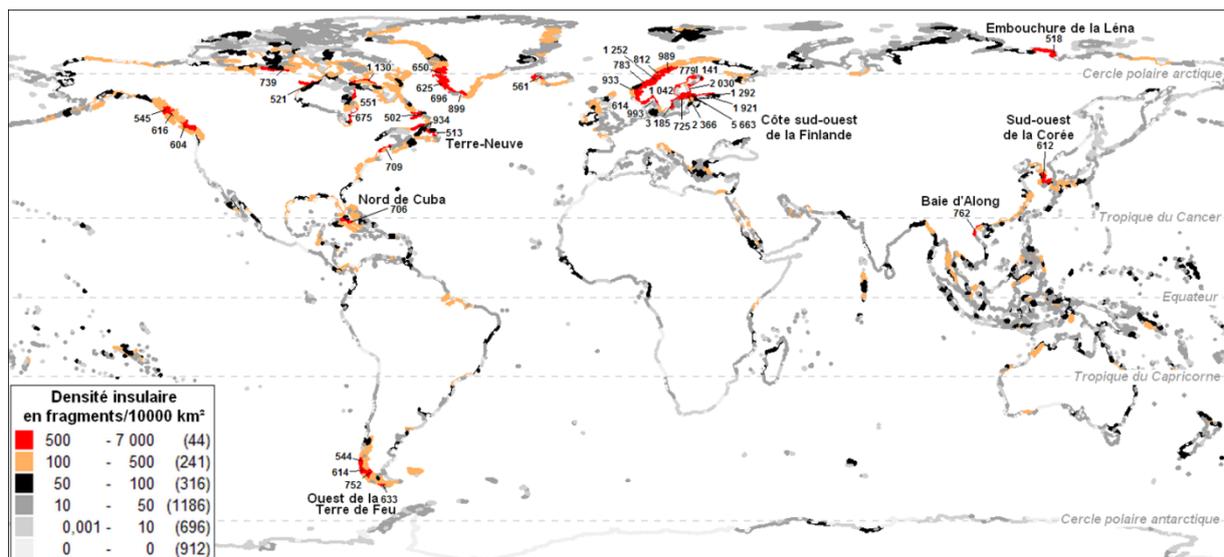


Figure 66 : Carte des densités insulaires relatives $Di_2 = 10\,000.Ni/Sb$ en nombre d'îles fragments pour 10 000 km². (Voir Atlas des densités en annexe 5).

Les trois rubanoïdes présentés en Figure 67A, B et C ont des densités insulaires relatives (Di_2) variant de 0 pour la côte du nord du Chili à 94, sur la côte vietnamienne et même 114 à

la frontière entre l'Égypte et le Soudan. Les configurations des bandes côtières sont assez semblables dans la région de Shalateen en Égypte le long de la mer Rouge (114) et de Iquique dans le Pacifique (106), à ceci près que la côte égyptienne est plus indentée et présente quelques îles de type $IP\alpha$ et $IP\beta$. Les densités observées sur des structures archipélagiques sont de 35 pour le groupe insulaire de l'île Espiritu Santo au Vanuatu mais atteint la valeur de 2 367 îles pour 10 000 km² sur l'archipel des Aaland entre la Finlande et la Suède : cette zone déjà hyperinsularisée jouxte à l'est la bande côtière finlandaise de la région de Turku qui présente la plus forte densité au monde avec une valeur de 5663 îles pour 10 000 km²²³⁸. Cet aperçu sur quelques cas montre des contrastes importants notamment sur les périphéries continentales. Les signatures géographiques que nous fournissent les mesures de densité semblent un bon indicateur des forces tectoniques comme de l'histoire géologique et géomorphologique qui ont façonné les structures insulaires, comme nous le verrons plus en détail ultérieurement dans le chapitre consacré à ce sujet.

Le plus marqué des contrastes s'observent entre les littoraux festonnés et fortement insularisés et péninsularisés de l'Europe à la faible articulation du trait de côte de l'Afrique, dont l'horizon océanique est le plus généralement exempt de toute île ou îlot (voir tableau de la Figure 64A). Y-a-t-il un lien entre la géographie découpée des rivages européens et l'ouverture passée sur le monde de ce moignon continental, bref entre une donnée géographique et un fonctionnement historique ? La question mérite le détour sans être les premiers à la poser même si elle ouvre la voie à une critique sévère : le déterminisme...

En premier lieu, il est oréférable de s'affranchir des définitions de limite géographique trop arrêtée comme il faut se garder de définir des dates trop précises pour évoquer les périodes de transition historique. En ne se basant que sur les grands traits du découpage du littoral, on peut définir un trait de côte presque linéaire dans son ensemble depuis le Bab-el-Mandeb jusqu'au nord de la Syrie en passant par la corne somalienne, le Cap de Bonne Espérance, celui du Cap Vert, la péninsule de Tanger et le Cap Bon, ces deux derniers étant les seules avancées de terre notables venant rompre la monotonie d'un littoral ne comportant que fort peu d'îles. À l'inverse, depuis la Cilicie dans le sud de la Turquie jusqu'à l'immense estuaire de l'Ob se jetant dans la mer de Kara, ce n'est qu'une litanie de péninsules²³⁹ et de mers au milieu des terres, des kyrielles d'îles et d'îlots innombrables, grands et petits, proches ou lointains (Figure 68). À titre de comparaison le ratio des longueurs de côtes établi d'après des données homogènes GSHHG est de 1 à 2 entre le premier (43 050 km) et le second (84 720 km) alors que le rapport des surfaces émergées des parties continentales est de 3 à 1. D'autres ratios sont du même ordre ou encore plus marqués pour le tracé européen par rapport à celui circumafricain pour les terres insulaires péricontinentales IP (2,4 pour la superficie des rubanoïdes et des *buffers*, 7 pour les densités $Di2$, 10 pour leur superficie et même 15 pour le nombre d'îles).

²³⁸ NB : la limite entre l'archipel des Aaland proprement dit et les îles cotières au large du sud-ouest de l'Islande qui le jouxtent ne peut être définie objectivement par la méthode des *clusters*. C'est donc l'usage où la définition arbitraire d'unité administrative qui permet de faire la distinction entre les deux composantes d'un continuum insulaire.

²³⁹ Jean-Marie Miossec considère qu'il y a cinq "digitations" majeures formant la "main" européenne, à savoir la péninsule des Balkans, la botte italienne, les péninsules ibérique et scandinave et ... les îles britanniques. Sur un parcours allant de la Cilicie jusqu'à la mer de Kara, en plus des précédentes, il faut compter la péninsule anatolienne, ainsi que la digitation insulaire de la Nouvelle-Zemble et à plus petites échelles, la presqu'île de Crimée, le Jutland, et les trois péninsules du nord de la Russie, celle de Kola, de Kanin et celle de Yamal.

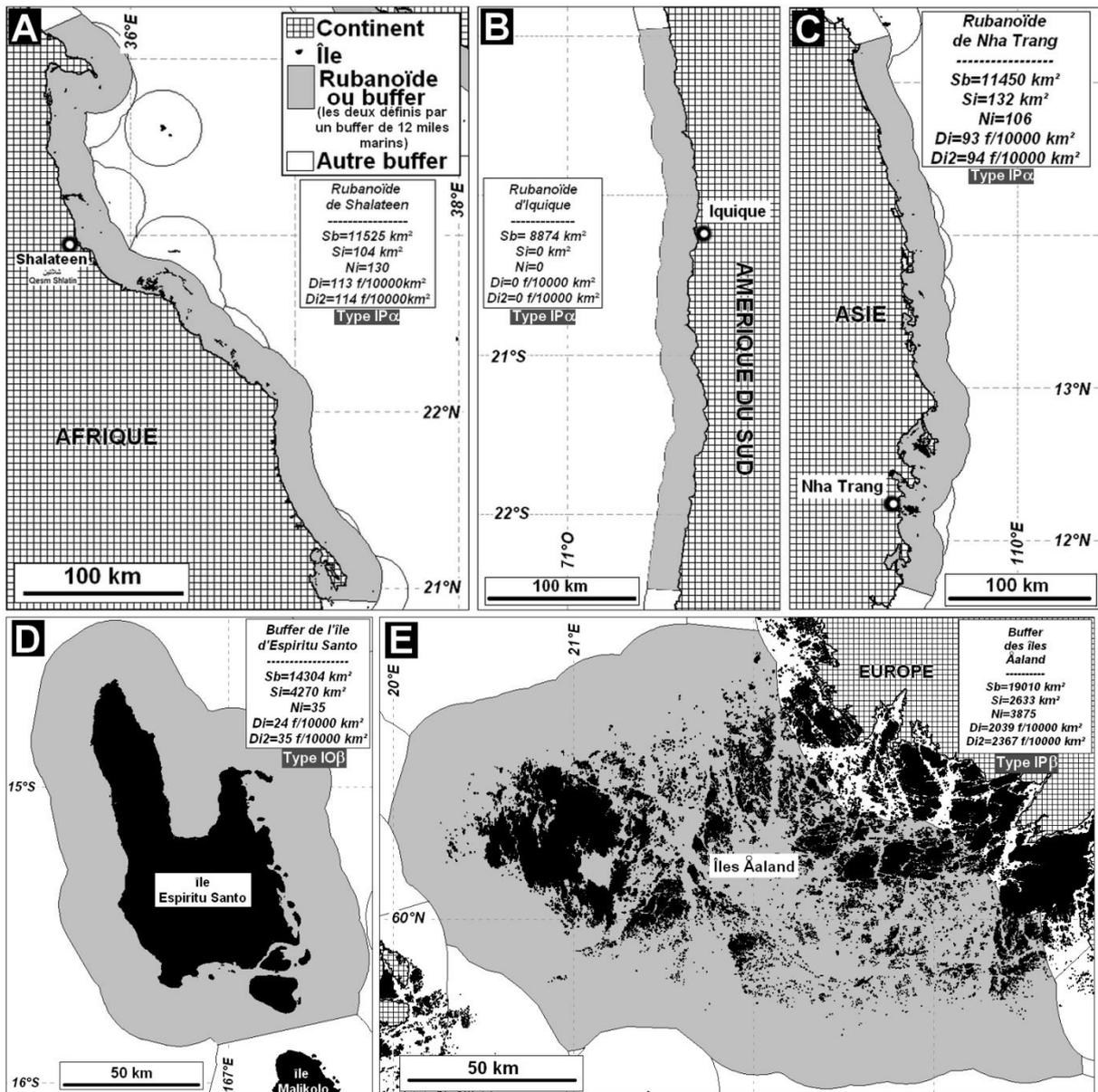


Figure 67 : Densités insulaires relatives ($Di2$ en fragments/10 000km²).
 (A) Rubanoïde $IP\alpha$ à la frontière entre l'Égypte et le Soudan ($Di2 = 114$)
 (B) Rubanoïde $IP\alpha$ d'Iquique dans le nord du Chili ($Di2 = 0$)
 (C) Rubanoïde $IP\alpha$ de Nha Trang au Vietnam ($Di2 = 94$)
 (D) Buffer $IO\beta$ du groupe de l'île Espiritu Santo au Vanuatu ($Di2 = 35$)
 (E) Buffer $IP\beta$ des îles Åaland en Finlande ($Di2 = 2367$)

	Tronçon	Type île	Superficie Continent 10 ⁶ km ²	Longueur de côte km	Superficie buffer Sb en km ²	Nombre îles Ni	Superficie îles Si en km ²	Densité insulaire Di	Densité insulaire Di2
"Afrique" (1)	Bab-el-Mandeb -> Syrie		30						
	Bab-el-Mandeb -> Syrie			43050					
	Bab-el-Mandeb -> Syrie	$IP\alpha$			615 619	1 571	5 403	26	26
	Bab-el-Mandeb -> Syrie	$IP\beta$			61 697	182	6 678	29	33
"Europe" (2)	Cilicie -> Ob		10						
	Cilicie -> Ob			84270					
	Cilicie -> Ob	$IP\alpha$			808 475	15 987	514 612	198	544
	Cilicie -> Ob	$IP\beta$			789 445	10 359	83 894	131	147
1	Bab-el-Mandeb -> Syrie	IP			677 316	1 753	12 080	26	26
2	Cilicie -> Ob	IP			1 597 920	26 346	598 507	165	264
2/1	Comparaison 2/1		0,3	2,0	2,4	15,0	49,5	6,4	10,0

Figure 68 : Comparaison des densités insulaires entre le ruban allant du Bab-el-Mandeb jusqu'à la Syrie (Afrique) et le ruban allant de la Cilicie à l'embouchure de l'Ob (Europe).

Considérés globalement en tenant compte du rapport de surfaces continentales en faveur de l'Afrique, il devient clair que les paysages côtiers européens avec leurs multiples péninsules, presqu'îles, îles et îlots sont proportionnellement 20 fois plus indentés et insularisés que ceux du parcours circumafricain. Le cas des îles péricontinentales *IPβ* qui sont des sortes de jalons, de marche-pieds vers les espaces hauturiers des mers et des océans doit être considéré avec plus d'attention. Ici le rapport est de 1 à 57 pour le nombre d'îles de 1 à 77 pour leurs superficies ! Or ces terres déjà tournées vers l'océan sont des invites pour des explorations plus lointaines et plus risquées, des sortes de banc d'essai pour la navigation hauturière. À supposer que les peuples côtiers disposent des mêmes capacités nautiques et soient confrontés aux mêmes contraintes internes à leurs sociétés, il va de soi que la présence de ces îles prolongeant le continuum côtier vers le large est un élément que l'on ne peut négliger dans le « passage à l'acte » vers des explorations lointaines. De plus, au-delà des périphéries continentales, il y a peu d'îles océaniques proches (*IOα*) autour de l'Afrique, si ce n'est Socotra, les Comores, le groupe Sao Tomé-Annobon et les Canaries.

Qu'en est-il pour les configurations côtières et insulaires des autres mondes continentaux ? L'Amérique du sud dans l'ensemble n'est pas sans rappeler celle de l'Afrique à deux exceptions près et non des moindres. En Patagonie chilienne, il y a l'enchevêtrement labyrinthique des chenaux anastomosés prenant dans leurs réticules pléthore de formes insulaires rappelant à s'y méprendre les côtes norvégiennes ou celles de la Terre de Baffin. L'autre élément plus important encore tient à ce tremplin qu'offre Trinidad et Tobago vers les chapelets des petites et Grandes Antilles s'articulant autour des îles Charnière. L'Amérique au nord de 45° N, à l'image de l'Europe, nous montre des côtes continentales hyperinsularisées et flanquées de nombre d'archipels alors que plus au sud et notamment sur la côte ouest des États-Unis, on observe le même phénomène de linéarité du trait côtier bordant un horizon marin sans silhouette insulaire, typique des rivages africains ou sud-américains. Bien que massive, la silhouette de ce continent nous donne à voir la rondeur étonnante de la baie d'Hudson et de son prolongement en baie de James, la profonde incursion de l'estuaire du Saint-Laurent vers le cœur du continent et les grands lacs, l'avancée de la Floride vers les Grandes Antilles, enfin l'isthme de l'Amérique centrale ménageant un pont terrestre étroit vers l'Amérique du sud.

Tout comme l'Europe, la masse continentale de l'Asie voit rayonner depuis son centre de vastes promontoires tels que l'Asie Mineure déjà presque péné-européenne, la rectangulaire péninsule d'Arabie encadrée par les deux « sinus » du golfe Arabo-persique et de la mer Rouge, le triangle péninsulaire du Deccan, l'Indochine et son appendice malaisien, la Corée jouant les entremetteurs entre la Chine continentale et l'archipel nippon, enfin, tout à l'Est à quelques encablures de l'Alaska, la vaste péninsule de l'extrême-orient russe avec sa presqu'île des Tchouktches et vers le sud, le fer de lance du Kamchatka planté dans le Pacifique septentrional, auquel s'accrochent les guirlandes des petites terres des Kouriles et des Aléoutiennes. À ces digitations complexes, multiformes et en cascade autour du noyau asiatique, viennent s'ajouter des pédoncules insulaires tout aussi variés : la péné-presqu'île de Ceylan, le chapelet d'îles prolongeant le Japon vers le sud avec en particulier la fort belle île de Formose, l'arc de Sakhaline à Kyushu formant l'enveloppe insulaire extérieure de la mer du Japon, enfin l'incomparable monde nusantarien et ses annexes wallacienne et néo-guinéenne qui montrent le chemin vers l'Australie et le grand espace maritime et insulaire de la proche et lointaine Océanie. Tout bien considéré, l'Asie apparaît plus encore que l'Europe un « continent d'ouverture » vers les espaces ultra-marins comme en font foi les migrations vers l'Est des populations papous, mélanésiennes, aborigènes, formosanes et polynésiennes,

sans parler des ancêtres austronésiens d'une partie de la population de Madagascar partis de l'île de Bornéo ou de la saga polaire sur mer et sur glace des Inuits du nord canadien et du Groenland depuis la Sibérie extrême-orientale.

L'Australie a un profil côtier et insulaire l'apparentant à ses compagnes continentales de l'hémisphère sud à savoir l'Afrique et l'Amérique du sud notamment le long du ruban péricontinental jouxtant le monotone plateau de Nullarbor sur près de 900 km. Cette appréciation doit être nuancée puisque le golfe de Carpentarie au nord et dans une moindre mesure ceux plus petits de Spencer et Saint-Vincent au sud ménagent des échancrures dans la massivité d'ensemble de ce petit continent. Via le détroit de Torres, le monde insulaire de la Mélanésie est tout proche, alors que c'est un cortège d'îles traversant le détroit de Bass qui assure un continuum de proche en proche vers la Tasmanie. Hormis ses deux chemins d'îles et d'îlots, le domaine péricontinental australien et au-delà, vers des terres plus lointaines, reste modeste. Il isole de fait ce microcontinent²⁴⁰ des domaines de l'océan Indien par ailleurs pratiquement vide. Côté Pacifique, la constellation de terres menues de l'Océanie se trouve au-delà la Grande Barrière de corail et de la mer éponyme.

Restent les continents englacés de l'Antarctique et du Groenland. Comme précédemment, il faut indiquer que s'il y a des terres émergées elles sont pour la plupart enfouies sous plusieurs kilomètres de glace et que l'isolement lié aux étendues marines doit d'être nuancé puisque la banquise les remplace pendant tout ou partie de l'année. Le cas de l'Antarctique est le plus difficile à cerner car il est peu documenté²⁴¹ et cerné par les glaces parfois de façon continue comme c'est le cas dans les baies de Ross et de Ronne où sont les « îles » Berkner et Roosevelt. Ce sont en fait des éléments rocheux dépassant d'une banquise autrefois pérenne mais en voie de dislocation. Le tronçon le plus remarquable est bien évidemment la péninsule antarctique prolongeant la Patagonie via l'arc des Sandwichs du Sud et des Orcades du Sud avec sur son versant ouest des paysages de fjords et d'étroits chenaux séparant des fragments de terres englacées analogues à ceux des côtes norvégiennes ou du sud du Chili. Sinon, il y a peu d'îles dans la zone océane ($IO\alpha$ et β) si ce n'est l'archipel des Balleny et l'île Pierre 1^{er}. Dans les « cinquantièmes hurlants » s'égrènent de loin en loin des terres relevant de différents pays : Bouvet (Norvège), Falkland, Géorgie, Sandwich et Shetland du Sud (Royaume-Uni), Heard & MacDonald (Australie), Auckland, Campbell et Macquarie (Nouvelle-Zélande) et l'île de Scott (revendiquée par la Nouvelle-Zélande). De même dans les « quarantièmes rugissants » : Antipodes, Bounty, et Snares (Nouvelle-Zélande), le groupe des îles Crozet et Kerguelen (France), les îles Marion et du Prince Edouard (Afrique du Sud) et Gough (Royaume-Uni). Enfin, en montant jusqu'aux « trentièmes soufflotants », on atteint le groupe de Tristan da Cunha (Royaume-Uni), Saint-Paul & Amsterdam, cette dernière étant surnommée la « Côte d'Azur » des Terres australes et antarctiques françaises (TAAF). Le Groenland, cette « terre verte » qui ne l'est que sur un peu moins d'un dixième de son territoire, impose aux cartographes un difficile exercice de couture tant le festonnement résultant des processus glaciaires découpe le socle en fines lanières péniinsulaires et en un patchwork de morceaux d'étoffes insulaires souvent montueuses et parfois plates²⁴². Dans la partie nord de ce continent minuscule, l'inlandsis tend à recouvrir l'ensemble du soubassement rocheux mais le désenglacement rapide, dû en partie à la disparition saisonnière de la banquise qui avait un effet de blocage sur le glissement des glaciers vers la mer, devrait permettre l'émergence de

²⁴⁰ Ou cette macro-île, comme on veut.

²⁴¹ C'est aussi le cas pour les données de traits de côtes et des îles dans GSHHG!

²⁴² L'absence de relief sur les strandflat est bien connu des géophysiciens des bourrelets liminaires continentaux. Le fait est remarquable sur l'île Shannon et l'île...d'île-de-France... au Groenland!

nouvelles îles autrefois cachées²⁴³. Au nord-ouest, le Groenland rejoint presque l'île d'Ellesmere assurant en quelque sorte une continuité à la fois terrestre et glaciaire vers le Canada, l'Alaska et l'extrême-orient russe.

Il paraît manifeste que chaque continent présente une articulation qui lui est propre avec l'espace océanique qui lui est proche mais aussi et surtout avec l'« océan mondial »²⁴⁴. L'ouverture vers la navigation hauturière sera partiellement contrainte par ce facteur géographique. Ce dernier influe sur les prises de risque à la fois pour les marins et capitaines, mais aussi pour les gouvernements et les États qui doivent s'y investir en termes politiques et économiques. *A posteriori*, quelques millénaires après que les Polynésiens eurent osé se lancer dans le Pacifique lointain, cinq siècles après le désenclavement planétaire qui fut aussi celui de l'archipel monde, on ne peut qu'être étonné que certains, qu'ils soient navigateurs ou commanditaires, aient eu la préscience de ce que la connaissance et le contrôle des mers et plus encore de l'océan mondial pouvait permettre en termes de retour sur investissement ou simplement de prestige.

Pour ne considérer que les îles et les rivages continentaux, il peut être utile de comparer l'« empan » géographique maritime de l'ensemble de ces espaces insulaires et côtiers avec la surface de toute la zone océanique qui couvrent 449 millions de km²²⁴⁵. En considérant l'ensemble des Eaux territoriales, cette surface, qui sera qualifiée de « littorale »²⁴⁶ s'élève à 15,2 millions de km², soit 3,4 % de l'espace océanique. En y ajoutant, la surface des îles définies comme ayant une superficie inférieure à un million de km², soit 7 735 000 km², on obtient une surface de l'ordre de 23 millions de km² pouvant être considérée comme étant l'empan géographique des espaces insulaires et de leurs périphéries maritimes. C'est sur ces domaines que les enjeux majeurs de la géopolitique se sont déroulés et devraient continuer à le faire, la loi du droit de la mer instituant les ZEE de 200 milles marins autour de toutes terres émergées si petites soient-elles²⁴⁷ ne faisant qu'accentuer le phénomène.

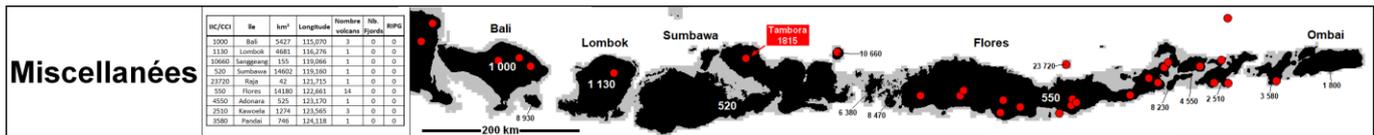
²⁴³ Une nouvelle île serait apparue suite à la fonte du glacier de Vilkitski près de la côte de la Nouvelle-Zemble. Ses mensurations sont de 410 mètres de large pour 780 mètres de long, ce qui fait que la Russie vient de gagner 19 hectares de plus pour son territoire. La location de l'île est de 75° 34' 06.67 N et de 58° 17' 52.2 E (source SPUTNIK, 13 février 2018).

²⁴⁴ Par « océan mondial », il faut comprendre les espaces océaniques par-delà les mers bordières des continents plus ou moins fermées ou ceinturées de chaînes insulaires (Méditerranée, Caraïbe, mers de Chine orientale et méridionale...).

²⁴⁵ Les mers fermées telles que la Caspienne, feu la mer d'Aral ou la mer Morte ne sont bien évidemment pas prises en compte, d'autant que leur niveau n'est pas lié au NMM actuellement.

²⁴⁶ Pour mémoire, elle correspond à l'ensemble des *buffers* de 12 milles marins calculés à partir des côtes continentales et insulaires (données GSHHG pour les fragments de plus de 0,06 km²).

²⁴⁷ Pour peu qu'elles soient habitées pendant 21 jours par un ressortissant du pays les revendiquant : voir politique de l'Indonésie (Référence à retrouver), l'action de Pékin en mer de Chine, le cas de Rockall, ...



Longueur des côtes et vocation océanique des peuples

La question du déterminisme géographique est une pomme de discorde en particulier pour les historiens mais pas seulement : On en trouve traces dans le livre « Rivages d'Europe » où cette dernière est considérée comme un "continent ouvert" (Miossec, 2013, p. 42) :

"À la différence de l'Afrique, de l'Asie et de l'Amérique, tellement massives, on a l'impression que la petite Europe n'est que rivage. L'ubiquité de la mer et de ses articulations a été la source du développement des civilisations. L'Europe déjà effilée en cap, y projette [en Méditerranée] trois presqu'îles en face d'une autre presqu'île [celle des Balkans], l'Asie Mineure, sentinelle de l'Asie centrale qui regarde l'Europe, qui s'incline vers elle. La presqu'île des Balkans a, comme appendice, la péninsule grecque qui se poursuit par la presqu'île digitée du Péloponnèse."

Le découpage des côtes européennes pourrait-elle être « la source du développement des civilisations » ; cette remarque fondamentale en page 42 d'un ouvrage qui en compte 851 ne se voit jamais reprise dans le reste du document. Géographe universitaire, Jean-Marie Miossec prend le risque d'avancer une hypothèse déterministe sans tenter de l'étayer ou l'infirmer par la suite, sans doute pour éviter une levée de bouclier du côté des historiens. Cette étude sur les « Rivages de l'Europe » au sens propre et figuré aurait pu être l'occasion d'un travail de fond sur la géohistoire de ce continent si particulier par sa géographie et plus encore par son histoire. Lorsqu'il évoque « l'ubiquité de la mer et de ses articulations » et non des terres, l'habileté consiste à adopter un positionnement plein d'ubiquité entre géographie et histoire, ubiquité signifiant « être présent en plusieurs lieux à la fois » ; de fait, l'ouvrage se place soit du côté géographique, soit du côté historique en sans jamais longer le « rivage » entre les deux domaines sauf dans la citation ci-dessus.

De façon imagée, la géohistoire n'est pas ubiquiste mais sur le rivage entre les deux disciplines sciamaïses qui en font l'étymologie. Il ne faut pas oublier cependant qu'il est assez facile de mesurer des longueurs de côte alors qu'établir une métrique permettant de quantifier les civilisations reste une démarche tâtonnante et détonnante qui se doit d'être maniée avec prudence.

L'Empire du Milieu et son accès à l'océan mondial

Le réveil de l'Empire du Milieu a entraîné un regain d'intérêt pour l'historiographie de la Chine mettant en avant des faits bien connus des spécialistes mais oubliés par le grand public occidental du moins à commencer par les Guerres de l'Opium qui sont un épisode peu moral d'une vision mercantile du fonctionnement de l'archipel monde. Toutefois, un officier de la British Navy, Gavin Menzies, a écrit un best-seller (2002) révélant qu'un Empereur de la dynastie Ming, Yougle (1360-1424), eut une vision mondiale de ce que devait être le rayonnement mondial de son règne et que son immense armada aurait découvert l'Amérique. Cette hypothèse faut encore débat mais il est établi que plusieurs expéditions navales eurent lieu entre 1405 et 1433 sous la conduite d'un amiral Hui originaire du sud de la Chine, Zheng He (1371-1433).

Cette vocation océanique fit long feu et l'initiative à la mesure de cet empire n'eut aucun effet durable ; les géohistoriens sont en droit de se demander si le contexte peu océanique de cet empire n'a pas eu un rôle non négligeable dans cette échec alors même qu'à la même époque le Portugal sous l'impulsion de l'Infant Henri le Navigateur (1394-1460) ; il participe en 1415 à la prise de Ceuta, puis organise plusieurs expéditions le long des côtes Africaines si bien qu'à sa mort, les navires de la couronne Portugaise atteignent le Cap vert au Sénégal et les îles du même nom au large. Cet épisode ainsi que sa suite sont suffisamment connus pour qu'ils ne soient pas rappelés ici. En revanche, un regard sur un planisphère suffit pour comprendre que la façade océanique du mainland chinois est ceinturée au large par des guirlandes insulaires échappant à l'Empire y compris Formose, la future Taïwan.

À l'inverse, le minuscule Portugal qui acheva sa Reconquista dès 1249 n'a pas d'autre alternative que d'envisager une expansion océane soit par cabotage vers le sud, soit par exploration au large vers l'ouest. Encore de nos jours, la donne géographique joue un rôle dans les stratégies des deux pays. L'irrédentisme de Pékin à l'égard de Taïwan a bien évidemment un fondement politique et même historique mais l'élément géographique de désencerclement insulaire est tout aussi tangible en permettant une ouverture directe vers le Pacifique. Avec d'autres actions en cours en mer de Chine du Sud et le partenariat avec Moscou pour exploiter le futur « passage du nord-ouest » (du nord-est pour les Européens) via l'océan arctique, il est clair que le désenclavement stratégique de la Chine passe par une vocation océanique dont le fondement est économique. Faut-il en conclure que les pays ont peu ou prou la politique de leur géographie ? À voir....

2.7. Processus dynamiques et fragmentation insulaire

Toute la géohistoire de l'archipel monde n'est-elle qu'énigmes et hasards ? Après nous être intéressé aux décors, faisons un peu de place aux acteurs du monde vivant, en particulier aux jeux de scène de l'*Homo sapiens*. Par jeux de scène, il faut comprendre les processus dynamiques définis comme tous les phénomènes de dispersion, diffusion ou migration (DDM) déjà brièvement mentionnés. Sur de grands domaines insulaires d'échelle régionale, on peut constater que les dispositifs « d'archipels d'archipels » ne sont pas sans ressemblance au-delà de leur spécificité comme c'est le cas entre la Nusantarie et les Antilles (Figure 69A et B). Ces deux ensembles sont typiquement des pavages d'îles ménageant un chemin pour les processus de DDM entre deux masses continentales. Ils forment un continuum de visibilité et d'intervisibilité propice à une migration d'îles en îles (voir Figure 1 et Figure 59B pour la Nusantarie). Considérons en premier lieu les îles péricontinentales ($IP\beta$). Pour la Nusantarie, elles constituent de vastes pédoncules englobant de nombreux fragments archipélagiques et insulaires. À l'ouest, la continuité de cette $IP\beta$ se fait depuis la péninsule malaise jusqu'au Timor et jusqu'à l'archipel de Pulau Leti et l'île de Sermata. À l'est, elle se fait vers la Nouvelle-Guinée via le détroit de Torres ponctué d'îles et se prolonge en incluant des mosaïques insulaires à l'est (Tagula, Ressel) et à l'ouest (Waigen, Missol). Dans la Caraïbe, ces mêmes zones $IP\beta$ sont limitées à Trinidad et Tobago côté sud-américain et aux Keys à l'extrémité de la Floride au nord. Quant aux îles océaniques et à leurs *buffers* périinsulaires ($IO\alpha$ et β), ceux de l'arc nusantarien restent proches l'un de l'autre y compris dans la région de la Wallace entre les deux anciennes péninsules continentales de la Sonde et de Sahul²⁴⁸. L'espacement entre les mêmes entités se révèle légèrement plus important dans les Antilles.

La traversée en bateau (*a fortiori* en canoë) de bras de mer, chenaux et autres détroits entre les îles n'a rien d'évident²⁴⁹ même pour les insulaires coutumiers du fait comme le rappelle la chanson traditionnelle du peuple Mentawai dans l'archipel du même nom à l'ouest de Sumatra : « La traversée du détroit entre les îles de Sibérut et Sipora avec ses immenses vagues est une expérience effrayante sur de petits canoës. Quiconque a jamais fait ce trajet en bateau, Pulajoat²⁵⁰, s'en souviendra pour toujours. » R. Schefold & G. A. Persoon (2009)²⁵¹.

Partant de ces prémisses géographiques et nautiques, un schéma des routes migratoires, en particulier humaines, sur ces espaces fragmentés dans la durée sera proposé. On supposera *a priori* que le chemin le plus probable est non seulement le plus court mais aussi celui qui comporte le moins de « barrières » au sens de largeur des chenaux marins. Le cheminement interinsulaire peut être décomposé en étapes élémentaires consistant à passer d'une île à l'autre avec comme variables géographiques la superficie des îles et la largeur des chenaux marins les séparant (Figure 70A). Trois phases fonctionnelles peuvent être définies à l'échelle d'un saut insulaire élémentaire :

- Phase de migration volontaire ou non (dispersion pour les plantes) ;
- Phase incluant l'installation (ou fondation²⁵²), l'adaptation et le peuplement

²⁴⁸ Ces deux péninsules étaient émergées pendant la dernière glaciation du Würm vers 15000 BP. La Wallace (du nom du biologiste anglais Alfred Russel Wallace) incorpore l'ensemble des terres restées insulaires pendant cette période.

²⁴⁹ L'auteur a pour sa part eut la chance de vivre cela en barque entre la Martinique et la Dominique, et en bateau entre Audiernie et l'île de Sein, entre Malte et Gozo, de Tortola et Virgin Gorda (Îles Vierges Britanniques), de Formose aux îles Pescadores.

²⁵⁰ *Pulajoat* en dialecte mentawai se réfère à « île » (*pula*) et « traversée en bateau » (*joat*).

²⁵¹ Texte intégral en annexe 6.

²⁵² Un « effet fondateur » en génétique correspond à la création d'un pool génétique plus réduit que la population originelle.

jusqu'à atteindre la *carrying capacity*²⁵³ de l'île au sens des niches écologiques exploitables par l'espèce considérée ;

- Phase d'exploration vers de nouvelles îles pour les hommes, les oiseaux et animaux bons nageurs.

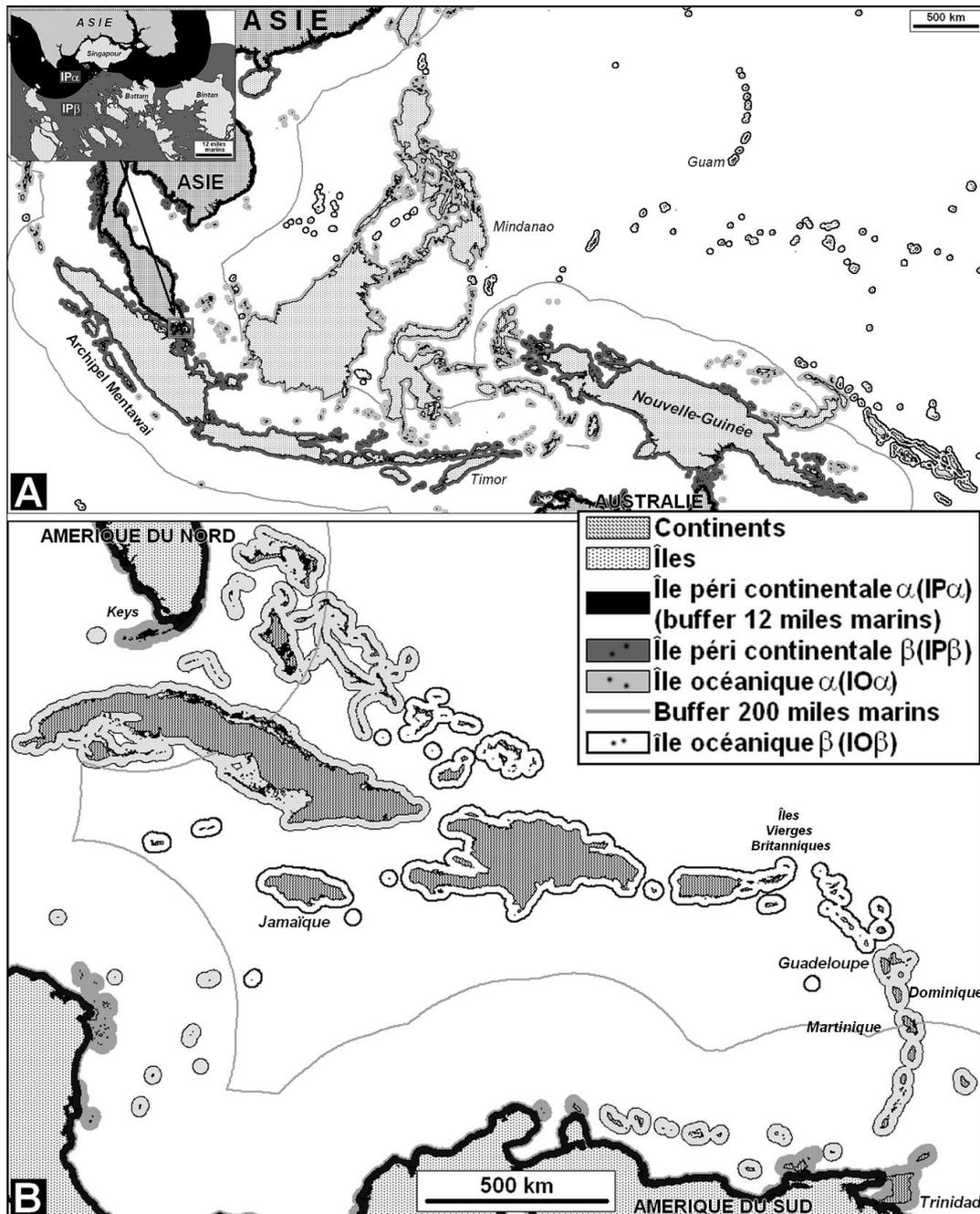


Figure 69 : Typologie des îles péricontinentales (IP) et océaniques (IO) en fonction de leur topologie avec les côtes continentales.

- (A) La Nusantarie (Singapour IP α , Timor IP β , Mindanao IO α et Guam IO β).
 (B) Les Antilles (Trinidad IP β , Guadeloupe IO α et Jamaïque IO β).

²⁵³ Par la suite, le terme *carrying capacity* sera utilisé plutôt que celui de « capacité de charge » qui est moins utilisé et moins parlant de lui-même. En Allemand *Maximale Tragfähigkeit* évoque une notion de « viabilité limite ». Les historiens et géographes parleraient d'un « monde plein » compte tenu des moyens techniques d'une époque et d'un lieu, par exemple l'Europe dans la première moitié du XIV^e siècle avant la Peste Noire.

Bien que la phase d'exploration ne soit pas absolument nécessaire pour peu que l'île de destination soit visible ou « intervisible » depuis le lieu d'origine, il est néanmoins probable qu'une reconnaissance préalable favorise d'une part la prise de décision et d'autre part constitue un gage de réussite future de la nouvelle implantation. Pendant cette phase, la nouvelle île peut faire l'objet d'une exploitation occasionnelle ou saisonnière des ressources du littoral. Dans certains cas, il semblerait que l'exploration plus ou moins associée à une exploitation intermittente voire une colonisation limitée ne soit pas suivie par un peuplement effectif important. L'exemple le plus connu est celui de l'établissement des Vikings à l'Anse-aux-Meadows à l'extrême nord de Terre-Neuve vers l'an 1000. Bien que le lieu présente des ressources importantes notamment en matière de bois indispensable pour la construction navale²⁵⁴, cette ultime avancée des navigateurs groenlandais ne dura que quelques années. Dans le Pacifique, hormis le cas emblématique de Rapa Nui, des éléments archéologiques, écologiques et génétiques démontrent que les Polynésiens ont occupé l'atoll soulevé d'Henderson à l'est de Tahiti du VIII^e au XII^e siècle (Weisler, 1995) et, pendant de courtes périodes, l'île subantarctique d'Auckland voire Macquarie par 54° S au sud de la Nouvelle-Zélande (Anderson A. , 2009). Certaines traditions orales polynésiennes, dont celles d'Ui-te-Rangiora et de Te Ara-tanga-nuku, évoquent même la possibilité que les Polynésiens soient parvenus jusqu'en Antarctique entre 650 et 1000 AD (Ariki-tara-are, 1919)²⁵⁵. Ces divers exemples laissent supposer que l'exploration de l'espace océanique hauturier, à plus forte raison le domaine accessible par simple cabotage, a probablement été plus important que ce que l'historiographie classique admet communément.

La voie insulaire entre la péninsule malaise et l'Australie se fait par un chapelet d'îles séparées par d'étroits chenaux marins depuis Sumatra jusqu'au Timor puis par des petits archipels (Babars, Tanimbar et Kaï) plus espacés (entre 20 et 70 km) jusqu'au mainland de la Nouvelle-Guinée (Figure 70B), cette dernière n'étant séparée de l'Australie que par le détroit de Torres de 100 km de large comportant nombreuses îles relais. La même démarche peut s'appliquer à la route DDM depuis la Chine continentale jusqu'à la Nouvelle-Guinée via Formose, les Philippines, Sulawesi (Célèbes) et les Moluques, tout comme aux Antilles entre les masses continentales nord et sud-américaines depuis Trinidad et Tobago jusqu'à la Floride ou le Yucatan via les Petites Antilles, les îles Charnière, les Grandes Antilles et les Bahamas (Figure 70C). Pour ce qui est des sociétés humaines, le processus migratoire est couplé à des phénomènes de diffusion culturelle (langues, techniques, artisanat, arts, croyances...) ou de dispersion d'espèces cultivées et d'animaux domestiques y compris à rebours du sens général de migration.

Un modèle conceptuel des phénomènes DDM sur des domaines fragmentés est envisageable non seulement pour les processus relatifs aux espèces végétales et animales (Figure 71A) mais aussi pour l'homme (Figure 71B). Bien que des différences majeures subsistent en fonction du taxon considéré y compris humain, il est pertinent de remarquer que certains phénomènes présentent une analogie. *Mutatis mutandis*, les luttes inter et intra spécifique dans le règne animal ne sont pas sans rappeler les conflits et les guerres qui encombrant l'histoire des sociétés humaines. Pour ces dernières, il va de soi que les causes

²⁵⁴ En effet, le Groenland et même l'Islande, tout comme les Féroé, ne disposaient pas de bois de charpente si bien qu'ils dépendaient du bois importé de Norvège. L'implantation de l'Anse-aux-Meadows est relatée dans les sagas islandaises.

²⁵⁵ Inversement, une erreur d'interprétation d'une carte du XII^e siècle du géographe al-Sharif al-Idrisi par les premiers cartographes européens fit que la découverte des îles Mascareignes fut longtemps attribuée à des navigateurs arabo-musulmans avant l'arrivée des Portugais (Toorawa, 2000)

de départ vers l'aventure du grand large relèvent de facteurs multiples d'ordre politique²⁵⁶, économique, écologique²⁵⁷ et autres catastrophes naturelles. Plus spécifiquement, les migrations de peuplement peuvent résulter de bannissements faisant suite à des guerres, comme ce fut le cas pour les Vikings ou les Polynésiens, à des persécutions religieuses²⁵⁸ ou à du trafic d'esclaves²⁵⁹. Au moins pour l'espèce humaine, une autre cause de migration doit être mentionnée même s'il demeure difficile de démontrer qu'elle soit déterminante : on évoque un « élan exploratoire », un besoin de découvrir ce qu'il y a au-delà de l'horizon indépendamment de toute contrainte manifeste au départ. Comme nous le verrons, ce facteur a pu jouer un rôle non négligeable dans l'expansion de l'espèce humaine notamment lors du premier peuplement extrêmement rapide de l'Amérique jusqu'à la Terre de Feu ou encore pendant la période du désenclavement planétaire à la charnière du XV^e et XVI^e siècle (Lejosne, 2018). L'aiguillon ne serait-il pas une curiosité irréprouvable pour l'inconnu ?

En se limitant aux migrations humaines, les conditions initiales sur le territoire de départ sont capitales pour comprendre les causes et la vitesse des diverses phases de découverte, d'exploration, d'immigration, de peuplement et d'émigration vers des terres encore plus lointaines. Toutefois le contexte géographique ou plus exactement maritime joue un rôle qui ne peut être négligé. La présence de nombreuses îles et d'îlots le long des côtes ainsi que la pratique de la pêche côtière voire hauturière par les sociétés locales²⁶⁰ participe au processus, notamment dans les phases initiales d'exploration et de découverte. Que ce soit pour les sociétés humaines ou pour les autres êtres vivants, le fait de peupler un territoire présentant les mêmes conditions bioclimatiques est un avantage. *A contrario*, les conditions peuvent être défavorables voire totalement inadaptées lorsque l'environnement s'y avère très différent. Ainsi les comptoirs de la côte africaine étaient des « mouroirs » pour les Européens avant l'arrivée de moyens prophylactiques *ad hoc*. Dans le Pacifique, en particulier en Mélanésie, les îles basses sont généralement occupées par des communautés polynésiennes principalement tournées vers l'exploitation des ressources marines alors que les îles hautes constituent un milieu plus adapté à l'agriculture et l'horticulture pratiquées par les peuples mélanésiens.

Dernier paramètre et non le moindre : les sociétés humaines ont une capacité de transmettre des savoirs et des connaissances au moyen de traditions orales, *a fortiori* si elles disposent de l'écriture. Toutefois, les récits originaux basés sur des faits réels se trouvent déformés et simplifiés au fur et à mesure des transmissions intergénérationnelles pour devenir des récits légendaires ne contenant plus que quelques éléments ayant un semblant de réalité. Prenons le cas du récit sur l'Atlantide de Platon, daté du IV^e siècle avant JC, en admettant qu'il fait référence à l'explosion volcanique cataclysmique de l'île de Théra (Santorin) qui se serait produite d'après les dernières études archéologiques et dendrochronologiques vers 1550 av. JC (Pearson & et al., 2018). Sur cet exemple, les faits originaux seraient devenus un récit mythique en 1100 ans, pendant quelque trente générations. Dans la même veine, le périple d'Ulysse supposé légendaire ferait référence à de nombreuses îles réelles de la Méditerranée occidentale qui restaient peu connues lors de la rédaction de l'Odyssée vers la fin du VIII^e siècle avant JC.

²⁵⁶ Les expéditions maritimes de l'Amiral Zheng He sous la dynastie des Song au début du XIV^e siècle relevaient avant tout d'une volonté d'expansion politique et de rayonnement de l'Empire du Milieu. Dans le cas des puissances ibériques aux XV^e et XVI^e siècles, les causes furent plus diverses comme cela sera vu ci-après.

²⁵⁷ Maladie de la pomme de terre en 1848 en Irlande et émigration de plus d'un million d'Irlandais vers les États-Unis.

²⁵⁸ Cas des communautés anabaptistes telles que celle des Amish ou des Mennonites fuyant l'Europe en Pennsylvanie notamment, connue pour la tolérance religieuse de cet État fondé par des Quakers.

²⁵⁹ Notamment, mais pas seulement, entre l'Afrique et le Nouveau Monde dans le cadre du commerce triangulaire. Ce point sera examiné de façon précise dans le cadre du bassin caribéen.

²⁶⁰ Tradition de la pêche à la morue sur les Grands Bancs de Terre Neuve dès la fin du Moyen Âge.

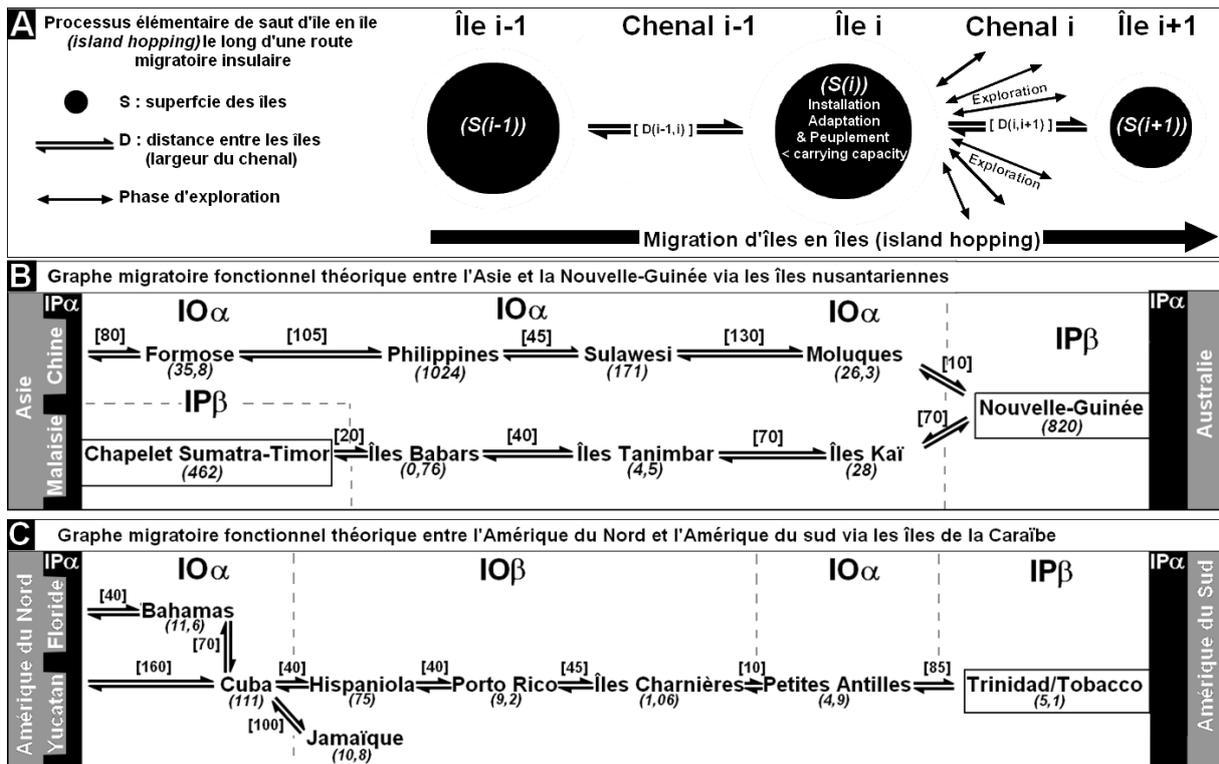


Figure 70 : Routes de DDM intercontinentales sur les ponts insulaires de la Nusantarie (A) Indonésie, Philippines, Formose) et de la Caraïbe

(B) Îles nusantariennes entre l'Asie et l'Australie : graphes migratoire de type *island hopping* indiquant la largeur des chenaux marins et la superficie des îles.

(CC) idem pour les grandes et petites Antilles entre l'Amérique du Nord et celle du sud.



Figure 71 : Les phases de DDM d'une île à l'autre ou *island hopping*.

(A) Dispersion passive ou migration active des espèces liées à des phénomènes aléatoires de dispersion, d'adaptation, d'évolution et de luttes inter et intraspécifiques.

(B) Migration humaine volontaire ou forcée : exploration, pêche, commerce, expansion...

Les cartes de la Figure 69 et les schémas de la Figure 70 doivent être complétés par un modèle conceptuel du processus de saut d'îles en îles selon des modalités différentes pour les sociétés humaines (Figure 71A) et les espèces végétales et animales (Figure 71B). Dans ce but, la durée des diverses phases peuvent être paramétrées en se basant sur les hypothèses élémentaires suivantes :

- La durée de la phase de découverte (*Dpd*) dépend de la configuration des côtes du territoire originel et notamment de la présence d'îles péricontinentales ou périphériques du mainland considéré (*IP α* et β) ; les pratiques piscicoles ou

commerciales doivent être prises compte bien qu'elles soient difficilement quantifiables.

- La phase d'exploitation de la découverte ou phase d'exploration (Dpe) est fonction de la distance à parcourir en mer et notamment lorsque les chenaux sont d'une telle largeur telle qu'une navigation au cap devienne nécessaire ; là encore, d'autres facteurs socio-économiques et politiques devraient entrer en jeu mais ne peuvent pas être paramétrés de façon universelle.
- La phase d'immigration vers le nouveau territoire (Dpi) doit prendre en compte la taille de la population originelle ayant atteint ou non la *carrying capacity* du territoire originel ; elle peut correspondre à une ou plusieurs migrations, des petites îles intermédiaires pouvant éventuellement servir de relais.
- La phase de peuplement au sens d'accroissement de la population pour atteindre la *carrying capacity* (Dpp) est conditionnée entre autres par la superficie du nouveau territoire, la présence éventuelle de populations autochtones et l'importance des ressources naturelles. Dans le cas d'un territoire vierge, ces dernières peuvent être particulièrement importantes du fait du caractère abondant, peu farouche et donc facile à chasser des proies, ce qui se traduirait par une extinction de masse notamment des animaux les plus gros²⁶¹. Corrélativement, cette profusion de nourriture favoriserait une croissance rapide de la population pouvant atteindre 1 % par an²⁶². On posera par hypothèse que les phases ultérieures ne se produisent que lorsque le seuil de *carrying capacity* est atteint, ce qui implique un temps de latence entre chaque saut d'île en île. On verra par la suite que cette hypothèse n'est pas toujours respectée car une fois le premier saut insulaire réussi, les suivants tendent à se produire sans qu'il y ait nécessité impérative de les faire.
- La phase d'émigration suivante depuis le nouveau territoire, phase qui inclut implicitement des découvertes et des explorations préalables, nous ramène à la phase initiale de saut d'île en île qu'il soit de type « *island hopping* » ou « *island hopping* ».

La durée de chaque étape de saut insulaire sera donc estimée selon les quatre phases que sont Dpd , Dpe , Dpi et Dpp . Dans ce modèle simple, les variables prises en compte se limitent à la superficie S des fragments de territoire de départ et d'arrivée et à la distance D entre leurs *buffers* marins. La population originelle maximale, tout comme celle de la population seuil de *carrying capacity* sur la nouvelle île, sont en fait estimées à partir de la variable S . La durée totale Dt de chaque saut insulaire entre l'île i et l'île j sera telle que :

[13] *Durée de latence sur une île et de traversée d'un chenal :*

$$Dt(i,j) = (Dpd_1 + Dpe_1 + Dpi_1)/S(i) + (Dpd_2 + Dpe_2 + Dpi_2) D(i,j) + Dpp.S(j).$$

[14] *Idem formule [12] avec tous les paramètres égaux à 1 :*

$$Dt(i,j) = 3/S(i) + 3.D(i,j) + Dpp.S(j).$$

²⁶¹ Cette cooccurrence de la disparition des espèces animales et de l'arrivée de l'homme, qu'il s'agisse de sociétés de chasseurs-cueilleurs ou de sociétés agricoles, s'avère fréquemment vérifiée, que ce soit pour les marsupiaux géants de l'Australie, la mégafaune des Amériques ou les espèces naines d'éléphants et de mammouths dans les îles méditerranéennes.

²⁶² Cette croissance implique la multiplication par 2,7 de la population sur un siècle (trois générations), par 144 en 500 ans (quinze générations) et 21 000 en 1 000 ans (trente générations) ! À titre d'exemple, en supposant l'arrivée de 1 000 Aborigènes sur le mainland australien vers 40000BP, la « *carrying capacity* » de 300 000 habitants de l'ensemble du continent serait atteinte en 575 ans, soit environ dix-sept générations.

Il s'agit d'un modèle géographique simple avec pour vocation de donner un cadre théorique aux comparaisons des temps de migrations ou de dispersions, les durées ne font pas référence à une unité de temps. Pour un cheminement insulaire comportant n îles, la durée totale de la migration sera de :

$$[15] \text{ Durée totale : } D_{\text{totale}} = \sum_{i=1}^{\text{à } n-1} Dt(i, i + 1)$$

(NB : les durées n'ont pas d'unité)

Partant de cette dernière hypothèse simplificatrice sur les paramètres, une comparaison devient possible entre plusieurs routes de migrations interinsulaires, comme par exemple celles partant, l'une de Chine continentale, l'autre de la péninsule malaise jusqu'en Nouvelle-Guinée (voir Figure 70). La route Chine-Nouvelle-Guinée a une durée de 3 187 et celle Malaisie-Nouvelle-Guinée de 1 030 (Figure 72). Cette différence s'explique, pour la première route, par la grande superficie de l'ensemble Philippines-Bornéo (voir Figure 69A) alors que les archipels intermédiaires de la seconde route ont une faible superficie et donc des temps de latence très courts pour atteindre une saturation de la population à son seuil de *carrying capacity* (Figure 72).

Route Chine-Nouvelle Guinée					Route Malaisie-Nouvelle Guinée						
	Saut (i,j)	S(i) km ²	D(i,j) km	S(j) km ²	Dt		Saut (i,j)	S(i) km ²	D(i,j) km	S(j) km ²	Dt
Chine	1	1000*	80	35,8	276	Malaisie	1	1000*	0**	462	462
Formose	2	35,8	45	1024	1159	Sumatra-Timor	2	462	20	0,76	61
Philippines-Bornéo	3	1024	105	171	486	Îles babars	3	0,76	40	4,5	128
Sulawesi	4	171	130	26,3	416	Îles Tanimbar	4	4,5	70	28	239
Moluques	5	26,3	10	820	850	Îles Kaï	5	28	70	820	1030
Nouvelle-Guinée	Total			Dtotal=	3187	Nouvelle-Guinée	Total			Dtotal=	1920

Dt et Dtotal sans unité. S en milliers de km².
** S(1) est supposé égal à 1000 soit un millions de km².*
*** D(1,2) est égal à 0 car les îles de la ligne Sumatra-Timor sont de type IPα.*

Figure 72 : Calcul des durées totales des routes interinsulaires de Chine-Nouvelle-Guinée et Malaisie-Nouvelle-Guinée (NB : les pseudo-durées Dt et $Dtotal$ n'ont pas d'unité).

La comparaison précédente peut paraître formelle puisqu'elle fait référence à des pseudo-durées. Toutefois, elle offre un cadre théorique élémentaire avec des hypothèses simplifiées à l'extrême quant aux migrations ou diffusions entre le continent asiatique et la Nouvelle-Guinée. C'est à juste titre qu'un historien ou un anthropologue fera remarquer que la migration des ancêtres des Aborigènes d'Australie vers 40000 BP s'est sans doute produite alors que le NMM était à - 110 mètres, en suivant probablement le trajet depuis la paléopéninsule de la Sonde jusqu'au palécontinent de Sahul, ce qui diminue le nombre et la largeur de chenaux à traverser. En revanche, les processus de dispersion²⁶³, diffusion (linguistique) et migration protoaustronésiens vers 6000 BP se sont produits dans un contexte géographique proche si ce n'est même identique à l'actuel le long du trajet de Formose aux Îles Salomon et au-delà. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que toute réflexion théorique offre la possibilité d'aborder des phénomènes apparemment différents avec le recul nécessaire aussi bien pour en tirer des ressemblances que pour mieux en cerner les traits distinctifs. Ainsi,

²⁶³ Pour la céramique, élément d'étude fondamental pour les archéologues, il va de soi que les poteries peuvent avoir été fabriquées sur place ou importées. Dans le premier cas, il s'agit d'un phénomène de diffusion d'un savoir-faire, dans le second d'une dispersion d'artefacts liée aux échanges commerciaux. Dans chacun des cas, ces flux peuvent être ou non associés à des migrations.

les deux migrations préhistoriques évoquées procèdent de la même dynamique, qui s'est traduite par des sauts d'île en île par cabotage ou par traversée de chenaux de faible largeur avec intervisibilité d'une terre à l'autre (voir carte de la Figure 59B). Comme nous le verrons ultérieurement, la différence majeure tient à ce que les ancêtres des Polynésiens ont continué leur exploration vers l'est au-delà des îles Salomon, passant d'une navigation côtière à vue (« *island hopping* ») à une navigation hauturière au cap (« *island hoping* »). En raisonnant toujours par analogie, il apparaît que les modalités de migrations maritimes dans les espaces insulaires ne sont pas sans évoquer le phénomène de percolation avec effets de capillarité et transition de phase nous rappelant les conceptions « hydrauliciennes » de P.-G. de Gennes²⁶⁴.

Partant de la connaissance de la structure de l'archipel monde actuel, il devient nécessaire d'en comprendre l'évolution. Comment s'est-il formé ?

« Depuis des millions d'années, les continents se déplacent les uns par rapport aux autres dans une danse endiablée et inexorable, liée à la dérive des continents, connue aussi sous le nom de tectonique des plaques. Si cette notion est aujourd'hui largement utilisée dans notre société, les éléments qui soutiennent cette théorie sont généralement peu, voire pas du tout, connus. » (Wever & Duranthon, 2015)

2.8. La fabrication de l'archipel monde ou la valse des terres émergées

Les terres émergées semblent bien familières à tous ceux qui ont fréquenté nos écoles avec leurs grands planisphères qui nous laissaient croire que notre Terre était plate avec l'Afrique au milieu et l'Europe trônant au-dessus. Sa sphéricité échappait à nos jeunes esprits et son histoire bien plus encore. Elles étaient là, ces terres immobiles, dans l'éternité de l'instant que seul l'enfant ressent. Le temps passant, le monde se fait plus complexe, plus changeant, se transforme et nous offre la sphéricité de la planète sur les petites fenêtres de nos écrans via GoogleEarth. Enfin quoi, à quoi sert de connaître que notre Terre est une sphère et n'a conséquemment pas de centre géographique ? Mais ces terres émergées font partie d'un grand tout et à ce titre ne sont qu'une composante fondamentale de Gaïa. En quittant le domaine d'une géopoétisation de notre planète pour revenir à la compréhension de son fonctionnement, il faut noter que la disposition des fragments émergés sur la sphère y joue un rôle majeur comme le souligne le géoscientifique Shanan Peters²⁶⁵ : « People don't think about it too much, but the arrangement of continents on Earth has a huge effect on ocean currents, atmospheric circulation, how strong the seasons are. A whole range of things about how Earth works is determined by the crust, and that crust moves on geological time scales. »

La notion d'archipel monde fait référence à la fragmentation des terres émergées à l'échelle de la sphère terrestre mais aussi aux échelles plus fines, à tout ce qui fait de ce monde un archipel d'archipels. Ainsi, des ressemblances s'observent entre diverses structures archipélagiques à l'échelle du globe avec ses mainlands continentaux conventionnels et leurs cortèges d'îles et d'îlots, aux échelles régionales (ensemble nusantarien de l'Indonésie et des

²⁶⁴ La « théorie du ruissellement » bien connue des économistes fait usage d'une analogie du même ordre pour expliquer la « percolation » des richesses à travers les couches aisées de la société vers les classes populaires.

²⁶⁵ "As Continents Continue Moving, Study Suggests Effects on Biodiversity", May 18, 2017, STRN Science & Technology Research News, built for STEM communities. Voir vidéo sur la relation entre la fragmentation des terres et la biodiversité marine. <https://www.scienceandtechnologyresearchnews.com/continents-continue-moving-study-suggests-effects-biodiversity/>

Philippines, le Nord-canadien, les Antilles...), aux échelles locales (archipel nippon, îles Britanniques...) et infralocales (archipels du Cap-Vert, des Canaries, des îles Hawaii...). Il vient facilement à l'esprit que les terres émergées s'apparentent à une structure fractale. Les fragments sont de plus en plus fréquents lorsqu'ils sont observés à des échelles plus fines comme nous l'avons vu précédemment à travers une approche fragmentologique qui s'inspire de l'étude des fragments forestiers de Thomas Lovejoy (1979) : Biological Dynamics of Forest Fragments Project), elle-même dérivée et inspirée des travaux de MacArthur et Wilson (1963).

Ce chapitre sera consacré à l'évolution de la fragmentation de l'archipel monde qui dépend à la fois de la géophysique interne responsable de la tectonique des plaques et des phénomènes volcaniques et géomorphologiques associés (météorisation, érosion, transport, sédimentation) et de la géophysique externe, notamment les variations climatiques capables d'impacter fortement le Niveau moyen des mer (NMM) par la formation de vastes inlandsis sur les surfaces continentales et de façon moindre par l'effet de la température moyenne des océans sur la dilatation thermique. Les propriétés de fragmentation des terres émergées en un temps donné résultent donc de l'interaction entre les processus tectoniques, isostatiques, climatiques, eustatiques et géomorphologiques.

Quatre milliards d'années de vagabondage des terres émergées !

Il est possible d'esquisser les grandes lignes de l'histoire de l'archipel monde et de sa fragmentation depuis la formation de la Terre. Les cartes de la Figure 73 résument deux phénomènes : augmentation progressive de la proportion de terres émergées, alternance de phases de regroupement et de fragmentation de celles-ci, dite aussi cycle de Wilson. Les fragments continentaux connaissent des phases de dispersion en plusieurs morceaux s'opposant à des phases de regroupement donnant lieu à la formation de supercontinents. Ainsi, vers 2,5 Ga, apparaît le continent d'Arctica formé par agglomération de cratons plus anciens. Vers 2,3 Ga, il disparaît au profit d'une quinzaine de fragments dispersés sur l'ensemble du globe. Un nouveau regroupement et donc un nouveau supercontinent baptisé Columbia a lieu vers 1,5 Ga suivi par un éclatement en neuf morceaux vers 1,2 Ga. Vient ensuite la formation d'un nouveau supercontinent, Rodinia, vers 1 Ga. Columbia se déformera pour donner naissance au supercontinent Pannotia vers 740 Ma, suivi par le Gondwana vers 500 Ma, puis la Pangée vers 330 Ma. Dans la phase ultérieure, ce dernier supercontinent va se fragmenter progressivement et engendrer progressivement plusieurs masses continentales : Eurasie rattachée à l'Afrique par un isthme, Amérique du Nord et du Sud connectées depuis moins de 3 Ma par l'isthme de Panama, plaque Sahul incluant la Nouvelle-Guinée, l'Australie et la Tasmanie, celle de Zealandia incluant entre autres la Nouvelle-Zélande et la Nouvelle-Calédonie. D'autres morceaux continentaux isolés s'observent à Madagascar et au niveau de la microplaque des Seychelles. Le cas de la plaque antarctique doit être considéré de façon particulière puisque recouverte par un immense inlandsis de plusieurs kilomètres d'épaisseur responsable de son enfoncement. Il en va de même pour le Groenland. Cette évolution complexe suggère des changements drastiques et plus ou moins réguliers de la fragmentation des terres émergées. Les travaux du tectonicien Tuzo Wilson supposent l'existence de cycles de regroupement et de fragmentation dont la périodicité serait de 400 à 600 Ma, alias « ballet des continents », qui se traduit par l'apparition successive de supercontinents (Figure 74). Cette hypothèse fait encore débat, d'autant qu'aucune explication géophysique ne permet de l'étayer. L'époque actuelle correspondrait à un stade de dispersion des terres émergées, sachant que depuis la fin de la dernière glaciation vers 15000 BP, la remontée du niveau des mers a entraîné la submersion de quelques ponts intercontinentaux majeurs et l'ouverture de nouveaux détroits, dont celui de Bering entre l'Eurasie et l'Amérique du Nord et ceux séparant le mainland australien de la Nouvelle-Guinée et de la Tasmanie.

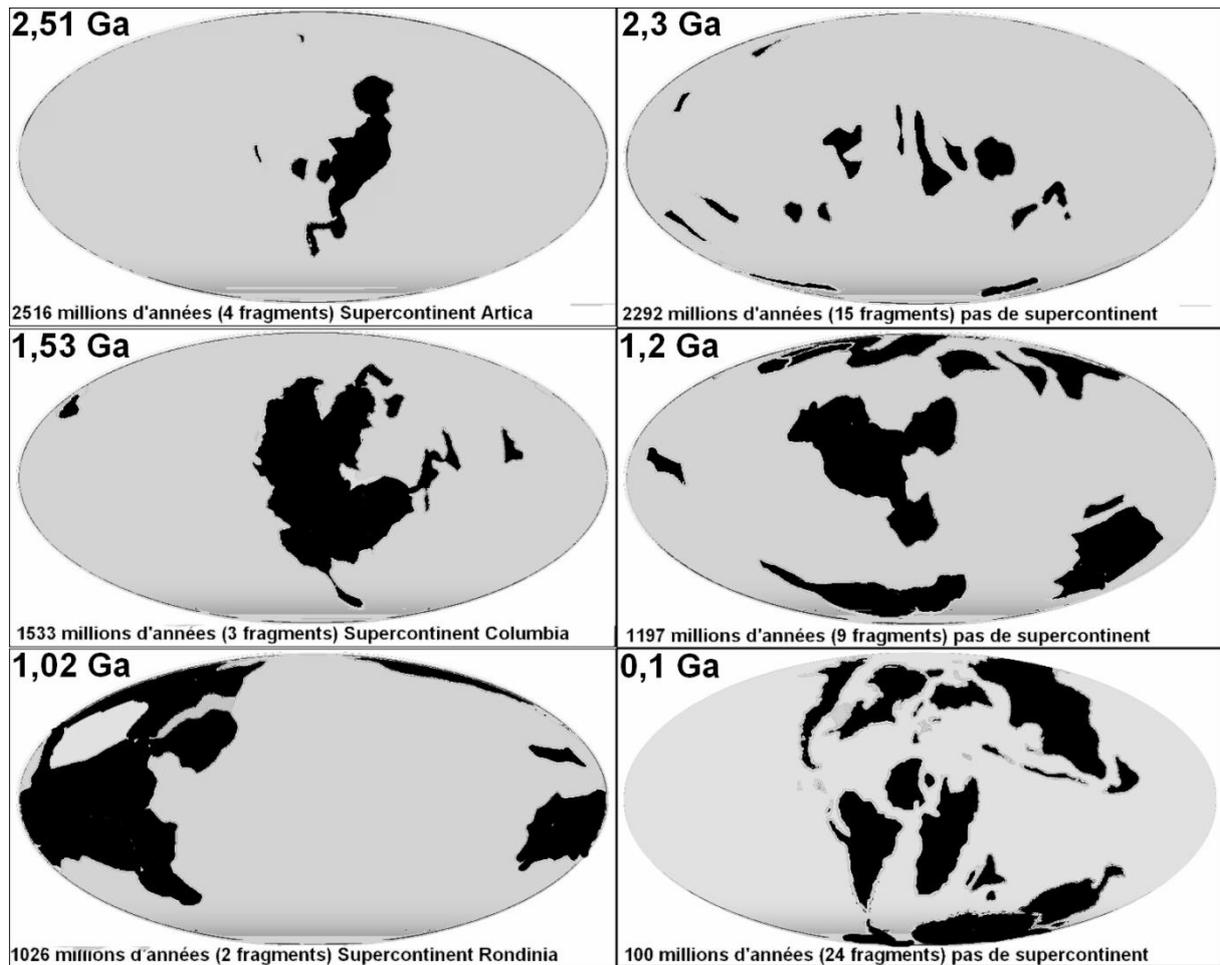


Figure 73 : Quelques étapes de l'évolution des archipels mondes (source PALEOMAP²⁶⁶) et de l'apparition de supercontinents depuis 2,5 milliards d'années.

À gauche : phases de regroupement des terres À droite : phases de fragmentation.

Cette modélisation de l'évolution globale de l'archipel monde depuis la formation de notre planète présente deux limitations. La première tient à ce que les modèles sont de moins en moins fiables au fur et à mesure que l'on remonte dans le temps. Deuxièmement, ils ne permettent pas de représenter les terres émergées plus petites et temporaires que sont les volcans apparus sur les plaques océaniques (volcans intraplaque) ou les fragmentations côtières liées à l'érosion. En effet, les terres émergées précédemment décrites ne représentent que les cratons pour lesquelles on dispose de données et d'observations. Les résultats indiqués obtenus à partir du projet PALEOMAP dans la Figure 75 ne sont donc que des indices d'évolution des propriétés de fragmentation des principaux morceaux cratoniques, y compris la taille relative du principal fragment par rapport à l'ensemble. Ainsi, le maximum de fragmentation s'observe vers 2 Ga lors de la phase Atlantica lorsque les terres émergées ne couvrent que 10 % de la planète. À l'inverse, le minimum s'est produit il y a 500 Ma pendant la période Pannotia. Un simple examen de ces données suggère que les cycles de Wilson se révèlent peu marqués (comparés avec ceux de la Figure 74).

Il faut garder à l'esprit que les milieux terrestres ne commencent à être colonisés par des plantes qu'à partir de 450 Ma. Jusqu'à cette date les reliefs étaient exposés directement à l'action physico-chimique des processus morphogéniques tant en termes de météorisation des

²⁶⁶ Source PALEOMAP Project, Christopher R. Scotese, University of Texas, <http://www.scotese.com/>

roches (thermoclastie, cryoclastie) qu'en matière d'érosion hydrique et éolienne. De ce fait, il est certain que l'arasement des chaînes de montagne en particulier devait être bien plus rapide qu'actuellement.

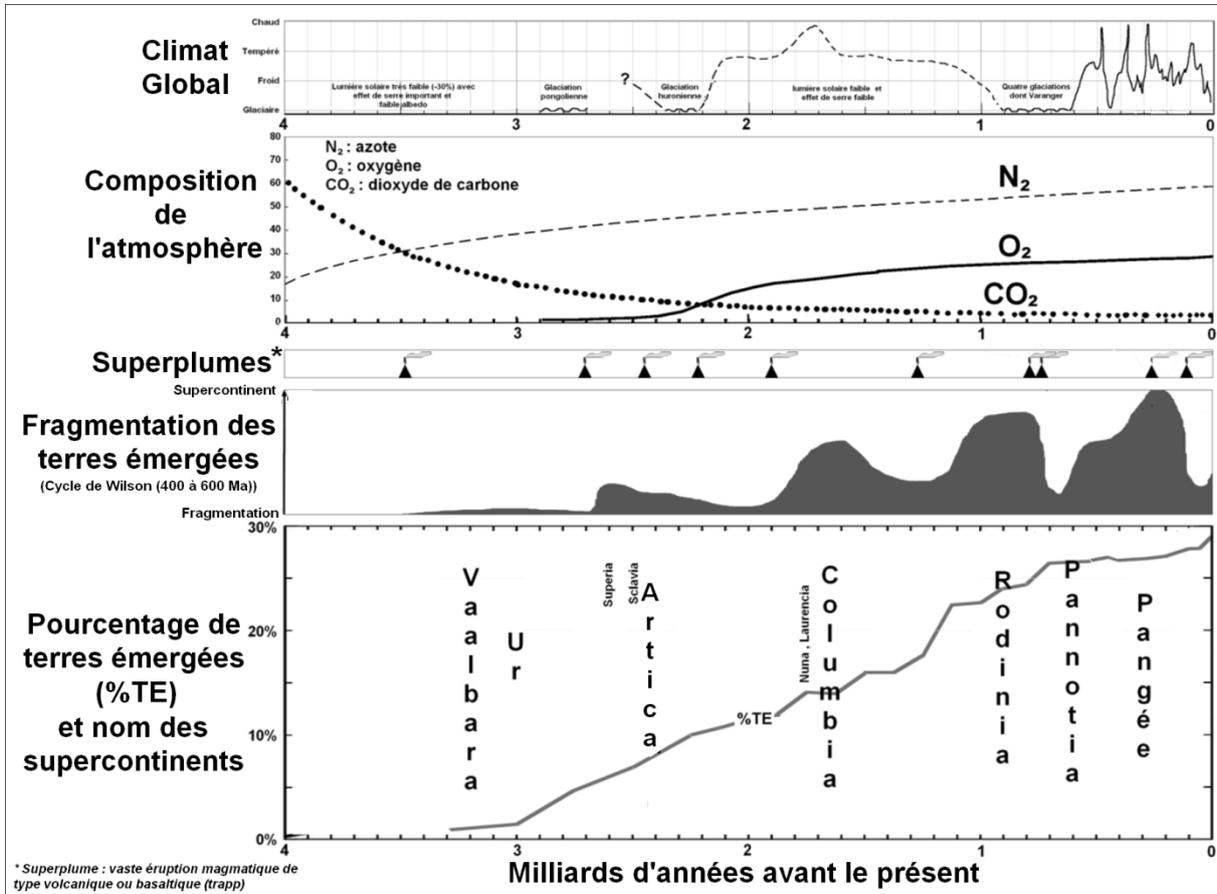


Figure 74 : Géohistoire de l'archipel monde (% et fragmentation de terres) en lien avec les phases éruptives (superplumes), la composition de l'atmosphère et du climat.

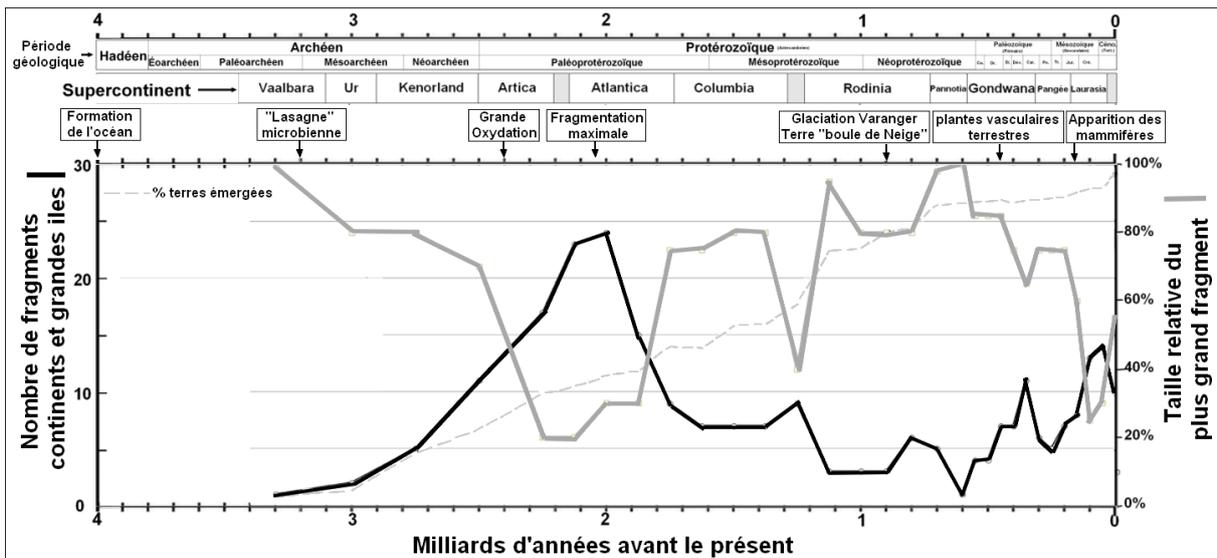


Figure 75 : Évolution de l'archipel monde en termes de surface relative des terres émergées, de nombres de fragments et de taille relative du principal fragment (données PALEOMAP).

La vitesse actuelle de déplacement des plaques tectoniques varie d'1 cm par an vers le nord-est (pour la plaque Caraïbe) à 8 cm par an pour les Philippines vers l'ouest. En supposant le cas d'un craton se déplaçant du pôle jusqu'à l'équateur avec une vitesse moyenne de 5 cm par an, la durée nécessaire pour le faire passer de conditions polaires à un climat équatorial serait de 200 Ma. Les plantes vasculaires existant depuis 400 Ma, cela signifie que la géohistoire climatique de chacun des morceaux du puzzle continental actuel reflète une « dérive » avec des traces de glaciation à des latitudes actuellement tropicales (Afrique du Sud) et inversement des fossiles de forêts sempervirentes aux latitudes polaires (Groenland). Comme indiqué ci-dessus, la position relative des fragments émergés les uns par rapport aux autres, tout comme leur taille et leur position latitudinale, sont autant d'éléments qui vont avoir un rôle crucial sur la courantologie océanique, la zonation climatique et la cryosphère. Partant des données de PALEOMAP, sachant qu'elles tendent à être moins fiables pour les périodes anciennes, il est possible d'analyser l'évolution de la « valse continentale » depuis 3,3 Ga en établissant la répartition des fragments sur les zones climatiques polaires, tempérées et intertropicale (Figure 76A). La distribution zonale des terres doit tenir compte du fait que les trois zones climatiques considérées n'ont pas la même superficie à l'échelle de la sphère : zone intertropicale (ZI) 57,2 %, zones tempérées (ZT) 36,9 %, zones polaires (ZP) 5,9 %. Dans le tableau de la Figure 76B sont indiqués à la fois le pourcentage de répartition des terres sur les trois zones et un indice tenant compte de la surface relative de chaque zone (voir colonnes ZP, ZT et ZI). Une valeur supérieure à 1 signifie que les terres situées dans la zone sont sur-représentées par rapport à une répartition aléatoire. La distribution en fonction des deux hémisphères a connu un maximum pour l'hémisphère nord vers 2,8 Ga (95 %) et vers 400 Ma pour son pendant austral (80 %). La phase actuelle est de 74 % pour le nord en prenant en compte les inlandsis groenlandais et antarctique (Figure 76C). Les régions tempérées émergées ont toujours représenté entre 40 et 60 % de l'ensemble depuis 2 Ga. Cette proportion reste le plus souvent autour de 30 % pour la zone intertropicale. De même, en prenant en compte les surfaces relatives des zones climatiques (Figure 76D), l'analyse démontre que les terres tempérées ($ZT/36,9 \approx 1,5$) et plus encore les polaires ($ZP/5,9 \approx 2$) sont sur-représentées depuis 800 Ma alors que les terres intertropicales sont sous-représentées d'un facteur 2 ($ZI/57,2 \approx 0,5$).

Ces résultats conduisent à penser que la position latitudinale des cratons et de leurs agrégations continentales ne résulterait pas d'un processus aléatoire de dispersion sur la sphère terrestre notamment depuis 800 Ma. Si le fait pouvait se voir confirmé cela impliquerait de reconsidérer l'effet spécifique de la tectonique lithosphérique d'ensemble sur la répartition des plaques continentales. Un point mérite en tout cas d'être mentionné : le début de la sur-représentation des terres polaires et la sous-représentation des terres intertropicales à partir de 800 Ma (Figure 76D) se révèle presque concomitant des glaciations Varanger à partir de 900 Ma (Voir Figure 74). La même concordance de temps s'observe pour les paléoglaciations pongolienne (2,9 à 2,7 Ga) et huronienne (2,4 à 2,2). Toutes choses égales par ailleurs, il est somme toute logique que la présence de grandes terres au niveau des pôles soit un facteur important pour ne pas dire déterminant dans l'apparition de glaciations.

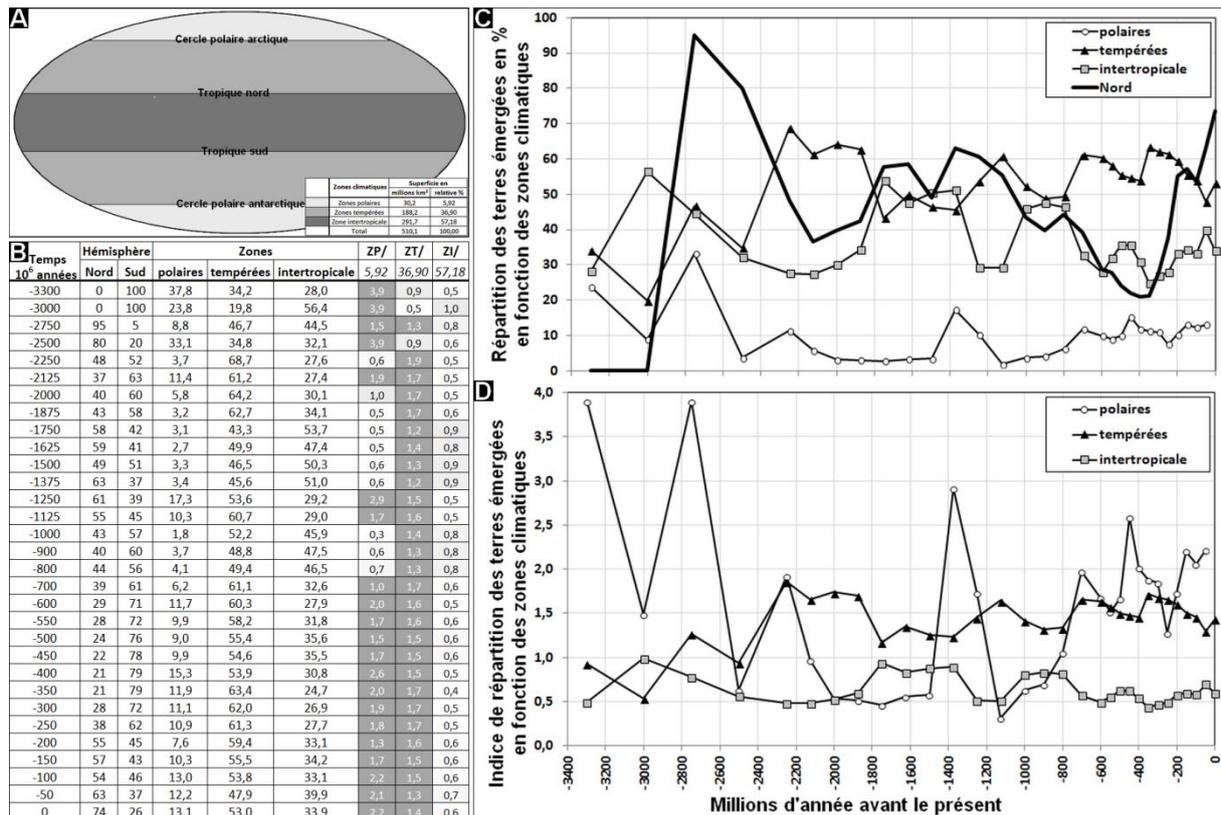


Figure 76 : Répartition des terres en fonction des zones climatiques depuis 3,3 Ga.

(A) Superficie absolues et relatives des zones climatiques.

(B) Tableau de répartition des terres en fonction de l'hémisphère et des zones climatiques avec indices de répartition relative (ZP, ZT, ZI).

(C) Évolution de la répartition des terres en fonction de l'atmosphère et par zones climatiques.

(D) Indices de répartition relative des trois zones climatiques.

Pour ce qui est des « pas de deux », de trois ou plus encore des cratons sur la scène pélagique, nous ne ferons qu'en observer quelques-uns, du moins depuis l'apparition de la vie terrestre il y a 400 Ma : le Groenland et la plaque du Deccan²⁶⁷ (Figure 77). Ces deux fragments continentaux ont tous deux dérivé en parallèle vers le nord avec des phases de déplacement jusqu'à 10 cm/an pour le Deccan entre 100 et 60 Ma. Le Groenland a été en position intertropicale entre 400 et 280 Ma alors que le Deccan était proche du pôle sud se trouvant ainsi englacé au début de cette période. À l'inverse, le développement de l'inlandsis groenlandais n'a débuté que vers 3 Ma en partie du fait de la fermeture du détroit séparant les deux Amériques. La dérive du Deccan à partir de sa séparation de Madagascar vers 90 Ma et avant son encastrement dans la masse continentale asiatique vers 50 Ma a été rapide comme nous l'avons vu, alors que sa voisine malgache est restée immobile. Pendant cette courte phase « insulaire », le Deccan a été affecté par d'immenses épanchements magmatiques de type trapps basaltiques sur plus de 4 millions de km² durant plusieurs millions d'années vers 65 Ma (voir événements « superplumes » de la Figure 74). Du fait de l'ampleur et de la durée du phénomène sans doute lié à un point chaud dans l'asthénosphère, il est probable que cela ait conduit à un « reset » total de la faune et de la flore de « l'île » Deccan, faisant de cette dernière une terre vierge d'échelle continentale pour sa recolonisation. Les données

²⁶⁷ Ou plaque indienne, solidaire de la plaque australienne.

paléontologiques indiquent qu'il y eut une extinction de masse à l'échelle de la Terre à la même période suggérant une relation de cause à effet. Toutefois, l'impact de la météorite du Chicxulub au Yucatan s'étant produite il y a 66 Ma selon les dernières mesures, il s'avère difficile de faire la part entre son effet propre et celui des superéruptions du Deccan sur l'extinction de masse à la charnière entre les ères secondaire et tertiaire.

Cet aperçu succinct de l'évolution de l'archipel monde sur quelques exemples démontre qu'elle peut être déclinée sous la forme d'une géohistoire insulaire de fragments cratoniques dérivant au gré des forces tectoniques majeures que sont la tectonique des plaques affectant la lithosphère et les points chauds de l'asthénosphère. La géologie apparaît donc comme un livre ouvert sur ce passé complexe interagissant avec l'atmosphère, l'hydrosphère et la cryosphère pour générer des formes de terrain et donc une topographie. Le facteur Niveau moyen des mers (NMM) étant fondamental pour les terres émergées et notre propos, il convient d'en faire un examen détaillé.

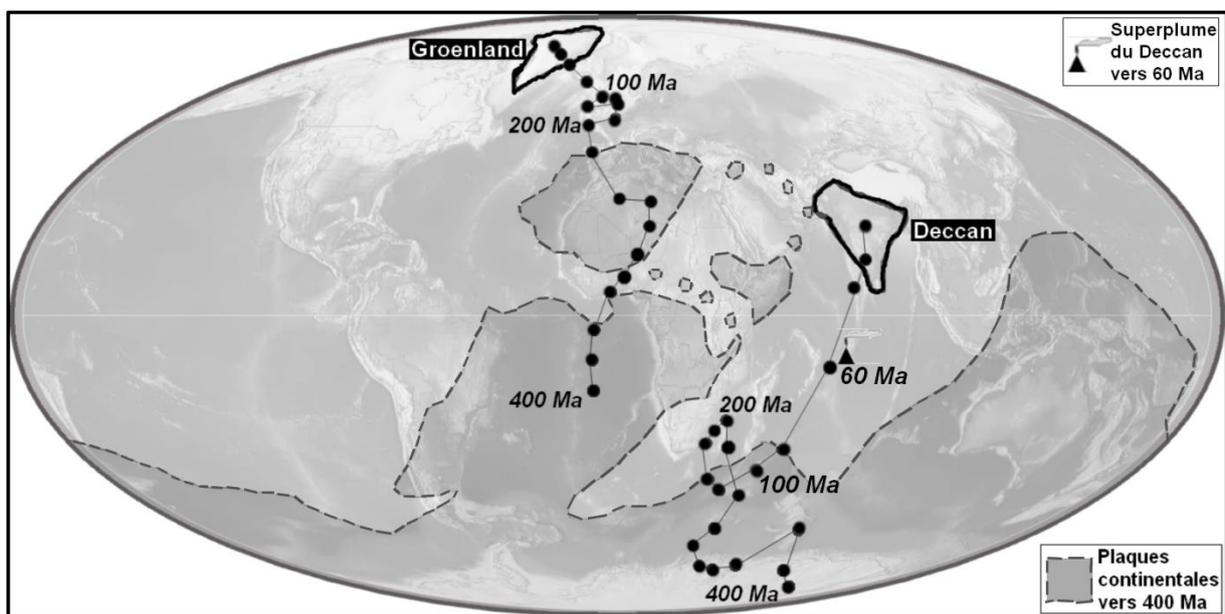


Figure 77 : « Pas de deux » du Groenland et du Deccan sur l'archipel monde depuis 400 Ma.

2.9. Eustasie et variations du Niveau moyen des mers (NMM)

L'eustatisme reflète la masse et le volume d'eau disponible sous forme liquide formant l'océan mondial. Ses variations sont principalement dues à l'évolution de la cryosphère, et notamment des inlandsis continentaux²⁶⁸, et, dans une bien moindre mesure, à la dilatation thermique en fonction de la température. Au risque d'énoncer une vérité de La Palice, il faut rappeler que les changements de niveau marin (ou eustatisme) sont la cause principale d'apparition ou de disparition de terres insulaires puisque par définition elles doivent être « entourées d'eau de toutes parts ». Les mouvements eustatiques s'appliquent au géoïde terrestre soumis à la tectonique des plaques, certaines étant formées de roches denses et

²⁶⁸ Et non de la banquise, formée des glaces d'eau de mer flottantes. Leur fonte n'implique donc pas une montée du NMM, contrairement à ce qui est parfois dit dans des émissions scientifiques !

récentes générant des zones basses occupées par l'océan (« plaques océaniques »), d'autres plus légères et plus anciennes étant partiellement émergées (« plaques continentales »). Les changements du NMM joueront pleinement leur rôle sur les marges des continents sur ce que l'on appelle le plateau continental séparant l'hinterland du talus continental dominant les fosses océaniques. Au rythme des transgressions et des régressions marines plus ou moins importantes et rapides, les trames insulaires se font et se défont avec peu ou beaucoup de changements selon la topographie du plateau continental. Cela rejoint le schéma fonctionnel proposé par P.-G. de Gennes sur la « percolation océanique » entre les terres restées émergées au fur et à mesure de la transgression marine provoquant ainsi des « transitions de phase », cause d'ouverture de nouveaux détroits océaniques et de disparition d'isthmes (voir Figure 16). À cela s'ajoute le constat purement empirique que l'enneigement de reliefs réels se traduit par des courbes altitude-fragmentation fort diverses en fonction de leurs topographies, notamment de la fréquence et de la distribution altitudinale des cols (voir Figure 50).

L'évolution géographique récente de l'archipel monde est essentiellement celle de la dernière transgression dite *flandrienne*²⁶⁹ correspondant à la fonte des inlandsis européen et nord-américain à partir de 19 000 BP, qui s'est traduite par une remontée du NMM d'environ 120 mètres. Son rythme a été maximal tout en restant variable entre 15 000 et 7500 BP avec une valeur moyenne de l'ordre de 1,4 m par siècle (Figure 78A). L'enneigement progressif de la Béringie, l'apparition du détroit de Béring et corrélativement la séparation de l'Amérique de l'Eurasie vers 10500 BP constituent le fait majeur de cette transformation de l'archipel sous l'effet de cette transgression (Figure 78B)²⁷⁰. C'est à la même époque que la Grande-Bretagne devient une île puisque le point le plus bas du chenal la Manche entre Douvres et Calais est de 50 mètres comme celui de Béring²⁷¹. Le cas de la Nouvelle-Guinée déjà évoqué démontre que l'existence de cette île est récente et résulte de la phase finale de la remontée du niveau marin. La profondeur maximale du détroit de Torres entre la Nouvelle-Guinée et l'Australie n'est que de 10 mètres, ce qui signifie que ces deux éléments du paléocontinent Sahul ne sont séparés que depuis 8 000 ans. La déconnexion la plus récente entre deux grandes terres devrait être celle du détroit de Palk entre l'Inde et Ceylan dont la profondeur actuelle ne dépasse pas 5 mètres même si des éléments historiques et géomorphologiques suggèrent qu'un cordon alluvial ait pu maintenir un pont terrestre jusqu'au début de notre ère. Autre fait important, l'ouverture du Bosphore vers 9500 BP a permis le déversement des eaux de la Méditerranée dans le protolac du Pont-Euxin situé 180 mètres en dessous du NMM et donnant ainsi naissance à une nouvelle mer, la mer Noire (Voir 3 en Figure 78). À l'inverse, la mer épicontinentale de la Baltique procède du déversement du protolac formé par la fonte rapide de l'inlandsis scandinave vers la mer du Nord par la dépression de Scanie puis par le seuil du Danemark, vers 8000 BP.

La connectivité respective des fragments immergés et émergés peut se concevoir comme deux graphes duals, les connexions de l'un supposant les déconnexions de l'autre. Hormis la séparation de l'Eurasie et de l'Amérique et l'insularisation de l'ancienne péninsule britannique, la transgression a également provoqué la fragmentation de la péninsule de la Sonde en plusieurs grandes îles (Bornéo, Sumatra, Java, Bali, ...), celle du paléocontinent Sahul formant le mégaarchipel actuel composé du microcontinent australien et des grandes

²⁶⁹ Les côtes de la Flandre et des Pays-Bas depuis le Pas-de-Calais jusqu'à la Frise néerlandaise ont vu leurs rivages évoluer de façon notable pendant la période historique, l'ouverture de la mer des Wadden et la disparition du lac Flévo, soit l'actuel Zuiderzee, entre 500 av. JC et 1000 AD étant les faits les plus marquants.

²⁷⁰ Cette relation simple entre date et niveau marin s'avère largement utilisée dans la littérature scientifique mais aussi dans des ouvrages de fiction ayant pour cadre cette période.

²⁷¹ Voir les données bathymétriques très précises disponibles sur la toile, entre autres The GEBCO_08 Grid, version 20091120.

terres voisines de Nouvelle-Guinée et de la Tasmanie. De même, Hokkaïdo ainsi que l'île de Sakhaline se sont progressivement séparées du mainland sibérien par la submersion du détroit de Lapérouse (15 mètres de profondeur) et du détroit de Tatarie (15 mètres de profondeur) donc 7 500 ans auparavant. Il y a eu également déconnexion du continent pour Formose, la Sicile, Malte, Zanzibar. *A contrario*, les îles japonaises du sud (Honshu, Kyushu et Shikoku) restèrent isolées mais de peu par rapport à Hokkaïdo, le détroit de Tsugara les séparant ayant une profondeur de 140 mètres. De même, les îles de la Wallaceie, notamment les Philippines et Sulawesi, conservèrent leur insularité pour former un « sas insulaire » entre les domaines australien et malais. Enfin, certaines paléoîles ont été totalement submergées, comme les actuels Grands Bancs de Terre-Neuve et le Dogger Bank en mer du Nord, pour ne citer que les plus importantes.

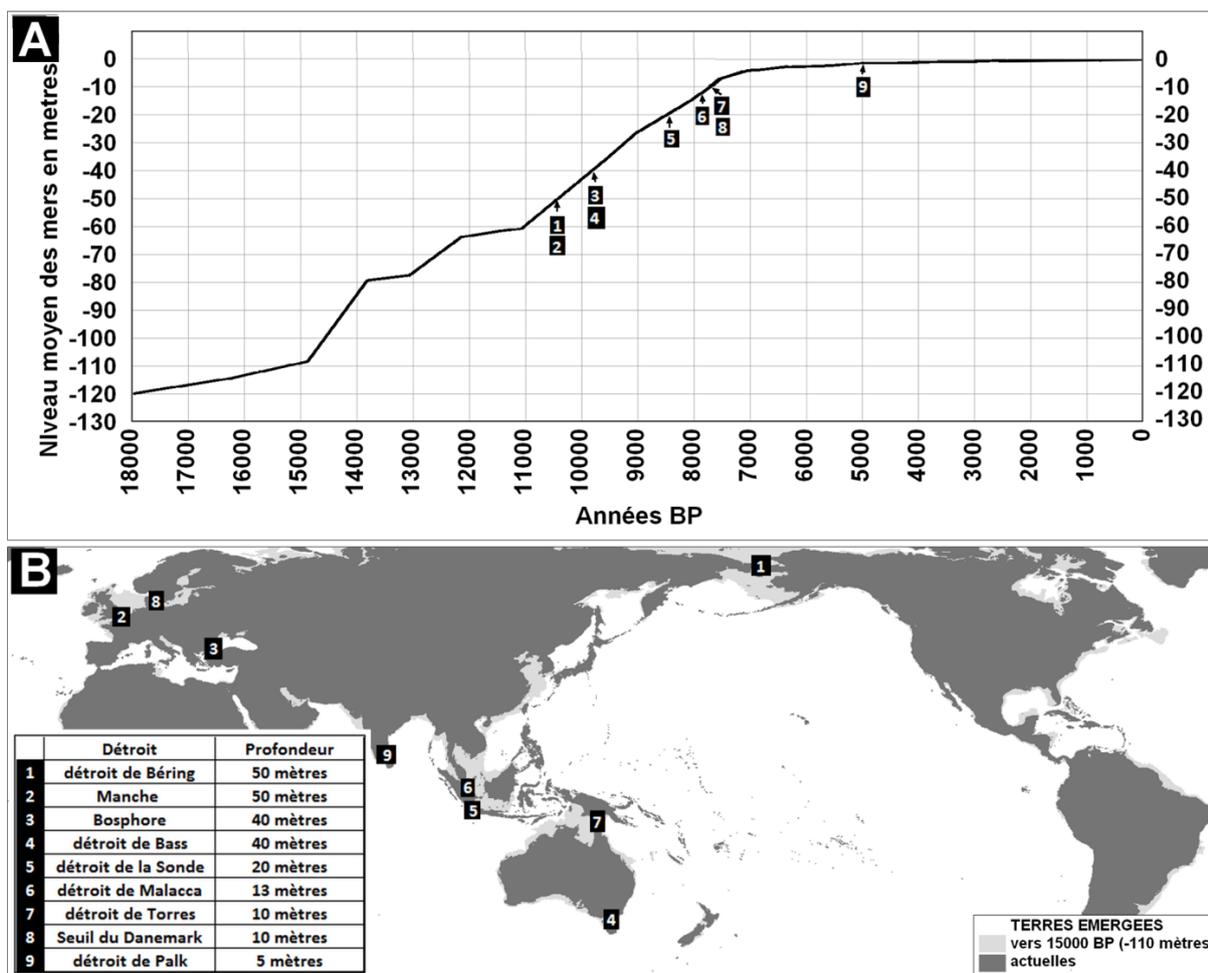


Figure 78 : Évolution de la transgression flandrienne (A) et ouverture des détroits (B).

Le même processus de transgression s'applique à l'échelle locale à une époque qui correspond à la protohistoire, de sorte qu'il y eut interférence entre le lent ennoisement des plaines côtières et les sociétés humaines. C'est à ce titre que sera examiné le cas des îles britanniques (Figure 79A). La déglaciation de ce qui était encore une péninsule a été rapide puisque l'englacement se limitait déjà à des glaciers sur les massifs montagneux septentrionaux dès 15000 BP. L'ouverture de la Manche s'avère contemporaine de l'arrivée des premières tribus de chasseurs-cueilleurs vers 10 000 BP (Seligman & Parsons, 1914). Le plateau des Scilly fut séparé du mainland dès 14 000 BP en formant une paléoîle dont la superficie devait être de l'ordre de 100 km². Aucun fossile datant du Paléolithique n'y a été

trouvé à ce jour mais il est possible qu'il ait été occupé le long du littoral de l'époque qui se trouve maintenant immergé comme c'est le cas pour le banc de Dogger en mer du Nord. En revanche, des traces archéologiques datant de l'âge de bronze et d'activités agricoles pendant l'époque romaine démontrent que les lieux furent occupés au Néolithique. Enfin, les îles Scilly correspondraient aux îles Cassitérides des auteurs gréco-romains²⁷², ce qui en aurait fait des escales commerciales pour les navigateurs carthaginois et massaliotes (Figure 79B). Les quelques éléments historiographiques dont nous disposons sont assez discordants quant à la géographie de l'île ou des îles. Pour certains, elles auraient formé une seule grande île appelée Ennor et dont la plaine centrale aurait été submergée vers 500 AD²⁷³ alors que Strabon, auteur du premier siècle avant JC, évoque un groupe de dix îles disposées en cercle, ce qui n'est pas sans rappeler la géographie actuelle de l'archipel. Le cas des îles Scilly, comme celui de l'ensemble de l'archipel britannique, rend compte du fait que l'élément géo- ajouté au mot histoire ne se résume pas à une juxtaposition d'éléments plus ou moins bien appariés venant des deux disciplines siamoises mais d'une réalité intrinsèque des processus géohistoriques. À l'instar de *L'histoire du climat depuis l'an mille* de l'historien sériel Emmanuel Le Roy Ladurie, une géo(proto)histoire globale de la transgression flandrienne reste à écrire²⁷⁴.

Si tant est que cela soit nécessaire, l'exemple des Îles britanniques et de l'archipel des Scilly illustre bien le fait qu'une élévation du niveau des mers n'implique pas une disparition des îles, contrairement à ce que voudrait une certaine forme de bon sens et conformément aux courbes altitude-fragmentation de la Figure 50. Bien au contraire, la transgression flandrienne a transformé la péninsule britannique en un vaste archipel composé de 2700 fragments insulaires. Un questionnement d'ordre général à l'échelle de l'archipel monde serait de chercher à savoir si cette élévation du NMM a « isolé » plus d'îles qu'elle n'en a submergé. Nous ne disposons pas à ce jour d'une bathymétrie suffisamment détaillée, précise et homogène à l'échelle du monde pour répondre à cette interrogation.

Lorsque la remontée du NMM a été rapide comme ce fut le cas pendant l'Holocène, la fragmentation insulaire actuelle dépend essentiellement du relief des surfaces topographiques avant leur ennoisement. Sachant que le niveau marin s'est stabilisé depuis seulement 5000 ans, les espaces insulaires n'ont pas été totalement remaniés par les processus morphogéniques côtiers. Il en résulte logiquement que les fragments insulaires reflètent encore actuellement le modelé des plateaux continentaux avant leur submersion. N'étant pas lié à un processus particulier comme le volcanisme, les formations coralliennes ou l'accrétion alluviale, il est probable que leur géographie doit être tout aussi variée que les contextes morphostructuraux et climatiques préexistants. Pour vérifier cette hypothèse, treize régions insulaires côtières seront sélectionnées sur l'ensemble des terres ennoyées, soit environ 19 millions de km² (Figure 80A). En supposant que les rivages aient peu changé depuis la stabilisation du NMM vers 5000 BP, les îles actuelles représentent les altitudes supérieures à 110 mètres au-dessus du NMM vers 15 000 BP. Les domaines choisis se localisent sur des plateaux continentaux à l'exception de la mer intérieure de Seto au Japon et de la mer Égée en Grèce. De même, l'ensemble des zones climatiques est représenté depuis les latitudes polaire et subpolaire (archipel Nordenskjöld dans l'Arctique sibérien, Falkland) jusqu'à l'équateur et jusqu'aux tropiques (Seychelles, côte ouest de la péninsule malaise, nord-ouest de l'Australie). La géologie comprend des îles granitiques (Seychelles, îles du Ponant), métamorphiques et magmatiques (Falkland, Chine du Sud, Nordenskjöld) et calcaires (karsts

²⁷² *Kassiteros* signifiant étain en grec.

²⁷³ En ce cas, cette submersion serait contemporaine de celle de la baie du Mont Saint-Michel.

²⁷⁴ Stand sur ce sujet lors de l'exposition du colloque ÎLES 2019 à Brest en octobre 2019

de la baie d'Halong et de la côte dalmate).

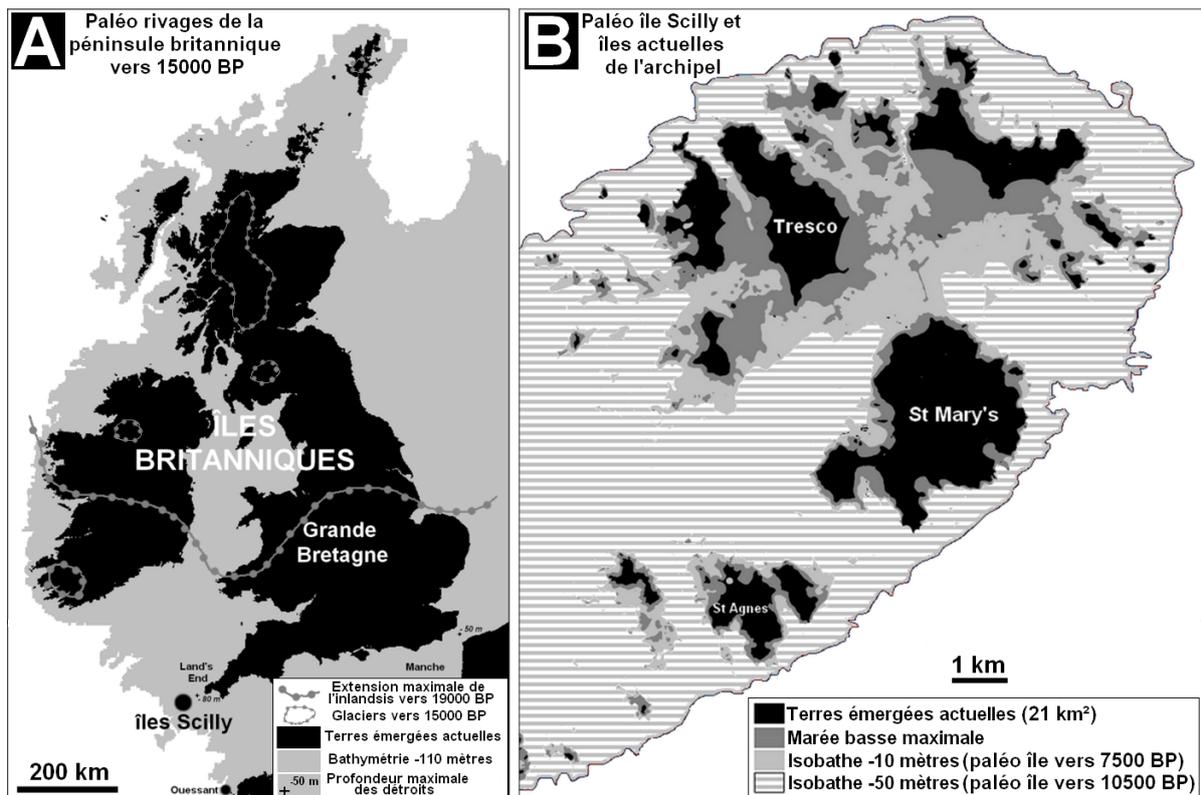


Figure 79 : Fonte de l'inlandsis, transgression flandrienne et ennoiemment progressif de la paléo péninsule britannique (A) et de la paléo île de l'archipel des Scilly (B) Adapté des cartes de l'Ordonnance Survey et des Admiralty Charts, 1990

La diversité des densités insulaires ($Di2$) et des exposants de Korčák des fonctions d'ajustement puissance (b) rendent compte de cette diversité géographique et statistique des zones ennoyées. De par le choix même de régions fortement insularisées nécessaires à l'échantillonnage des superficies, les densités insulaires sont importantes puisque comprises entre 52 et 296 îles/ 10^4 km², sachant qu'elles sont en moyenne de 129 îles/ 10^4 km² à l'échelle mondiale pour les îles péricontinentales (voir tableau de la Figure 64A), à l'exception des Seychelles, dont le plateau continental ne comporte que quelques îles granitiques (21 îles/ 10^4 km²) et du karst ennoyé de la baie d'Halong (1 094 îles/ 10^4 km²). De même, la fragmentation varie de part et d'autre de la tendance mondiale ($b=0,61$, voir Figure 64B) entre 0,42 et 0,85 traduisant respectivement une hypofragmentation ($b<0,5$, Seychelles, mer Égée, côte Dalmate) et une hyperfragmentation ($b>0,7$, baie d'Halong, îles du Ponant, archipel de la Recherche). Les moyennes des deux critères de densité ($Di2$) et de fragmentation (b) sur l'ensemble de l'échantillonnage régional sont proches des valeurs mondiales pour les îles péricontinentales, donc représentatif de la diversité des des types structures insulaires.

Les courbes NS des régions insulaires péricontinentale précisent leur « géodiversité », reflet de leur contexte géomorphologique variés. Certains présentent une fragmentation d'ensemble régulière toutes superficies confondues, avec des valeurs de b indiquant une mésofragmentation ($0,5<b<0,65$) pour les sites côtiers asiatiques tropicaux et subtropicaux du Japon, de la péninsule coréenne (Figure 81B), de la Chine du Sud et de la côte ouest de la péninsule malaise (Figure 81A) avec des densités fortes comprises entre 190 et 296 îles/ 10^4 km². Les îles du Ponant et les îles de la Recherche, situées respectivement au large de la

Bretagne et de l'Australie occidentale à des latitudes tempérées, sont constituées de fragments insulaires de moins de 1 km² ayant les mêmes courbes NS dénotant une hyperfragmentation ($b=0,81$ et $0,85$). En revanche, elles se distinguent nettement les unes des autres pour les terres de plus de 1 km², les îles bretonnes ayant des superficies dix fois plus importantes que celles du littoral du sud-ouest australien. Les deux espaces insulaires sont majoritairement formés de roches granitiques présentant de nombreux rochers à marée basse. Toutes les autres régions, à l'exception des Falkland, présentent des distributions irrégulières qui peuvent prendre des formes diverses.

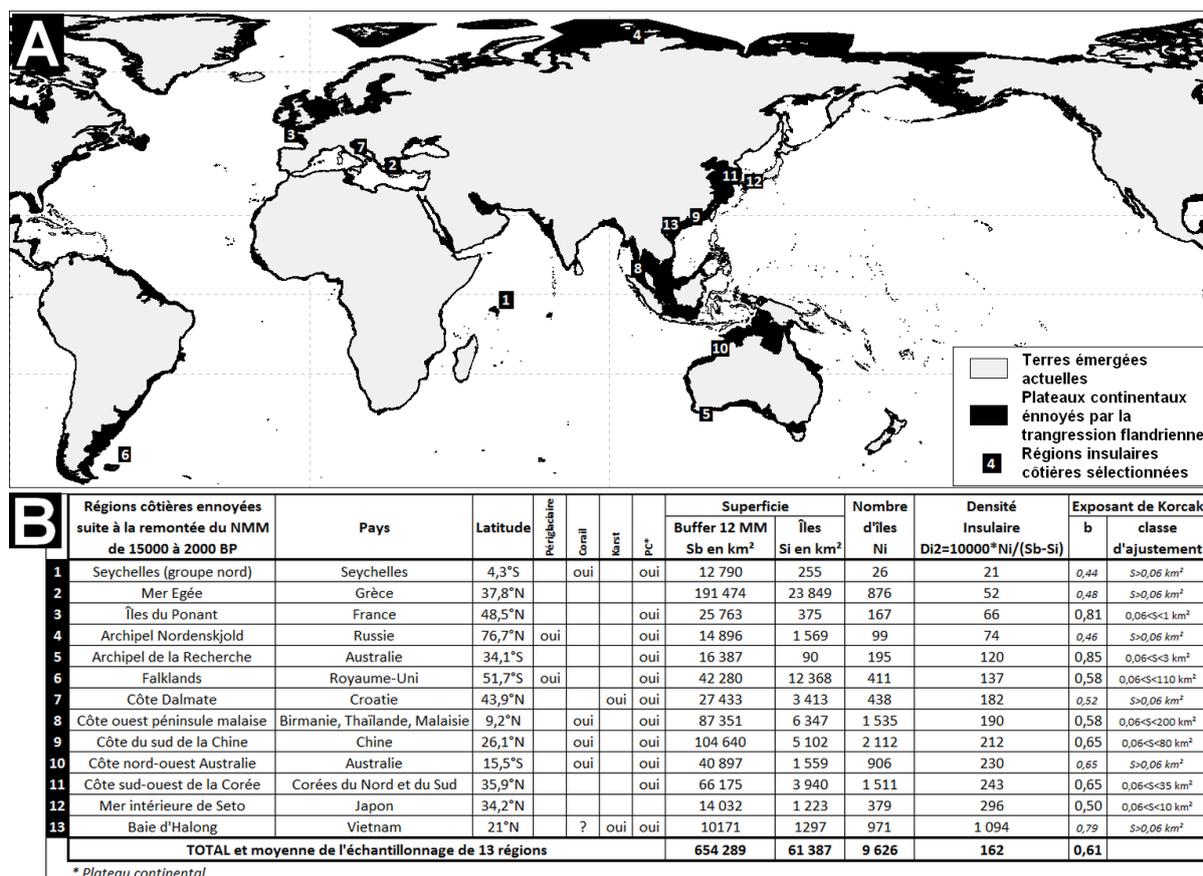


Figure 80 : Ennoisement des zones côtières suite à la montée du NMM de 15000 à 2000 BP.
 (A) Localisation des régions ennoyées comportant actuellement de nombreuses îles.
 (B) Caractéristiques géographiques, géomorphologiques et géostatistiques de quelques régions côtières insulaires pendant la transgression marine.

De ce fait, les valeurs de l'exposant de Korčák b calibrées sur l'ensemble de l'échantillonnage du tableau de la Figure 81C ne sont qu'indicatives d'une tendance générale qui ne prend pas en compte les disparités en fonction des classes de superficie. En ne considérant que ces valeurs « tendanciennes », le contraste le plus marqué apparaît entre l'hyperfragmentation et la forte densité insulaire du karst ennoyé de la baie d'Halong²⁷⁵ ($b=0,79$ et $Di2=1 096$ îles/10⁴ km²) et l'hypofragmentation couplée à une faible densité des Seychelles granitiques ($b=0,44$ et $Di2=21$ îles/10⁴ km²). Les deux sites méditerranéens (pas de marée) de la mer Égée et de la Dalmatie ont des courbes SN fort semblables à la fois dans leur tendance générale à la limite de l'hypofragmentation ($b=0,48$ et $b=0,52$) et dans leurs formes

²⁷⁵ Le nombre précis de 1 969 îles indiqué pour la Baie d'Halong sur plusieurs sites WEB devrait correspondre à un décompte de tous les fragments insulaires de plus de 3 hectares.

sigmoïdes²⁷⁶ avec des tendances mésofragmentaires ($b=0,65$ et $b=0,61$) pour les valeurs inférieures à 1 km². Cette similitude ne peut qu'étonner car les îles égéennes sont développées sur un socle fracturé composé de blocs tectoniques plus ou moins basculés de géologie variable alors que les îles dalmates sont des anticlinaux calcaires karstiques posés sur le fond de la mer épigénique de l'Adriatique.

La densité insulaire des côtes dalmates ($Di=182$ îles/10⁴ km²) est cependant quatre fois plus forte que dans la mer Égée (52 îles/10⁴ km²), et ce sur une zone marine plus étendue (Figure 81D). La courbe de la côte nord-ouest de l'Australie se compose de deux tendances de part et d'autre de la valeur de 2 km², la classe de fragments inférieurs à ce seuil étant à la limite de l'hypofragmentation ($b=0,53$) alors que celle des superficies supérieures est fortement hyperfragmentée ($b=1,08$). La forte densité insulaire (230 îles/10⁴ km²), qui est du même ordre que celle des côtes du sud de la Chine et du sud-ouest de la péninsule coréenne, s'explique par un modelé accidenté fait de formations gréseuses altérées ruiniformes et de roches volcaniques anciennes.

Le dispositif de fragmentation le plus atypique est observé dans l'archipel des Nordenskjöld²⁷⁷ en mer de Kara dans le nord sibérien par 77° N (Figure 82A). Composé de roches ignées anciennes, sa géographie labyrinthique imbriquée l'apparente au Svalbard voire aux îles Féroé, ce qui suggère l'action de glaciers pourtant peu développés (même pendant la dernière période froide) du fait de la faiblesse des précipitations neigeuses. La forme régulièrement concave de sa courbe NS sur l'ensemble de la gamme de superficie allant de 0,06 à 100 km² pourrait refléter un modelé fluvio-glaciaire hérité et ennoyé sans que nous disposions de suffisamment d'éléments pour étayer cette hypothèse²⁷⁸. Cette singularité statistique mérite d'être examinée plus avant. En testant divers ajustements, il s'avère que c'est la fonction logarithme qui décrit le mieux la distribution des fragments insulaires entre 0,06 et 20 km² avec un coefficient de corrélation R² de 0,98 alors qu'il n'est que de 0,93 avec la fonction puissance généralement la mieux adaptée (Figure 82B). En considérant les deux fonctions d'ajustement, il apparaît que la fonction puissance est assez proche de la distribution des superficies comprises entre 10 et 100 km², tandis que la fonction logarithme est manifestement davantage corrélée avec les fragments insulaires inférieurs à 1 km². De plus, on observe que les fragments compris entre 1 et 10 km² occupent une position intermédiaire entre les deux fonctions de distribution. Partant de ce constat, il advient que la gamme de superficies allant de 100 à 0,06 km² procède d'une transition progressive entre une distribution puissance et une distribution logarithmique. Une hypothèse envisageable serait que deux types de forme de terrain hérités d'un modelé périglaciaire antérieur à la submersion ayant des magnitudes spatiales et altitudinales spécifiques interfèrent dans la gamme 1 à 10 km². Une autre possibilité tiendrait à l'effet érosif des plaques de glaces flottantes issues du démantèlement du pack pendant le court été sur les rivages, cet effet étant plus marqué sur les petits fragments insulaires ayant logiquement un ratio longueur de côte/superficie émergée²⁷⁹ plus important que les grands fragments. Les deux hypothèses n'étant pas exclusives, elles constituent une base de réflexion pour expliquer la moindre fréquence des petites îles au regard du modèle le plus fréquent basé sur une distribution puissance.

²⁷⁶ Les fonctions sigmoïdes, dites « fonctions logistiques », sont une variante des fonctions exponentielles avec $Y = 1/(1+e^{-aX})$.

²⁷⁷ À ne pas confondre avec les côtes du même nom situées dans la péninsule antarctique.

²⁷⁸ La bibliographie sur cet archipel sibérien doit sans doute exister mais dans des publications en russe peu diffusées.

²⁷⁹ Voir *supra* indice côtier modifié *lcm* de Doumenge.

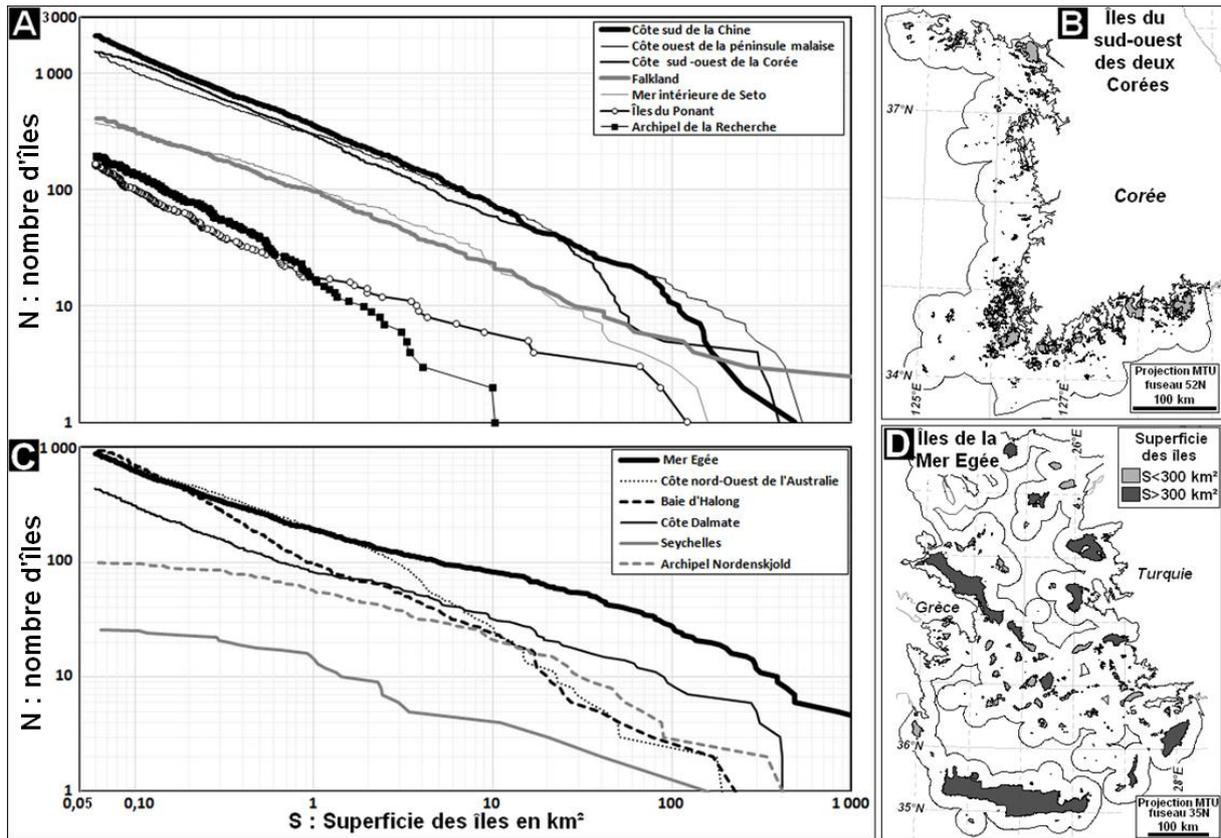


Figure 81 : Courbes SN pour divers espaces insulaires envoyés.
 (A) Régions ayant des distributions statistiques de type fonction puissance ($N = a.S^{-b}$).
 (B) Carte des îles des côtes sud-ouest de la péninsule coréenne.
 (C) Régions présentant des distributions statistiques plus irrégulières.
 (D) Carte des îles de la mer Égée.

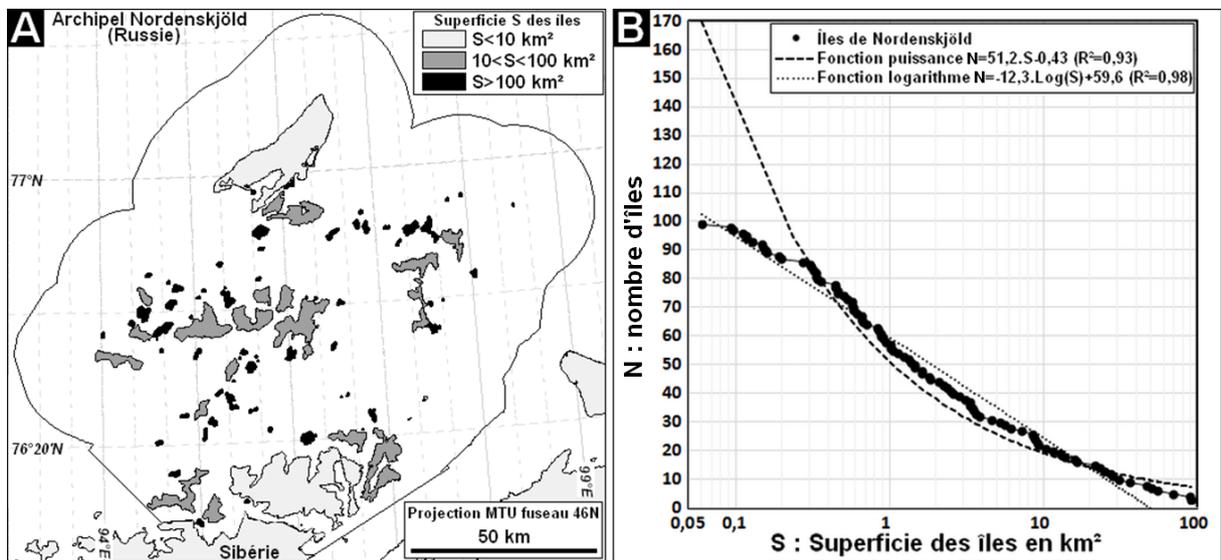


Figure 82 : L'archipel de Nordenskiöld.
 (A) Carte des îles en fonction de leurs superficies.
 (B) Courbe NS en semi-Log pour les îles comprises entre 0,06 et 100 km² avec ajustement de fonctions de distribution de type puissance et logarithme.

Par-delà le particularisme de l'archipel de Nordenskjöld, la résultante insulaire du processus d'ennoiement des paléoîles Falkland et des Seychelles relève tout autant de la donne topographique du plateau continental. Aux latitudes subpolaires, les Malouines font partie du plateau continental de l'Amérique du sud à mais la grande paléoîle Falkland (43 000 km²) n'a jamais été connectée au continent et ne fut que très partiellement englacée lors du dernier maximum glaciaire (Figure 83A). Le fait que le relief d'ensemble soit un plateau explique que les terres émergées actuelles et notamment ses deux plus grands fragments représentent encore le tiers de la superficie originelle (12 400 km²). Sous l'équateur, il y a 15 000 ans, la microplaque continentale des Seychelles formait une grande île de 30 600 km² dont il ne reste de nos jours que 255 km² émergés, soit moins d'1 % de la surface originelle (Figure 83B). Il est donc probable que la Paléo-Seychelles était une vaste plaine que dominaient seulement quelques collines granitiques dont les terres émergées actuelles sont les ultimes témoins. Les courbes SN de ces deux archipels ainsi que leurs fonctions de distribution reflètent le modelé originel développé dans des contextes morphoclimatiques et structuraux bien différents : périglaciation sur d'anciennes roches métamorphiques pour la Paléo-Falkland, équatorial sur socle granitique pour la Paléo-Seychelles. En conséquence, la fragmentation insulaire d'ensemble, davantage marquée ($b = 0,57$) et plus régulière pour les Falkland comparée à celle des Seychelles ($b = 0,45$), traduit une compartimentation sensiblement plus forte de la topographie en régime périglaciaire alors que les formes sont bien plus amples et moins disséquées avec de longs versants convexo-concaves sous un climat chaud et humide. Pour la même raison, la densité insulaire est bien plus importante pour les premières ($D/2 = 410$ îles/10⁴ km²) comparée aux secondes (21 îles/10⁴ km²). Le profil statistique des courbes NS des deux régions correspond davantage au cas généralement observé de distributions puissance qui peuvent être soit assez homogènes sur l'ensemble de l'échantillonnage insulaire, comme c'est le cas pour les Falkland, soit ajustées « par morceaux », pour les Seychelles (Figure 83C). Pour ces dernières, on doit relativiser le net changement de tendance de la pente de la droite — soit l'exposant de Korčák — observé vers 1 km² car il est basé sur un faible échantillonnage insulaire. Un simple examen de la distribution des points insulaires sur le graphique suffit à démontrer que l'étalonnage est discontinu avec notamment un « cluster » d'îles entre 0,9 et 4 km². A contrario, la distribution des superficies pour les Falkland ne présente qu'un léger changement de tendance également vers 1 km² mais il procède d'un large échantillonnage insulaire régulièrement réparti²⁸⁰.

Concernant l'interprétation de ces changements de tendances, une fois encore nous en sommes réduits à quelques pistes de réflexion plutôt qu'à des conclusions fermes et définitives. Dans le cas du plateau des Falkland, le cortège insulaire entourant les deux grandes terres seraient des buttes-témoins plus ou moins érodées témoignant de la dissection de son talus. Pour les Seychelles, il est envisageable que des différences de lithologie et de fracturation d'un bloc tectonique à l'autre du socle continental aient conduit à des modelés contrastés par érosion différentielle. Toutefois, ces deux hypothèses, très générales, ne permettent pas d'identifier de façon précise des familles de formes de terrain ayant une dépendance d'échelle²⁸¹ se traduisant par des discontinuités statistiques.

Les lignes de rivages actuelles, et celles des îles péricontinentales en particulier, s'avèrent donc directement liées à la dernière transgression marine de type glacio-eustatique mais sont également dépendantes des mouvements verticaux de la lithosphère se manifestant

²⁸⁰ L'aspect méthodologique sera détaillé dans le chapitre géomorphologie des domaines insulaires.

²⁸¹ La « dépendance d'échelle » des formes de terrain notamment glaciaires est clairement exposée et analysée dans le chapitre « Landform size-frequency distributions » d'Evans & McClean (1995) p. 131.

par l'affaissement ou la surrection par isostasie, notamment dans les zones anciennement englacées, d'où le terme de glacio-isostatisme.

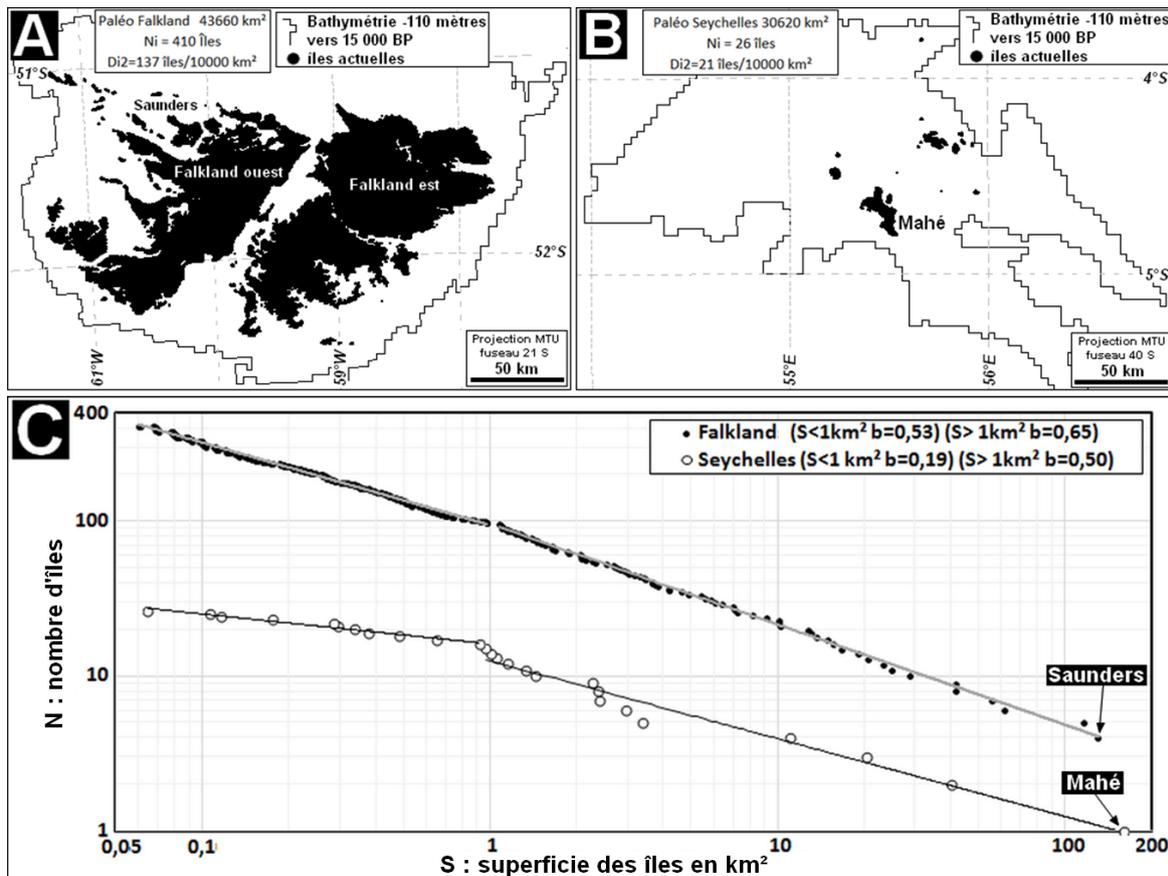


Figure 83 : Ennoiement des paléoîles Falkland et Seychelles.

(A) Archipel actuel des Falkland par rapport à la Paléo-Falkland.

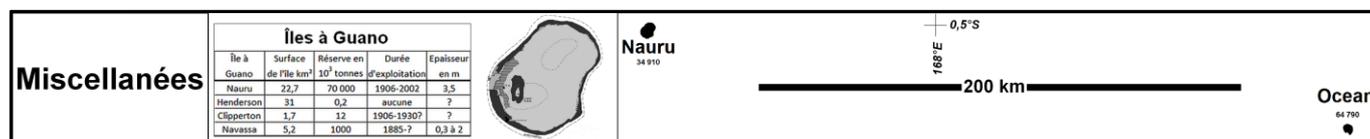
(B) Archipel actuel des Seychelles par rapport à la Paléo-Seychelles.

(C) Courbes NS et exposant de Korčák b pour les Falkland et les Seychelles actuelles.

2.10. Isostasie et mouvements verticaux de la lithosphère

La géotectonique se traduit par des mouvements horizontaux déjà évoqués mais aussi par des réajustements verticaux de la lithosphère. De fait, certaines zones de collision entre deux plaques océaniques se traduisent par l'émergence de portions océaniques de la lithosphère, donnant ainsi naissance à des îles avec une géologie spécifique. L'isostasie se trouve étroitement liée à la tectonique des plaques à travers les phénomènes d'enfouissement de portions continentales ou océaniques du manteau qui vont modifier l'équilibre local des pressions sur l'asthénosphère. D'autres processus peuvent également venir perturber l'isostasie locale soit par perte de charge (érosion, mégaglisements de terrain), soit par adjonction de nouvelles masses (accumulations sédimentaires, volcans, trapps basaltiques). Pour notre objet, les deux principaux phénomènes responsables de modification de l'équilibre isostatique de la lithosphère sont l'orogénèse responsable de la formation des chaînes de montagne et la formation puis la fonte de vastes calottes glaciaires.

Le cas des îles volcaniques au droit des dorsales océaniques (Islande) et des intraplaques (Hawaï) est un bon exemple pour comprendre l'isostasie et l'évolution des îles qui en découle. La masse de roches volcaniques qui provoque un affaissement local du plancher océanique va être progressivement érodée et provoquer un allègement qui provoque à son tour une remontée du socle. Il s'agit là d'un équilibre dynamique entre l'érosion d'une part et la surrection corrélative d'autre part. Si le phénomène de subsidence domine, l'île devient un plateau sous-marin ou guyot qui a la forme d'un cône tronqué. Le fond du Pacifique est constellé de reliefs de cette sorte auxquels s'ajoutent une myriade de monts sous-marins²⁸². À l'inverse, lorsque le soulèvement est plus rapide que l'ablation, une île plate émerge à nouveau. Dans la zone intertropicale, cette position à fleur d'eau se traduit par la formation d'îles coralliennes soulevées, dont l'îlot Henderson à proximité de Pitcairn, Nauru et Ocean, ces deux dernières étant des îles à guano (Voir ci-dessous).



Les processus volcaniques et les ajustements isostatiques subséquents sont à l'origine de la plupart des îles et archipels disséminés sur les espaces océaniques, qui dans le Pacifique (archipel de la Société, Samoa...), qui dans l'océan Indien (Mascareignes, Comores...), qui dans l'Atlantique (groupe de Tristan da Cunha, îles du Cap-Vert). Il convient de revenir sur le cas des îles coralliennes émergées qui sont doublement des reliefs postiches puisque leur existence procède de l'empilement de formations coralliennes d'origine biologique sur un substrat volcanique d'origine magmatique, l'ensemble reposant sur le plancher océanique. Ces îles ont une morphologie, une topographie et un environnement spécifique dans la zone intertropicale, les îles coralliennes les plus septentrionales étant les Bermudes (32° 17' N) et la plus méridionale l'île de Lord Howe (31° 33' S). Les formations coralliennes ayant une extension, une épaisseur et une densité faible n'interviennent que de façon marginale dans l'équilibre isostatique.

En revanche, les inlandsis qui se développent sur les cratons continentaux au moment des périodes glaciaires ont une épaisseur pouvant atteindre plusieurs kilomètres sur plusieurs millions de km² (Figure 84A). De nos jours, celui de l'Antarctique a plus de quatre kilomètres d'épaisseur à son apex pour seulement trois kilomètres pour le Groenland. Comme signalé précédemment, le contraste entre les parties est et ouest des continents s'observe sur la latitude atteinte par les inlandsis (Figure 84B) jusqu'à 40° N pour la partie est de l'Amérique du Nord (Indiana et Ohio), 48° N dans sa partie ouest (Seattle) et 52° N en Europe (sud du Pays de Galles et Brandebourg). La même dissymétrie apparaît pour la banquise qui s'étendait jusqu'à 52° N à l'est de Terre-Neuve et 56° N au nord de l'Irlande.

Le point notable au regard de la genèse des îles est celui de la surrection du fond marin ou rebond isostatique postglaciaire (RIPG) par perte de charge sur des portions de plaque continentale y compris le plateau continental. L'exemple du soulèvement de l'ensemble de la péninsule scandinave et du fond de la Baltique servira à illustrer le propos. La fonte de l'inlandsis fenno-scandien (Figure 85A) a été rapide et s'est achevée vers 8000 BP (Peltier, 1998, p. 626). Toutefois la disparition de la masse englacée pesant sur le socle ne signifie pas

²⁸² Il y a plus de 30 000 édifices volcaniques de type *seamount* de plus de 1000 mètres de commandement par rapport au plancher océanique répartis sur tous les océans (Source Base de données Yesson, 2011).

pour autant l'arrêt du Rebond isostatique post glaciaire (RIPG) mais bien au contraire sa cause. En effet, la forte inertie du socle et du manteau fait que l'ensemble de la péninsule et de ses marges sont encore affectées par une remontée qui peut atteindre 1 cm/an notamment sur la mer épicontinentale qu'est la Baltique, dont la profondeur ne dépasse pas 100 mètres. En conséquence, le fond marin émerge et continue à émerger, donnant ainsi naissance à des myriades d'îles. Ce phénomène peut paraître marginal alors qu'il est responsable de la genèse d'une géographie insulaire unique dont les îles Aaland, entre la Finlande et la Suède, constituent l'exemple le plus achevé. C'est sur cette marqueterie de terres et de chenaux qu'est observée la plus forte densité d'îles. À l'échelle du monde, et contrairement à ce que voudrait l'opinion qui croit que c'est dans la zone tropicale que l'on trouve le plus d'îles, force est de constater que les latitudes circumarctiques sont celles qui en comportent le plus (voir Figure 6). Plus encore, le pic de fréquence se situe à la latitude de la Baltique et des Aaland en particulier.

Le RIPG correspond à la partie centrale des anciens inlandsis associée ou non à des mers épicontinentales comme la Baltique ou la Baie d'Hudson au Canada. Sur cette mer intérieure nord-américaine, le relèvement du fond marin est du même ordre que celui de la Baltique, soit 1 cm/an, mais il était encore de 6,5 cm/an il y a 6 000 ans (Hilaire-Marcel, 1976). Dans l'hémisphère sud, c'est au sud du Chili que ce phénomène s'observe avec des valeurs du même ordre suite à la fonte de la calotte glaciaire qui occupait alors l'ensemble de la chaîne des Andes à ces latitudes (Figure 85B). La Figure 84 prouve qu'il existe une relation étroite entre l'extension des anciens inlandsis nord-américain et européen et la géographie actuelle des îles frangeant ces deux masses continentales. Les phénomènes d'émersion isostatique au centre et de découpage des côtes en fjords emboîtés avec des îles à la périphérie se traduit par des « signatures insulaires » spécifiques : archipels formés de myriades de petites îles (baie d'Hudson et baie de James, côtes nord de la Baltique), îles encastrées dans des péninsules, séparées par un labyrinthe de chenaux marins (côtes de la Colombie britannique, du Labrador, de la Terre de Baffin, du Groenland, de l'Islande, de l'Écosse, de la Norvège, du Spitzberg/Svalbard, de la Nouvelle-Zemble). Ces deux types de structure se retrouvent peu ou prou dans le Sud-chilien bien que la glaciation soit en l'occurrence liée à une chaîne de montagnes. Ces processus sont la cause majeure de la sur-représentation des îles entre les latitudes 50 et 70° N. Elle est évidente sur le graphique de la Figure 6A. En revanche, la paléoîle des Falkland et la Patagonie argentine n'ont pas été englacée du fait de la faiblesse des précipitations neigeuses.

Les mouvements eustatiques et isostatiques apparaissent étroitement liés à la dynamique de la cryosphère, elle-même dépendante du climat et de la répartition des terres émergées. Le système appliqué à TOA, y compris lithosphère et cryosphère, est donc un tout fonctionnel dont les domaines ne peuvent être distingués que pour des raisons d'ordre formel ou pratique. À ce titre, les Modèles de circulation générale (MCG) servant à simuler des projections climatiques reflètent concrètement la nécessaire intégration géotemporelle de processus d'échelles et de cadencages différents. De ce système naissent des formes de terrain et des processus morphogéniques en équilibre dynamique, au cœur de la géomorphologie. Les îles ne sont que la partie émergée d'une longue histoire.

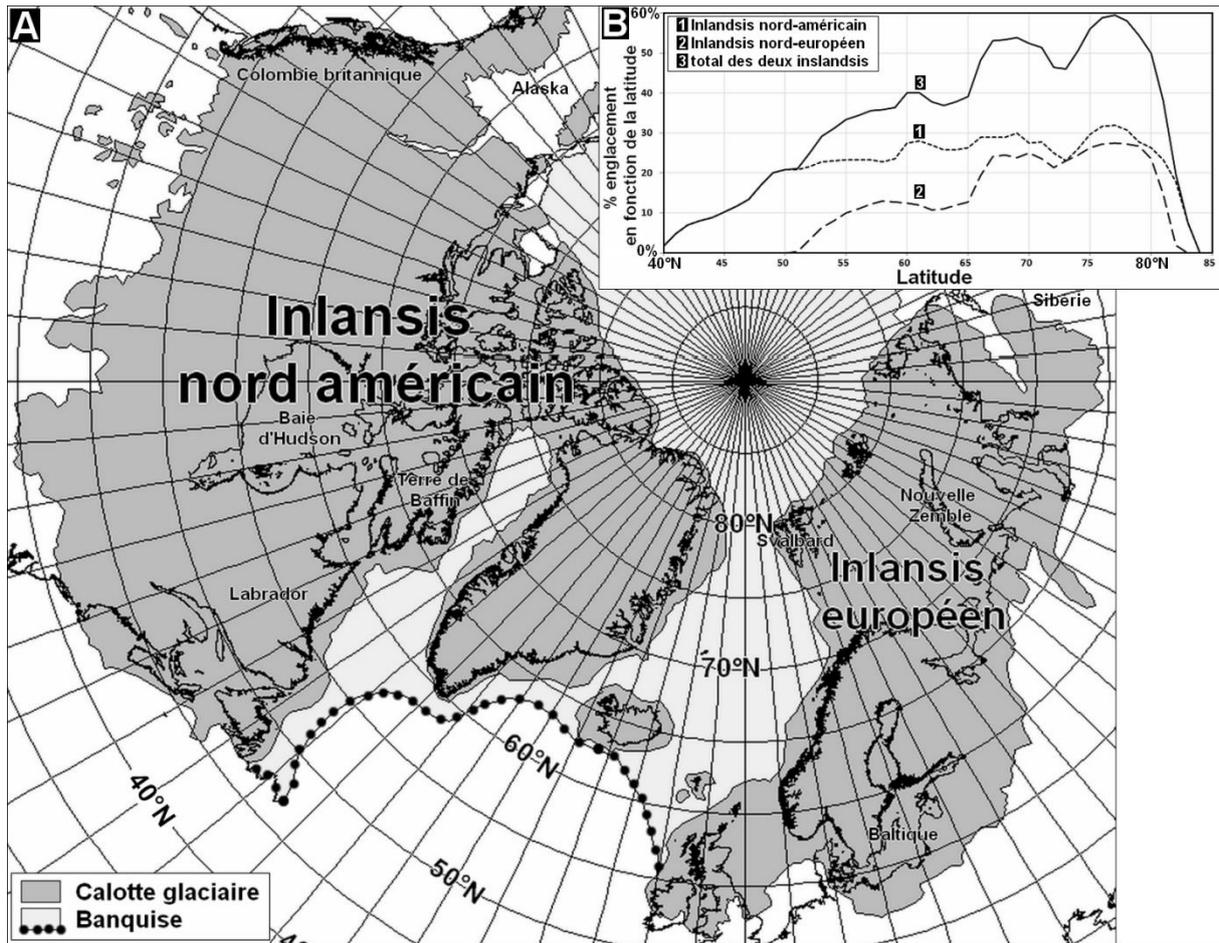


Figure 84 : les inlandsis lors du dernier maximum glaciaire (15000 BP).
(A) Extension maximale. (B) Proportion de zone englacée terrestre en fonction de la latitude.

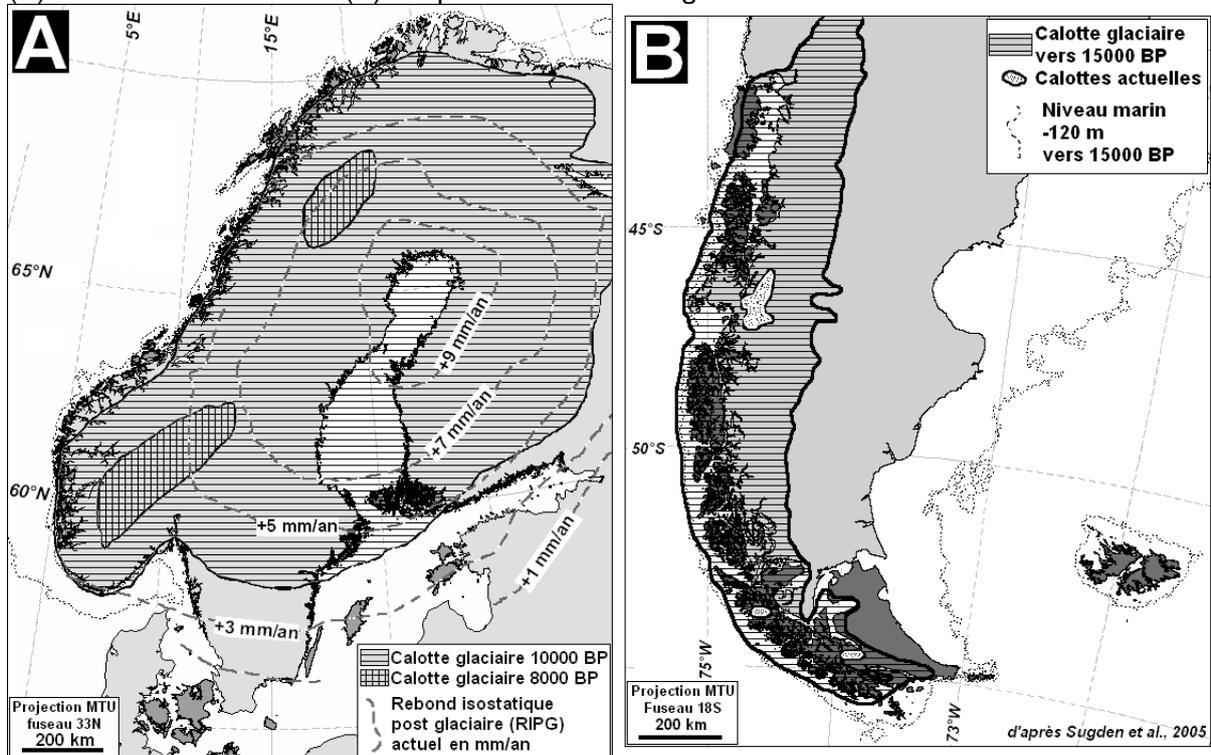


Figure 85 : Évolution des calottes glaciaires pendant l'Holocène.
(A) Fonte de l'inlandsis scandinave et RIPG actuel.
(B) Inlandsis sud andin vers 15 000 BP (Sugden & al., 2005)

« Rondes et pleines comme un œuf, découpées et compliquées comme un continent en réduction, atolls ou îles gigognes, solitaires ou archipeliques, les îles nous donnent d'abord à lire leurs formes, leurs contours, que nous soyons lecteur de carte ou Robinson grimpé sur une colline concluant d'un coup d'œil circulaire : "C'est bien une île !" »
(Batho, 1987, p. 10)

2.11. Géomorphologie et paysages insulaires

Les littoraux composant la zone amphibie entre terre et océan procèdent d'interactions entre divers processus continentaux et marins qui les rendent tout particulièrement complexes et dynamiques. De cette situation naissent quantité de paysages qui ne cessent de nous ravir, depuis le haut des îles ou depuis le large. Terres infimes et mers immenses s'associent pour nous livrer le meilleur d'elles-mêmes dans une double dialectique du grand et du petit, de l'immobile et du mouvant (Voir Figure 1), dont le présent chapitre s'inspire partiellement en se limitant à la formation et à l'évolution des domaines insulaires côtiers et hauturiers et non des littoraux en général²⁸³. À ce titre, les îles deltaïques peuvent faire question puisqu'elles résultent en premier lieu de la décantation de sédiments apportés par les fleuves et les rivières. Elles ne sont que marginalement océaniques, les courants côtiers remaniant ces accumulations alluvionnaires en dessinant un entrelacs amphibie de dépôts fluvio-marins. D'une façon générale, les rivages constituent par excellence l'endroit où s'expriment les interactions entre terre, océan et atmosphère :

« Beaches and the coastal zone occur at the interface between the three major natural systems at the earth surface atmosphere, ocean and land surface. Processes operating in this three systems are responsible for shaping the coastal zone, and the interaction between these sets of processes makes the coastal zone an extremely dynamic one. »
(Davidson-Arnott, 2010)

Pour ce qui est des îles, il en ressort que de nombreux points des littoraux sont en quelque sorte en ballottage entre l'insularité, la péninsularité voire l'inclusion complète dans la masse du mainland comme il en va par exemple des côtes du Languedoc avec les hautes collines du Mont Saint-Loup près du Cap d'Agde et du Mont Saint-Clair près de Sète maintenant empanachés de lagunes et de cordons sableux mais qui furent autrefois insulaires. Il nous faut donc préciser la géomorphologie côtière, notamment celle du plateau continental exposé directement aux effets des régressions et transgressions marines, à l'action des vagues et des courants et à l'évolution des bilans sédimentaires marins et fluviaux.

En introduction, un modèle théorique de la topographie des zones littorales et insulaires sera proposé combinant plusieurs formes simples de relief et en supposant un niveau marin constant et l'absence de mouvement isostatique. Trois types élémentaires de forme de terrain de magnitudes différentes²⁸⁴ seront définis *a priori* :

- Un plan incliné pouvant correspondre à une plaine littorale et à son prolongement en mer sous la forme d'un plateau continental (R1, Figure 86A) ;
- Une surface formée par d'amples bombements du socle, assimilable à une

²⁸³ Voir aussi Concernant la dynamique des littoraux en général, le lecteur se reportera utilement à l'ouvrage « Géographie générale » de l'encyclopédie de la Pléiade (Journaux, Deffontaines, & Delamarre, 1966, pp. 781-845)

²⁸⁴ Par magnitude, il faut comprendre des espaces correspondant à des puissances de 10. Cela s'applique également aux échelles temporelles qui peuvent être comprises entre la dizaine de millions d'années et le millénaire.

- pénéplaine présentant des ondulations d'échelle régionale (R2, Figure 86B) ;
- Une topographie caractérisée par un microrelief de même ordre que ceux générés par un modelé fluvial ou des laisses morainiques sur socle (R3, Figure 86C).

Pris indépendamment les uns des autres, chaque scénario R1, R2 et R3 génère un paysage spécifique, la taille des fragments insulaires reflétant l'échelle des formes du socle. Leur principal intérêt tient cependant à ce qu'ils permettent, en les combinant (R1 + R2 + R3), de générer un transect composite dont la topographie dépend des trois types de relief élémentaires donnant naissance à quelques grandes îles et plusieurs îlots sensiblement plus petits (Figure 86D). En transposant le transect dans un plan géographique et en assimilant les fragments émergés à des îles circulaires, l'archipel ainsi formé comporte trois grandes îles de magnitude comparable au scénario R2 et de multiples îlots dont l'échelle est celle des microreliefs du scénario R3, la pente d'ensemble du scénario R1 ne faisant que modifier ce dispositif en termes de superficie le long de l'alignement insulaire (Figure 86E).

Comme dans des cas réels, l'analyse des distributions statistiques des tailles de fragment dans un espace virtuel (Figure 85E) permet de distinguer trois grands fragments de leur cortège de vingt-neuf petits fragments. Les premiers sont principalement liés au relief R2, les seconds au relief R3 (Figure 85F). Il faut remarquer que ce jeu de données théoriques ne présente pas la même distribution statistique que celle établie sur des données observées. En effet, la méthode nombre-surface (NS) de l'exemple théorique donne comme loi d'ajustement un modèle linéaire ($N=a.S+b$) alors que ce sont des lois puissances ($N=a.S^{-b}$) qui s'avèrent les plus souvent adaptées pour décrire les phénomènes insulaires réels. Cette différence pourrait être liée au mode de définition par transect, donc en 1D de notre exemple, alors qu'une simulation des fragments insulaires en 2D à partir de surfaces 3D aurait probablement conduit à des distributions de type puissance et non linéaire (Cf. (Mandelbrot B. , 1975b)). Notre propos n'étant pas ici méthodologique mais d'ordre conceptuel, le fait ne sera que mentionné même s'il mériterait plus d'attention. Il n'en demeure pas moins que cette dichotomie marquée entre grands et petits fragments simulés rejoint les observations faites sur des régions insulaires bien réelles notamment en mer Baltique et en Méditerranée (Voir Figures 37 et 38), ce qui donne un certain fondement à l'hypothèse d'emboîtement d'échelle des formes de terrain.

En procédant par analogie avec la physique, le plan incliné R1 peut s'interpréter comme n'étant que la partie d'un « signal » orographique de grande ampleur comme la surface d'un craton, d'un bourrelet liminaire, d'un piémont ou d'une pénéplaine d'échelle continentale. Toutes choses égales par ailleurs, plus la pente locale de ce « macrorelief » sera forte plus les autres « signaux » de haute fréquence spatiale et de faible amplitude tendront à se « brouiller ». À l'inverse, une pente faible du signal « basse fréquence » du macrorelief comparativement à des signaux méso et microrelief de plus forte fréquence et amplitude fera que son rôle deviendra négligeable dans la structure statistique et géographique finale. Le même raisonnement s'applique pour la combinaison des deux signaux méso et microrelief. En somme, le « signal » topographique complexe combinant plusieurs signaux élémentaires se traduit en termes insulaires par des fragments émergés dont les propriétés peuvent être peu ou prou analysées par diverses méthodes plus ou moins élaborées, celles de Korčák et des densités insulaires étant parmi les plus faciles à mettre en œuvre et à interpréter²⁸⁵.

²⁸⁵ Nous avons fait le choix de ne pas utiliser des approches algébriques ou statistiques qui nécessiteraient un développement théorique approfondi pour permettre l'interprétation des résultats. Il en va ainsi pour diverses méthodes du vaste domaine de la géostatistique comme le krigeage et les variogrammes, la morphologie mathématique, l'analyse harmonique de Fourier, la théorie

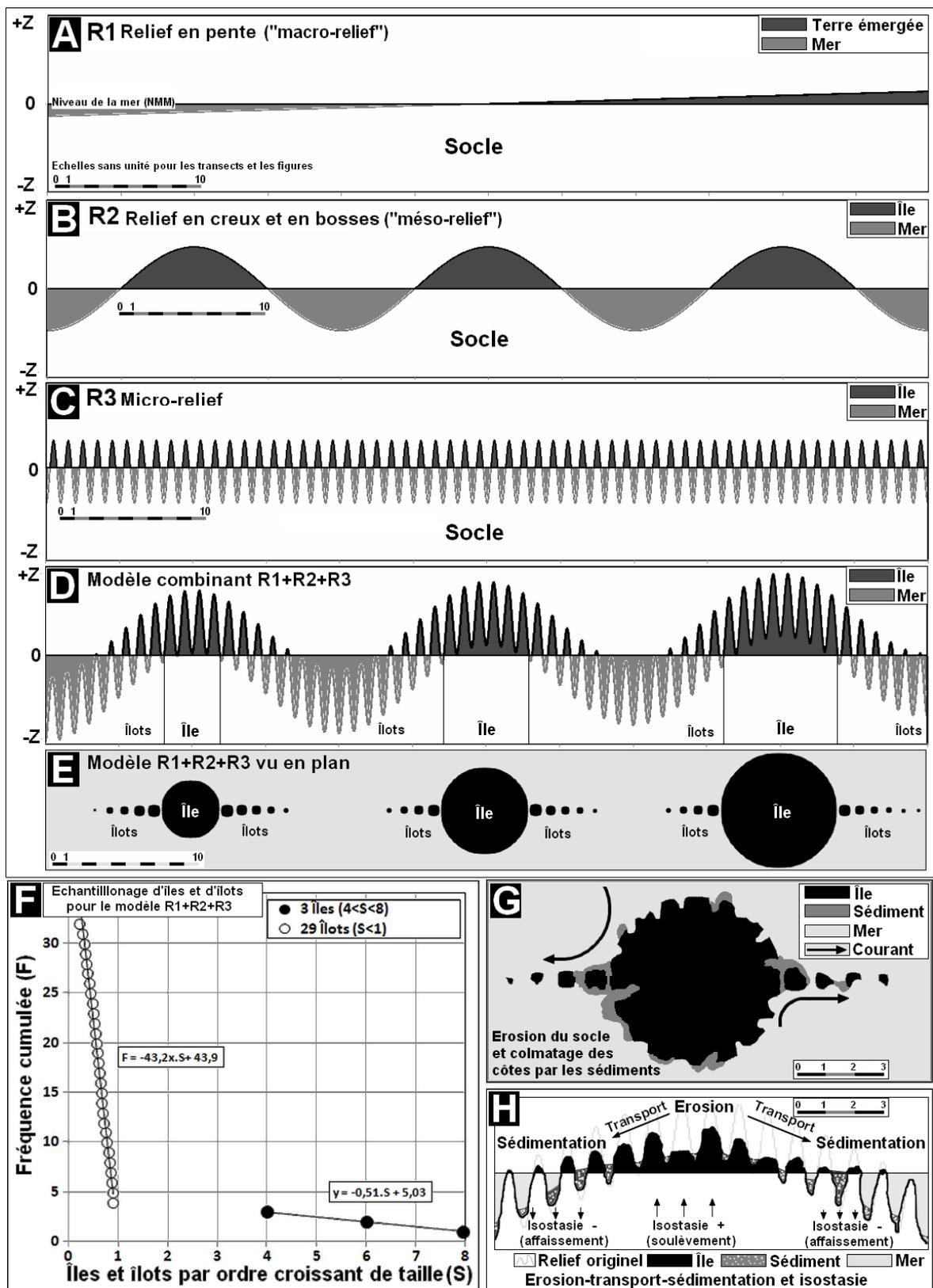


Figure 86 : Modèle conceptuel de la topographie côtière et insulaire (A et E) avec implication statistique (F) et évolution en fonction de quelques processus géomorphologiques (G et H).

des ondelettes ou autres approches relevant du traitement du signal. En revanche, nous avons évoqué des méthodes qui sont plus intuitives, entre autres les fractales avec l'exposant Korčák-Mandelbrot et la morphologie mathématique.

Partant de ces prémisses topographiques, il devient pertinent de s'intéresser aux processus morphogéniques qui pourraient s'appliquer à notre archipel virtuel. Une remarque préalable s'avère nécessaire quand le raisonnement s'applique à un relief théorique. Comme nous venons de le voir, notre approche déductive permet de définir *ex abrupto* et *ex nihilo* un état initial du relief, ce qui ne va pas de soi pour les formes naturelles qui ont, d'une certaine façon, quatre milliards d'années d'évolution dans des contextes morphogéniques et géotectoniques fort variables dans le temps long de l'histoire géologique de notre planète. Ceci étant posé, pour les besoins de la démonstration, il est possible de définir une donnée topographique au temps T_0 telle que définie dans la Figure 86E et d'esquisser ce que devrait être son évolution géomorphologique à un temps T_0+n . Les littoraux insulaires vont progressivement se redessiner en fonction du triptyque érosion-transport-sédimentation sous l'effet conjoint des processus hydroclimatiques et des courants marins (Figure 86G). Des îles peuvent disparaître, d'autres être rattachées au mainland ou à d'autres îles (Figure 86G et H). Par hypothèse, le NMM et l'équilibre isostatique ont été supposés fixes afin de simplifier le raisonnement. Pour être cohérent par rapport au système Terre-Océan-Atmosphère (TOA) et indépendamment de l'eustatisme et de l'isostatisme, il convient de rappeler que l'érosion sur les parties émergées et la sédimentation subséquente le long des côtes provoqueront d'elles-mêmes au fur et à mesure de leur développement un effet de soulèvement sur les domaines émergés par perte de charge et au contraire une subsidence dans les parties submergées par augmentation de charge essentiellement dans la zone littorale. Il faut préciser que les rééquilibrages isostatiques dus à la redistribution des masses érodées puis sédimentées ne jouent de façon significative que pour des volumes conséquents si bien qu'ils ne concernent que des terres émergées suffisamment vastes. Bien que le modèle conceptuel et l'exemple théorique utilisés soient *a priori* sans échelle géotemporelle, ils font implicitement référence à une certaine magnitude des formes de terrain et des processus morphogéniques qui est de l'ordre de 10^4 à 10^6 km² pour les surfaces et de 10^4 à 10^6 ans pour les durées.

2.12. Fragmentation insulaire et processus géomorphologiques

Tout ou partie du modèle théorique élémentaire peut servir à simuler des signatures statistiques et géographiques des domaines insulaires qui peuvent être comparées à des géographies insulaires réelles. Ainsi, le plan incliné du schéma R1 de la Figure 86B s'applique, à quelques nuances près, à nombre de plaines ou chaînes montagneuses bordées par un plateau continental ou une mer épicontinentale : côtes de l'Adriatique, littoral languedocien, rivages de la Bretagne, domaine insulaire péricontinental de la Chine du sud, rives de la Baltique. Chacune de ces régions présente sa propre trame insulaire dont la géologie explique les contrastes observés dans leurs structures géographiques. Les îles karstiques de forme allongée de la côte dalmate s'organisent en chapelets parallèles indiquant la « longueur d'onde » de 10 à 25 km des plissements affectant la masse des roches carbonatées comparable au schéma de la Figure 86B. Le littoral languedocien, quant à lui, ne présente plus aucune île du fait du colmatage de son rivage par les apports alluviaux venant de l'embouchure du Rhône et transportés par les courants côtiers et l'effet des vagues, ce qui n'est sans rappeler le schéma géomorphologique des Figure 86G et H.

Le cas si singulier des îles du nord de la Baltique déjà plusieurs fois évoqué s'avère tout à fait adapté pour illustrer ce que sont les phénomènes de « haute fréquence » morphologique et leurs conséquences sur une hyperinsularisation de certains littoraux dont l'exemple

emblématique se rencontre sur les côtes de la Suède et de la Finlande. Il suffit de rappeler que l'ensemble de la dépression balte est parsemé de dépôts morainiques aussi bien dans sa partie émergée que submergée. Les terres exondées par le phénomène de RIPG caractéristique de cette région ne sont que des formes de terrain correspondant à d'anciennes moraines de fond et des arènes sous-glaciaires de l'ancien inlandsis fénno-scandien, les matériaux meubles ayant été plus ou moins remaniés par les courants marins. Ce sont les « *drumlins* » qui constituent l'élément le plus typique des paysages issus de la déglaciation :

« *Sur les marges des anciens inlandsis, les dépôts morainiques se disposent suivant la direction du flux : ils forment des drumlins, troupeaux de collines allongées, haute de 10 à 30 mètres, pour une longueur de l'ordre du kilomètre ; parfois les moraines s'étirent derrière un obstacle rocheux, constituant une accumulation en crag and tail.* » (Amat, Dorize & le Coeur, 2015, p. 209)

Cette définition offre l'avantage de bien préciser la longueur et l'amplitude de l'onde topographique caractéristique des paysages postglaciaires. La forme allongée des drumlins permet d'affirmer que le « signal » est anisotrope²⁸⁶. La carte d'un secteur des îles Åland en Finlande montre effectivement que ces îles ont les propriétés d'allongement et de taille attendues pour des drumlins (Figure 87A). L'île Otterskär apparaît comme un cas typique avec une longueur d'1 km pour 500 mètres de large et une altitude de l'ordre de 10 mètres (Figure 87B). Les formes caractéristiques du modelé postglaciaire ont déjà fait l'objet d'une analyse quantitative de type allométrie par Ian Evans qui notait leurs « *scale-specific periodicities* », au même titre que les systèmes dunaires modelés par le vent (Evans & McClean, 1995, p. 129). Pour générer un paysage insulaire analogue il suffirait de combiner la moyenne d'une onde sinusoidale de 500 m de longueur avec une amplitude de 20 mètres en longitude²⁸⁷ et une onde orthogonale de même type d'1 km de long avec la même amplitude en latitude, ceci générant une trame parallèle d'îles oblongues. Pour être plus réaliste, il faudrait prendre en compte la pente générale du fond marin qui semble être vers le Nord Nord-Ouest du fait de l'absence d'îles dans cette direction. De plus, un paramètre stochastique devrait être incorporé dans le modèle afin que la trame insulaire générée présente des irrégularités de détail dans leur allongement, leur espacement, leur superficie et leur position.

Le quadrangle insulaire de la région d'Otterskär (Figure 87A) couvre 37 km², comporte 39 fragments insulaires dont dix-sept ont plus de 0,06 km²²⁸⁸, d'où une densité de 4 600 îles/10 000 km² qui représente le double de la densité moyenne Di_2 calculée pour l'archipel des Åland²⁸⁹. Cette différence s'explique en partie par un mode de calcul différent des densités Di et Di_2 qui sont établies en appliquant un *buffer* marin de 12 milles marins autour du groupe de fragments insulaires considéré. En ne considérant que le polygone convexe enveloppant les terres²⁹⁰, les densités Di_2 sont de l'ordre de 2 850 îles/10 000 km² pour les Åland et de 1 750 îles/10 000 km² pour toutes les côtes de la Finlande et de la Suède. La densité ramenée à l'espace insulaire est donc légèrement supérieure à la tendance observée à l'échelle de l'archipel et de la région. La Figure 88C compare les distributions NS des fragments insulaires

²⁸⁶ Cette anisotropie ne pouvait être représentée dans notre modèle conceptuel basé sur un seul transect mais qui aurait pu l'être dans un modèle 2D combinant par exemple des transects orthogonaux.

²⁸⁷ Afin de tenir compte de la partie immergée.

²⁸⁸ Il faut garder présent à l'esprit que les densités insulaires absolue (Di) et relative (Di_2) ont été établies à l'échelle mondiale (voir annexe 4) à partir des données GSHHG qui ne sont complètes que pour les îles de plus de 0,06 km². De ce fait, seules les îles supérieures à cette superficie doivent être considérées pour que les valeurs de densité soient comparables.

²⁸⁹ Environ 2 200 îles/10 000 km². Voir Figure 67D.

²⁹⁰ En ce cas, l'espace de référence insulaire (Ei) est plus petit que celui défini avec des *buffers* de 12 milles nautiques, ce qui implique forcément une plus forte densité insulaire.

depuis l'échelle régionale des côtes suédoises et finlandaises jusqu'à l'échelle locale des environs d'Otterskär en passant par l'échelle intermédiaire de l'archipel des Aaland. L'estimation de la fragmentation donnée par l'exposant de Korčák b reste du même ordre pour les trois ensembles insulaires considérés : Otterskär $b=0,92$ (27 km²), Aaland $b=1,01$ (7300 km²), côtes suédoise et finlandaise $b=0,92$ (60 000 km²). Ce résultat démontre que l'échantillonnage insulaire de drumlins exondés de la région autour de l'île Otterskär est représentatif de la structure géographique de l'archipel Aaland voire de toute la côte nord de la Baltique. Cela corrobore le fait que les espaces insulaires de ces régions sont composés de drumlins émergés par RIPG.

L'exemple des Aaland, parmi d'autres étudiés précédemment, suggère que les méthodes utilisées pour décrire la structure géographique des paysages insulaires²⁹¹ constituent de bons indicateurs des processus géomorphologiques dominants pour peu qu'ils soient calibrés sur des zones sur lesquelles ils sont assez homogènes comme par exemple les zones karstiques (îles dalmates), les socles ennoyés (Seychelles, Falkland) ou les régions à RIPG dominant (Finlande). Cette approche « abductive » des formes du relief est assimilable à de la « macrogéomorphologie » ou de la « géomorphologie sérielle » (par analogie avec l'histoire sérielle). Dans la pratique, cela revient à lier plus étroitement les démarches inductive et hypothético-déductive dans le processus de recherche de sorte que la description des faits géographiques observés s'inscrit intimement dans une trame perceptive et analytique basée sur des lois ou plus exactement des tendances générales et théoriques. S'agissant des espaces insulaires, la nissologie nomothétique évoquée au début de l'ouvrage s'inscrit pleinement dans ce type d'approche, notamment pour mieux comprendre et pas simplement décrire les phénomènes dynamiques géotemporels sur des espaces fragmentés qui, en l'occurrence, sont ceux composés par la trame discontinue des terres émergées de notre archipel monde.

²⁹¹ Au sens des *islanscapes* évoqué dans Depraetere C., 2008a) établis en fonction de l'exposant de Korčák et des densités insulaires. https://www.islandstudies.ca/sites/islandstudies.ca/files/ISJ-3-1-2008-Depraetere1-FINAL_0.pdf

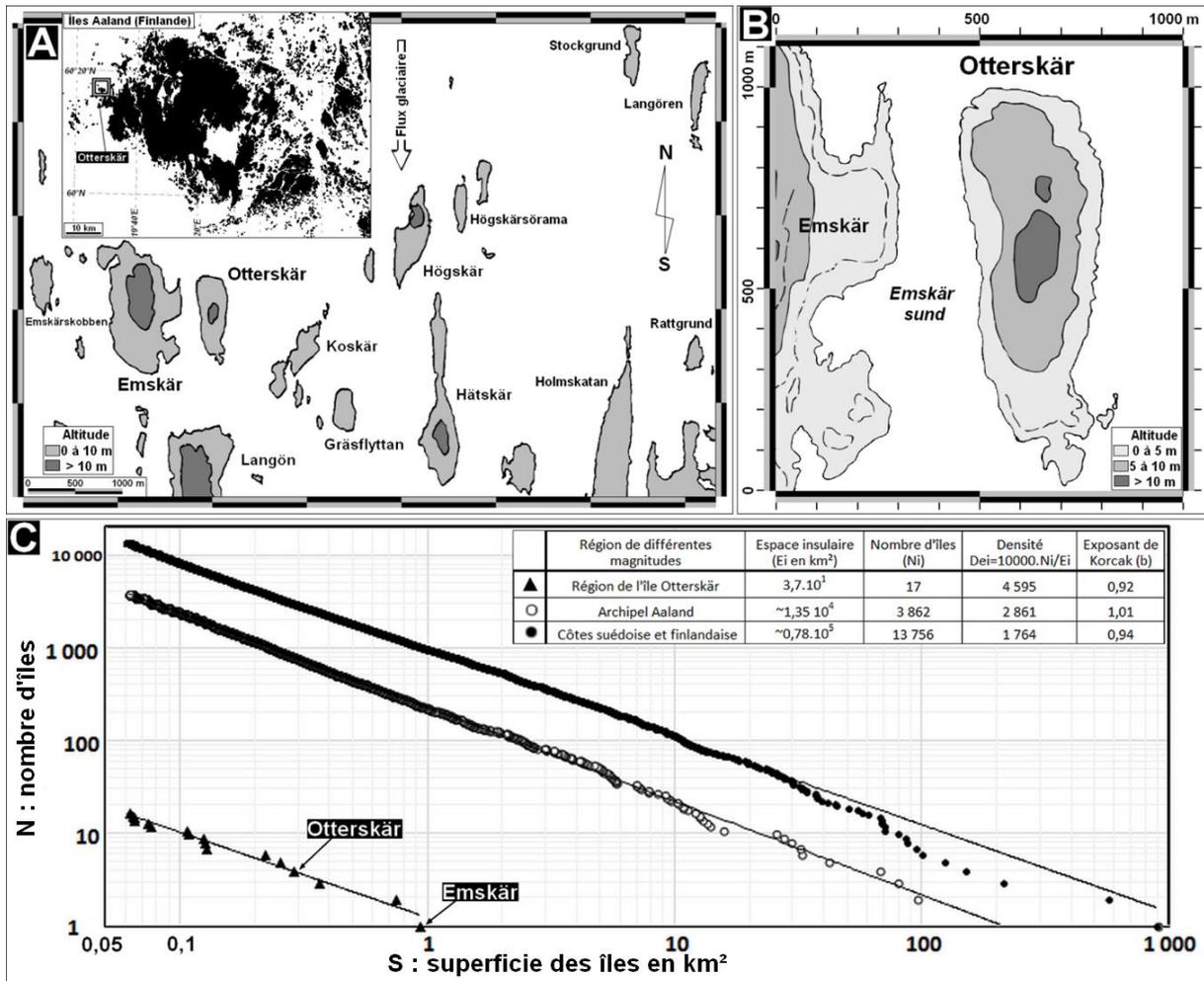


Figure 87 : Drumlins émergeant des îles Aaland (Finlande).

- (A) Îles allongées parallèlement au flux glaciaire vers le sud lors de la dernière glaciation sur une partie des Îles Aaland.
- (B) Île Otterskär en tant que forme typique associée à un *drumlin* (~ 1 km x 0,5 km).
- (C) Densités insulaires et coefficients de Korçák à trois magnitudes d'échelles : région de l'île Otterskär (10^1 km²), archipel Aaland (10^4 km²), côtes suédoise et finlandaise (10^5 km²).

2.13. Typologie géologique et géomorphologique insulaires

Une classification des îles ne peut que ramener à celle proposée par Edgar Aubert de la Rüe en 1935 dans son ouvrage de référence "*L'homme et les îles*"²⁹² (1935, pp. 7-14) et synthétisé sous la forme d'un schéma par Christian Germanaz (2005). Nous reprendrons en partie sa classification toute géographique qui, dans ses grandes lignes, convient à notre propos tout en nous permettant quelques adaptations du fait de la spécificité de notre approche et du progrès des connaissances. Il ne s'agit pas seulement de rattacher telle ou telle île à un type particulier mais de comprendre aussi comment se structurent les domaines insulaires par rapport aux processus insularogènes dominants. La classification d'Aubert de la Rüe distingue deux grandes familles d'îles, celles dites continentales et celles océaniques mais selon des critères assez approximatifs²⁹³. Les autres classes considérées par le même auteur sont pour le moins confuses voire inexactes ; ainsi Ceylan, les Nouvelles-Hébrides (Vanuatu) et les Falkland sont-elles qualifiées de « continents engloutis ». Bornéo devient un « véritable petit continent » : la Nouvelle-Calédonie est « séparée par dislocation » : les îles alluvionnaires deltaïques ou côtières sont classées comme « îles particulières ». Curieusement, les îles du Ponant, comme celles de l'Adriatique, sont considérées en « surrection » et les îles suédoises autant que norvégiennes sont dites en « affaissement » alors que c'est l'inverse pour ces dernières. Il faut replacer les travaux d'Aubert de la Rüe dans le contexte scientifique de l'époque. Il ne disposait pas des moyens qui sont les nôtres actuellement dans le domaine de l'accès à l'information géographique et scientifique. La théorie d'Alfred Wegener sur la dérive des continents, ébauchée en 1912 et qui allait devenir la tectonique des plaques à partir des années 50, se heurte à l'époque à une certaine réserve voire à une franche hostilité de la part de la communauté scientifique. Si bien que la notion de « dislocation » évoquée par Aubert de la Rüe ne peut s'inscrire dans une compréhension globale de l'évolution du relief de la lithosphère. Enfin, le phénomène de RIPG responsable de l'émersion d'innombrables îles aux latitudes subpolaires n'était pas clairement identifié (voir Figure 6A, Figure 67E et Figure 85A).

La perspective envisagée fait que nous nous intéresserons principalement à des régions insulaires considérées dans leur ensemble et non à des îles en particulier si ce n'est à titre d'exemple illustrant le tout comme nous l'avons fait pour l'île Otterskär par rapport au contexte postglaciaire des rives de la Baltique. Il tombe sous le sens que plus un domaine est étendu plus les processus morphogéniques actuels ou passés peuvent être divers, si bien que le relief et le modelé deviennent par nature polygéniques :

« Chaque système d'érosion ou, si l'on préfère, chaque crise morphogénique a mis en place un système de formes dont on reconnaît, au milieu des héritages, la spécificité. Puisqu'il y a des formes héritées de diverses crises, il est clair qu'il est peu de modelés dus à un seul système d'érosion. On parle donc de modelés polygéniques par opposition aux modelés monogéniques. Ceux-ci sont rares ; il est possible qu'il n'en existe pas ; un modelé monogénique exigerait en effet une morphogénèse assez active pour effacer toute trace d'héritages, ce qui suppose efficacité et durée. Mais la durée annihile l'efficacité. »
(Viers, 1990)

²⁹² Au moins dans la sphère francophone.

²⁹³ La typologie du même ordre utilisée ici procède de critères de distance et topologique plus précis (Voir Figure 62).

La remarque de Georges Viers selon laquelle « la durée annihile l'efficacité » doit être précisée sur un exemple classique, celui de l'érosion aréolaire sur les versants et linéaire le long des thalwegs parcourus par les rivières. Toutes choses égales par ailleurs en termes de climat (importance, nature et intensité des précipitations), de géologie (érosivité des sols et des formations superficielles) et de végétation (sol nu, prairie, savane, forêt), la capacité de transport des ruissellements diffus et des écoulements concentrés dépend du facteur pente. En posant *a priori* l'existence d'un fort relief (volcans) sans phénomène isostatique ou eustatique modifiant le niveau de base, l'érosion de la topographie va progressivement réduire la déclivité des versants et des thalwegs, ce qui réduira la capacité de transport dans un rapport de l'ordre de la racine carrée de la pente. Il en ressort que la lame annuelle érodée va se réduire avec le temps pour devenir très faible lorsque l'ensemble du relief sera aplani pour donner naissance à des pénéplaines ou des pédiplaines sur les surfaces continentales. Dans ce cas, il est clair que l'efficacité même de l'érosion sur les reliefs se traduit à terme par la disparition des fortes déclivités et donc du facteur déterminant conditionnant le processus.

Les formes insulaires échappent d'autant moins au polygénisme qu'elles se combinent avec des processus côtiers et marins spécifiques dont les plus notables sont les mouvements eustatiques, l'action des vagues et des courants et l'alluvionnement à l'embouchure des fleuves et rivières. Les paysages postglaciaires à drumlins, et dans une certaine mesure, les îles dalmates associées à des plissements de couches sédimentaires essentiellement calcaires sont plutôt monogéniques. Les marges cratoniques ennoyées de l'Armorique ou du sud de la Chine apparaissent déjà plus complexes puisque leurs topographies d'ensemble sont de lointains héritages de plusieurs cycles d'érosion fort anciens générant des pénéplaines ou pédiplaines étagées et emboîtées partiellement remaniées par des processus d'érosion de surface et fluviales subactuels²⁹⁴. Le caractère polygénique des paysages de la côte languedocienne est évident même pour les néophytes tant le contraste est flagrant entre les trois collines rocheuses du Mont Saint-Loup, du Mont-Clair et de Maguelonne et leurs oripeaux de terres basses et sablonneuses ceinturant les lagunes, dont celle de l'étang de Thau. Le Mont Saint-Clair est le reliquat d'un ancien volcan d'âge tertiaire. Le Mont Saint-Loup témoigne d'un affleurement de roches sédimentaires. Les terres basses ne sont que la laisse de dépôts alluvionnaires contemporains de la dernière transgression marine flandrienne.

Le polygénisme des reliefs et des interactions avec les processus marins et côtiers, nécessite d'établir une typologie simplifiée des espaces insulaires. Quelques grandes classes peuvent être définies en fonction du processus morphogénique dominant, de la zone climatique et de la position par rapport aux plaques tectoniques, ceci dans l'objectif de définir des paysages insulaires types à l'échelle de l'archipel monde :

- **Les îles alluvionnaires** : la courantologie océanique permet l'accumulation de sédiments détritiques d'argile ou de sable sur les hauts fonds ou le rivage du plateau continental. Ces îles d'accrétion se localisent principalement à la périphérie des grandes terres et notamment près de l'embouchure des grands fleuves mais aussi sur des hauts-fonds comme par exemple l'Île de Sable au sud-est de Terre-Neuve. La redéposition des matériaux fluvio-marins contribue au colmatage des côtes, modifiant ainsi leur tracé du fait de la formation de cordons dunaires et de flèches littorales plus ou moins insularisés

²⁹⁴ La géomorphologie génétique s'intéresse à la genèse du relief à l'échelle des temps géologiques à partir, notamment, des surfaces d'érosion, alors que les géomorphologues dynamiciens étudient les processus actuels et subactuels de son évolution.

entre des lagunes et l'océan proprement dit. L'exemple le plus typique est celui de la côte des États-Unis au sud du Cap Hatteras du fait de la présence au large du Gulf Stream. Les îles frisonnes, depuis les Pays-Bas jusqu'au sud du Danemark, en sont une variante caractérisée par un chapelet d'îles allongées de taille de plus en plus petite vers l'est formant du côté continental la mer des Wadden qui est un vaste estran peu profond communiquant avec l'océan par des passes étroites. De par la nature meuble des sédiments, ces îles s'avèrent particulièrement sensibles aux changements courantologiques, isostatiques, eustatiques mais aussi à l'évolution de la charge solide des apports fluviaux ou des courants côtiers.

- **Les îles à fjordss** : elles sont la résultante du découpage par des langues glaciaires du plateau continental à la périphérie des grands inlandsis continentaux. Pendant les périodes froides, les glaciers exutoires creusent le socle le long des fonds des vallées et des zones de moindre résistance comme les lignes de failles. Lors de la déglaciation et de la transgression marine subséquente, les auges glaciaires sont ennoyées faisant apparaître un vaste domaine de chenaux labyrinthiques pouvant comporter des « lambeaux insulaires » emboîtés à la façon d'un puzzle comme c'est le cas en Colombie britannique et dans la *panhandle*²⁹⁵ de l'Alaska. Cette « fjordisation » du rivage s'observe dans les zones subpolaires jusque vers 40° de latitude aussi bien dans l'hémisphère nord (Norvège, Groenland, Canada, Nouvelle-Zemble) que dans l'hémisphère austral (sud du Chili, Kerguelen, sud-ouest de l'île de Jade en Nouvelle-Zélande).

- **Les îles d'émersion postglaciaire** : comme les précédentes, elles procèdent de la fonte des inlandsis continentaux provoquant un rebond isostatique postglaciaire (RIPG) responsable de l'émersion progressive du fond marin et de l'apparition d'une géographie complexe faite de myriades d'îles et d'îlots. Étant lié au même processus d'ensemble, elles seront détaillées par la suite dans la même catégorie que les îles issues du découpage par les fjords. Les effets de surrection progressive dus à la lente relaxation de la lithosphère sont surtout sensibles dans les mers peu profondes de type épicontinental comme la Baltique et la baie d'Hudson. L'intensité du phénomène dépend de l'épaisseur des anciens inlandsis qui a atteint plusieurs kilomètres en Europe et en Amérique du nord, alors que le phénomène était moins important en Patagonie chilienne et *a fortiori* sur des terres plus petites (Islande, Kerguelen). Fjordisation et RIPG étant tout deux liés à la glaciation, il est possible que les deux phénomènes interfèrent pour donner naissance à des paysages insulaires composites.

- **Les îles coralliennes ou madréporiques** : elles procèdent de l'activité des coraux tropicaux de faible profondeur. Leur extension se limite donc à la zone comprise entre 33° N (Bermudes) et 33° S (Lord Howe). Les colonies madréporiques nécessitent un support qui peut être un socle continental ou toute terre océanique, en particulier volcan. Leur évolution devient de ce fait liée à la tectonique du substratum (isostasie) et des fluctuations du NMM (eustasie). En cas de surrection, les formations coralliennes émergent en donnant ainsi naissance à des îles. Qu'elles soient émergées ou restent immergées sous la forme de récifs, elles contribuent de façon notable à l'évolution de leur « île hôte » non corallienne en protégeant le littoral de l'action directe des courants

²⁹⁵ Terme géographique signifiant « queue de poêle » et qui fait référence à des prolongements territoriaux comme par exemple la bande de Caprivi en Namibie ou celui du corridor de Wakhan en Afghanistan.

côtiers et des vagues. Il existe une évolution corrélative bien connue entre les édifices volcaniques océaniques dont l'évanescence est programmée et le développement de leurs auréoles récifales conduisant à terme à la formation d'un atoll plus ou moins fermé (Clipperton) qui en cas de surrection ou de comblement donnera lui-même naissance à une île plate de forme quasi circulaire (Marie-Galante, Henderson, Nauru). Aux récifs frangeants proches de la terre ferme, il faut ajouter les récifs-barrières situés bien plus au large et couvrant de larges portions des littoraux de la mer Rouge et de l'Australie en créant un liséré d'îles aux formes allongées et digitées qui ne sont pas sans rappeler la structure géographique des cordons insulaires sableux pourtant d'origine toute différente. Enfin, lorsque la surrection est importante sur une vaste zone, le paysage insulaire devient une mosaïque de larges îles et d'îlots coralliens pouvant avoir un fonctionnement partiellement karstique comme les Bahamas ou les îles Loyauté.

- **Les îles volcaniques et de trapps basaltiques** : elles se définissent comme des « reliefs postiches » posés sur les fonds océaniques ou sur le plateau continental. Les îles volcaniques ne sont que la partie émergée d'un cône dont la hauteur totale peut atteindre 10 000 mètres comme dans le cas de Big Island aux îles Hawaï. Leur formation peut être assez rapide au sens géologique avec éventuellement plusieurs volcans successifs devenant coalescents pour former des îles comportant plusieurs massifs (cinq à Big Island, six à Isabella aux Galapagos, trois en Nouvelle-Géorgie, deux à Tahiti, comme à la Réunion). Issues de phénomènes géologiques ponctuels, la magnitude des superficies insulaires reste dans une gamme d'échelle assez précise pour les îles ne comportant qu'un volcan. À l'échelle mondiale, il apparaît que leur rayon peut atteindre 40 km soit environ 5 000 km², comme c'est le cas pour Bali et Lombok dans la chaîne volcanique des petites îles de la Sonde. Lorsque l'édifice est récent voire encore actif, elles peuvent avoir une forme presque circulaire : Sao-Tomé, Tristan da Cunha, Atlasova dans les Kouriles, Kolombangara aux Salomon... Contrairement à d'autres types d'îles, elles se rencontrent à toutes les latitudes puisque associées à des processus tectoniques azonaux affectant l'ensemble de la Terre. Elles tendent à s'organiser conformément à la tectonique des plaques autour de leurs zones de contact (ceinture de feu du Pacifique, dorsale médio-atlantique) ou au droit des points chauds sous-jacents (Hawaï, Açores, Mascareignes) dus à des phénomènes de convections mantelliques profondes (French & Romanowicz, 2015). De ce fait, elles forment des chapelets (Petites Antilles, Sandwich du Sud, Mariannes) ou des guirlandes insulaires s'accrochant de loin en loin aux continents (Kouriles, Aléoutiennes, arc Andaman-Nicobar). À l'inverse des autres îles le plus souvent localisées à la périphérie des continents, elles constituent la majorité des îles océaniques, certaines pouvant cependant être proches des terres continentales (l'île de Bioko au large du Cameroun, les îles Lipari et Stromboli au nord de la Sicile, Santorin en Grèce). Outre l'ablation liée à l'érosion de surface, le démantèlement de ces îles se fait par affaissement progressif de l'édifice et par effondrement de larges portions de l'île du fait des fortes pentes et de la fracturation due aux phases de dilatation et de rétractation. Les îles formées de trapps basaltiques peuvent y être rattachées de par leur origine magmatique bien que les mécanismes éruptifs soient d'échelle différente et créent des formes tabulaires plutôt que coniques. Le phénomène étant principalement continental, elles sont peu nombreuses et s'observent notamment aux Kerguelen et aux îles Penghu (ou Pescadores) à l'ouest de Taiwan.

- **Les îles d'enneigement du plateau continental et des hauts-fonds marins** : elles procèdent de la submersion du plateau continental suite à la dernière transgression marine postwürmienne qui, de 15000 BP à nos jours, a vu passer le NMM de - 110 mètres au niveau actuel. En fonction de la profondeur du détroit les séparant du mainland, leur caractère insulaire peut être plus ou moins récent, par exemple 8000 BP pour la Nouvelle-Guinée par rapport à l'Australie. Bien qu'elles soient « océaniques » en vertu de leurs distances aux continents, les îles du plateau des Seychelles sont géomorphologiquement continentales puisqu'elles ne sont que la partie émergée d'une microplaque continentale, ce dont rendent compte leurs roches granitiques et leurs si singuliers paysages. À une toute autre échelle, les mainlands néo-zélandais ne constituent qu'une infime partie de la plaque continentale de Zealandia immergée à 90 %. Ces îles sont d'une grande diversité géologique : cristalline pour Ouessant et les îles Scilly, métamorphique pour les Falkland, karstique pour Djerba ou les îles de la côte dalmate en Méditerranée...

Il va sans dire que cette typologie se voit parfois confrontée à des cas difficilement catégorisables du fait de la superposition, de la juxtaposition et de l'emboîtement de processus d'âge, de magnitude et de modelé fort différents. Ainsi, plus une île est grande, *a fortiori* les continents, plus elle tendra à être polygénique et donc irréductible à un type particulier. Cette limite étant posée, il est possible de considérer la façon dont les divers processus évoqués vont définir des paysages insulaires spécifiques... ou non. Pour rappel, nous limiterons le sens de « paysage insulaire » à ce qui est mesurable à partir des méthodes préalablement détaillées : les densités insulaires exprimées en nombre d'îles pour 10 000 km² ($Di2$)²⁹⁶ et les fragmentations insulaires établies en fonction de l'exposant de Korčák (b) obtenu selon la loi Superficie-Nombre (SN). D'autres critères auraient pu intervenir, entre autres le relief, pour lequel nous ne disposons malheureusement pas d'information suffisante sur les îles de moins d'1 km². Le premier critère $Di2$ rend compte de la répartition spatiale des îles, en particulier leur densité par unité de surface océanique. Sa valeur est comprise entre 0 (pas ou peu d'îles) et 100 voire 1 000 dans certains contextes particuliers (voir Figure 66 et Figure 67). Le second critère reflète la distribution des tailles d'îles. Plus l'exposant de Korčák b est élevé plus la proportion de petites îles par rapport aux grandes est importante, ce qui permet de distinguer des distributions insulaires « hypofragmentées » ($b < 0,6$) et « hyperfragmentées » ($b > 0,6$). La tendance à l'échelle de l'archipel monde est de $b = 0,6$ soit une « mésofragmentation » (voir Figure 28). Les valeurs issues des deux méthodes sont complémentaires pour décrire à la fois les propriétés géographiques et statistiques d'un espace insulaire. Il faut cependant rappeler que l'exposant de Korčák ne peut s'appliquer que sur un échantillonnage insulaire significatif et n'a guère de sens pour les densités inférieures à 20 îles/10 000 km² si bien que les régions dépassant cette valeur seront privilégiées dans ce chapitre.

Afin de mieux définir ce que sont les paysages insulaires en fonction de critères de fragmentation et de densité, nous reprendrons ici, en la généralisant, la méthode d'inversion de la loi NS $N = a.S^{-b}$ pour en faire une loi superficie-nombre (loi SN) $S = (N/a)^{-1/b}$ (Voir commentaires de la Figure 38). Cela permet de tester l'effet de ses deux paramètres sur la structure géographique de fragments émergés. Les simulations de paysage insulaire se feront selon les principes suivants :

²⁹⁶ Rappelons que seules les îles de plus de 0,06 km² sont prises en compte à partir des données GSHHG, les fragments insulaires plus petits n'étant pas connus de façon exhaustive (voir Figure 28).

- Répartition aléatoire sur une surface de 100 x 100 km. Le choix d'une surface de 10 000 km² procède du fait que les densités insulaires réelles calculées sur l'ensemble de l'archipel monde sont exprimées en nombre d'îles par 10 000 km² ;
- Les fragments insulaires sont de forme circulaire, ceci afin de simplifier les simulations ;
- Leurs superficies sont supérieures à 0,06 km² afin d'être conformes aux données GSHHG de référence ;
- Leurs fonctions de distribution statistique au sens de la relation $S = (N/a)^{-1/b}$ sont homogènes pour toutes les îles quelle que soit leur superficie. L'hypothèse inverse supposerait la définition de paramètres supplémentaires pour la simulation, à savoir les seuils de superficie des différentes classes de fonction puissance $N = a.S^b$.

Afin de faciliter la comparaison des diverses simulations, un critère de surface relative des îles S_i % par rapport à la surface de référence de 100 x 100 km sera ajouté : toutes les simulations seront telles que S_i % = 5 % ou S_i % = 29 %. Ces deux valeurs ont été choisies respectivement en tant que valeur moyenne sur l'ensemble des espaces insulaires et comme proportion de terres émergées par rapport à la planète entière. Les résultats des simulations de la Figure 88 rendent compte de la sensibilité des structures spatiales en fonction des paramètres a et b des fonctions puissance. Il s'agit de modèles uniformes de paysage insulaire assimilables à des contextes monogéniques. Les valeurs de fragmentation données comme exemples varient entre $b = 0,3$ (hypofragmentation, Figure 88A) et $b = 0,75$ (hyperfragmentation, Figure 88C), en passant par $b = 0,6$ (mésfragmentation, Figure 88B). Les densités simulées varient entre 15 (Figure 88A1) et plus de 1 000 îles/10 000 km² (Figure 88 C3). Les faibles densités ($D_i < 30$ îles/10 000 km²) hypofragmentées ($b < 0,5$) correspondent à des archipels comme les Açores, le Cap-Vert ou les Baléares. Les plus fortes densités ($D_i > 1 000$ îles/10 000 km²) hyperfragmentées ($b > 0,7$) sont celles observées sur la rive nord de la Baltique sur les côtes suédoises et finlandaises (Voir Figure 87).

Partant de ce modèle élémentaire fragmentation-densité, il est tout-à-fait loisible de procéder à des simulations plus complexes rendant davantage compte de la diversité réelle des paysages insulaires :

- Adopter une répartition qui ne soit pas stochastique (distribution Log en fonction d'une direction, favoriser la « clusterisation » alias archipel) ;
- Ne pas se limiter aux fragments insulaires supérieurs à 0,06 km² ;
- Générer des formes autres que circulaires pour les îles ;
- Utiliser des fonctions de distribution puissance « par morceaux » avec des paramètres différents en fonction des classes de superficies insulaires ;
- Faire appel à d'autres fonctions de distribution²⁹⁷

²⁹⁷ Fonctions linéaire, exponentielle, logarithmique, voir annexe 1.

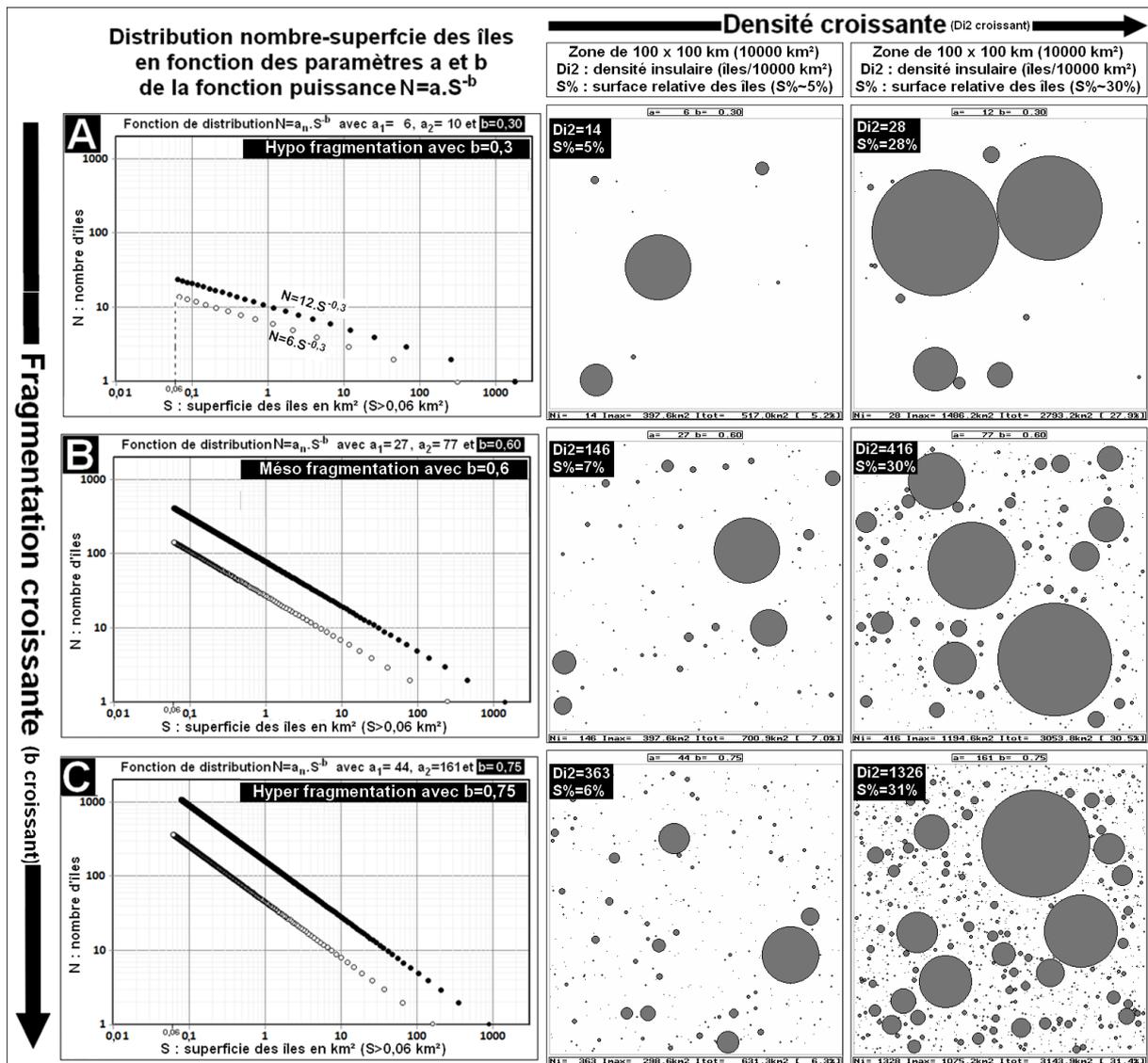


Figure 88 : Simulations d'espace insulaire paramétrées en fonction de l'exposant de Korčák (b) et de la densité insulaire ($Di2$) (surface 100 x100 km, cercles insulaires répartis aléatoirement)

Cette approche théorique des paysages insulaires obtenus en combinant fragmentation statistique et densité géographique permet à la fois de mieux comprendre les exemples des précédents chapitres et de faciliter l'interprétation des cas qui seront étudiés dans ce qui suit pour les différents types d'espaces insulaires.

2.14. Les îles alluvionnaires

Cette particularité des zones côtières bordant les grandes îles et les continents résulte pour partie des flux d'eau douce et de sédiments provenant des fleuves. Le fleuve Amazone avec ses 200 000 m³/s où même le plus modeste Orénoque provoque une désalinisation de l'eau de mer jusqu'à plusieurs centaines de km de leur embouchure, ce qui permit d'ailleurs aux premiers explorateurs, dont Americo Vespucci, d'augurer de l'immensité du continent sud-américain avant même de l'avoir exploré ou même circumnavigué. Les apports sédimentaires de fines notamment sont si importants qu'ils occasionnent un envasement généralisé sur 1 600 km de côtes jusqu'à l'embouchure de l'Orénoque (Anthony & al., 2013). C'est dans les deltas qu'apparaissent des milieux amphibies où l'on ne sait plus exactement ce qui est du domaine terrestre ou marin. Ces milieux constituent des espaces insulaires qui connaissent des évolutions rapides en fonction des variations de la charge sédimentaire du fleuve et des changements eustatiques (voir Figure 78). En toute rigueur, le caractère océanique de ces îles peut faire débat tant elles sont liées à des processus hydrologiques terrestres. Toutefois, elles n'en constituent par moins des éléments typiques et originaux des milieux côtiers, comme c'est le cas à l'embouchure des principaux fleuves de Sibérie orientale (Figure 89A). Si les deltas et les paysages fluvio-marins de la Kolyma (Figure 89C) et de l'Iniguirka (Figure 89D) restent modestes, ceux de la Léna sont du même ordre que le Mississippi ou le Nil et composent un vaste éventail d'îles et d'îlots plus ou moins emboîtés rayonnant à partir du mainland deltaïque.

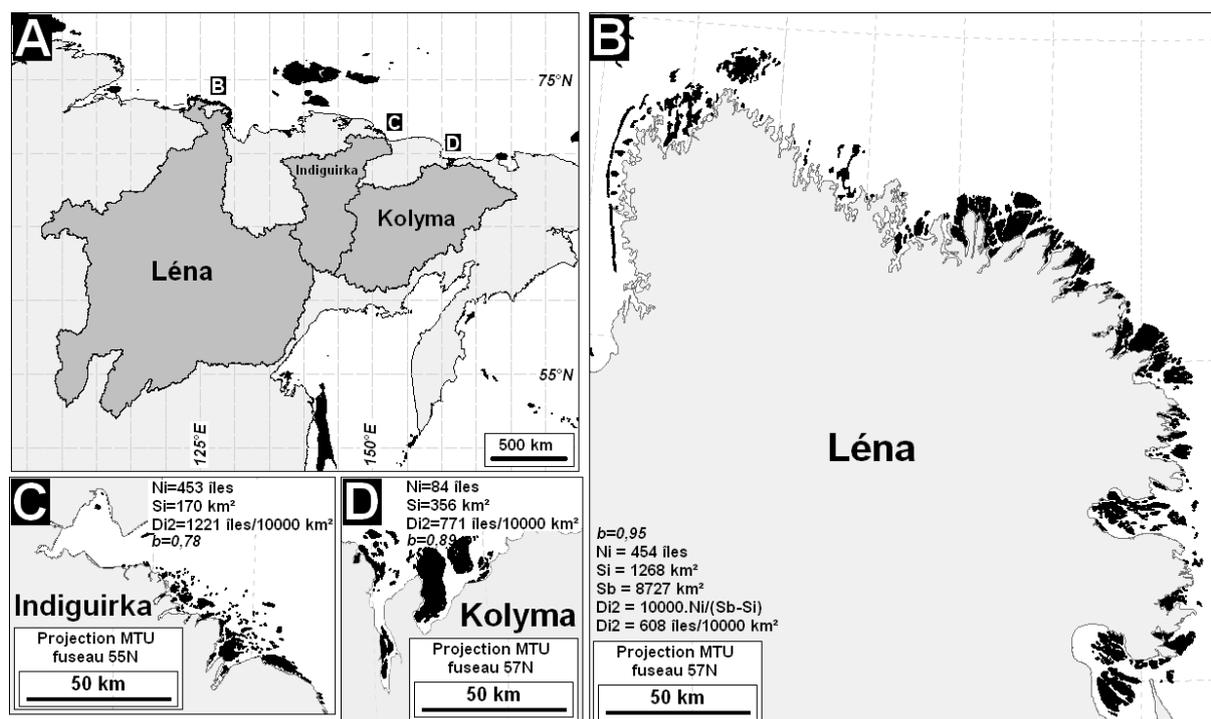


Figure 89 : Zones côtières à fortes densités insulaire à l'embouchure des grands fleuves de Sibérie orientale

Bien qu'elles soient plus rares, quelques îles purement alluvionnaires se retrouvent en zone océanique. Au large de la Nouvelle-Écosse, l'archétype en est l'île de Sable (37 km²), qui a vu sa forme et sa superficie évoluer en quelques siècles (Figure 90A). Cette île instable et plate possède sans doute la plus grande densité d'épaves au monde, la plupart étant déjà enfouies pour ne pas dire englouties sous la masse de sable. De même, les îles de la

Madeleine dans le golfe du Saint-Laurent (Figure 90B) procèdent de la redéposition de sédiments marins et fluviaux sur des diapirs de sel (Drapeau & Mercier, 1990). En ces zones tempétueuses et brumeuses, les unes disputent aux autres le record du nombre de naufrages, si bien que certains disent plaisamment sur un sujet tragique qu'elles « ont fait couler beaucoup d'ancre ». En zone tropicale, la mangrove joue un rôle primordial dans la dynamique côtière notamment en piégeant les sédiments marins et fluviaux et en protégeant le rivage. La plus grande des « îles mangroves » est celle de Yos Sudarso (anciennement Frederik Hendrik, 11 740 km²) qui se situe au débouché de la Dingul River en Nouvelle-Guinée (Figure 90C). Les îles alluvionnaires couvertes de mangrove au large du delta du Gange au Bengla Desh sont fortement peuplées : Bhola (1440 km²) a 157 500 habitants et Sandwip (267 km²) 350 000 habitants (Figure 90D). Elles sont menacées par la combinaison de trois facteurs : la montée du NMM, la plus grande fréquence et la plus forte intensité des cyclones et le déficit alluvionnaire dû à l'aménagement des bassins du Gange et du Brahmapoutre. L'île Fraser (1673 km²), anciennement Great Sandy Island, est essentiellement alluvionnaire du fait du caractère montagneux et pluvieux des côtes du Queensland (Figure 90E). Elle est également bordée de coraux et de mangroves.

L'île de la baie des Tigres (105 km²) hésite entre l'insularité et la péninsularité et mérite à ce titre un commentaire plus détaillé (Figure 90F). Cette île également appelée Ilha dos Tigres (105 km²) au large de l'Angola dit bien l'évanescence des formations alluvionnaires face aux événements climatiques et océaniques Figure 91. Cette flèche littorale ou « *restinguas* » (Guilcher A. , 1982), jusqu'alors péninsulaire, s'est vue transformée en île du jour au lendemain le 14 mars 1962 quand une forte tempête a détruit l'isthme sableux et coupé l'adduction par pipeline qui alimentait la petite communauté de pêcheurs vivant sur cette île sans ressource en eau²⁹⁸. Deux facteurs ont pu jouer dans le fait que l'isthme sableux (un tombolo) n'ait pu se reformer depuis 1962 : la montée du NMM et plus encore l'aridification du bassin de la rivière Cunene à la frontière de l'Angola et de la Namibie, rivière dont les apports sédimentaires, en combinaison avec le courant de Benguela, étaient responsables de la formation de ce panache sableux au nord de son embouchure. Il est établi que le réchauffement actuel a déjà modifié l'équilibre du front océanique Angola-Benguela précisément entre l'estuaire de la Cunene et l'île des Tigres :

« The [Angola-Benguela] Front has been at the mouth of the Kunene River and has now moved further northward along the Angolan coast, during a presumed period of warming, leaving the Atlantic coastal oceanic current fed by the cooler Benguela Front. »
(Hogan, 2012)

À terme, un nouvel élément pourrait modifier le bilan sédimentaire, à savoir la construction prévue de l'immense barrage d'Epupa ou Baynes en amont de l'estuaire de la Cunene, ce qui ne manquerait pas de diminuer plus encore les débits et la charge solide des effluents en mer. L'évolution de l'île de Baia dos Tigres démontre bien que la dynamique du système TOA combiné aux activités humaines a un impact complexe sur la géomorphologie côtière et notablement sur les phénomènes d'accrétion ou au contraire d'érosion des formations alluvionnaires.

²⁹⁸ Dolf Els, 2014, page 59: "Ghost island". Drive out September 2014, pp. 55-59.

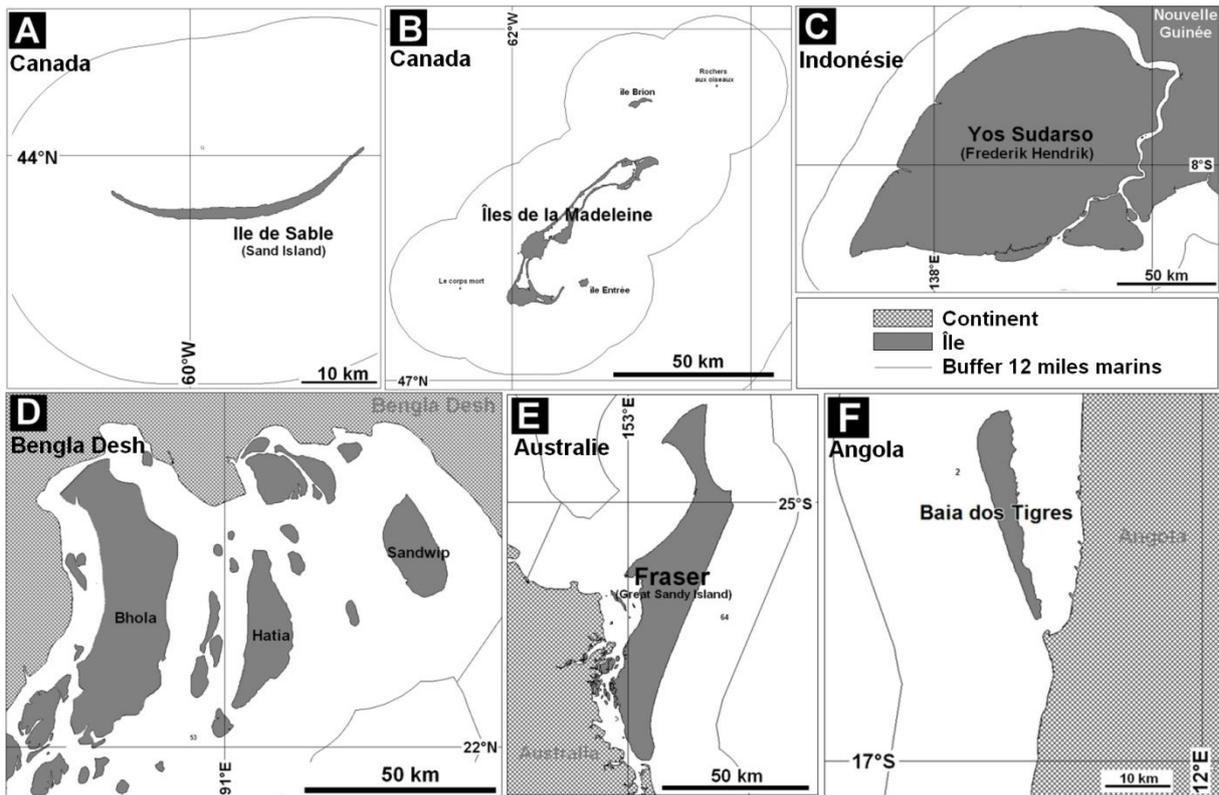


Figure 90 : Exemples d'île d'origine totalement ou partiellement alluvionnaire.
 (A) Île de Sable au large de la Nouvelle-Écosse. (B) Îles de la Madeleine dans le golfe du Saint-Laurent formées par alluvionnement sur diapirs de sel.
 (C) Île Yos Sudarso, la plus grande « île mangrove » à l'embouchure de la Dingul River.
 (D) Îles alluvionnaires avec mangrove dans le delta du Gange.
 (E) Île Fraser ou Great Sandy Island avec mangrove et coraux au large du Queensland.
 (F) Île de la baie du Tigre formée en partie par les alluvions de la rivière Cunene en Angola.

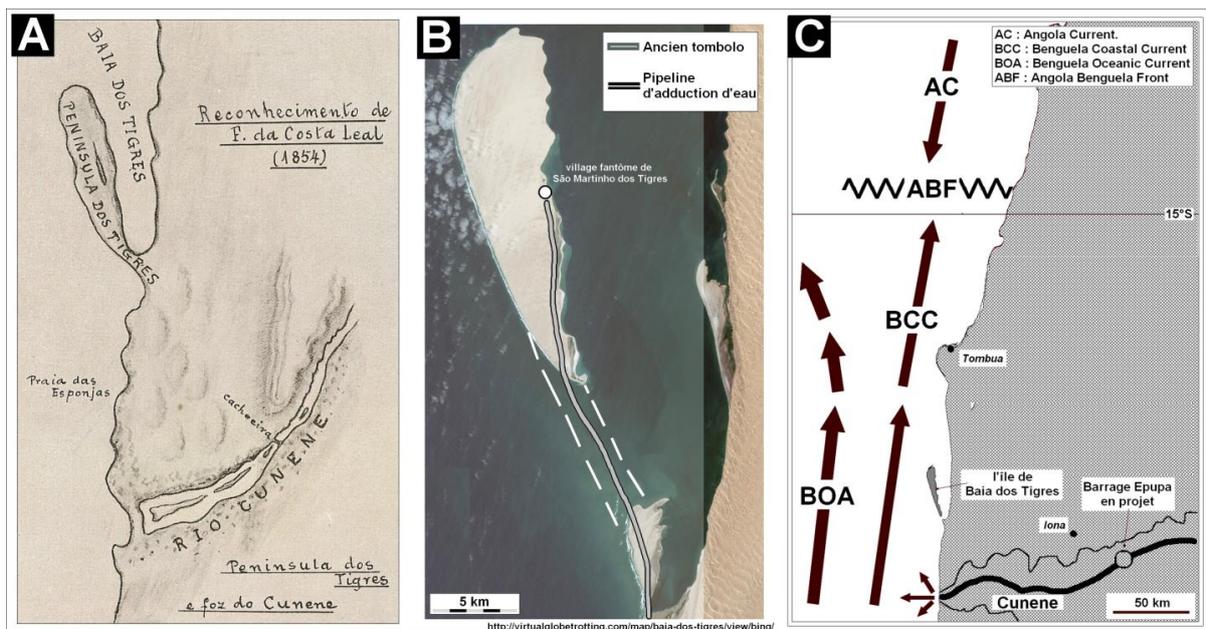


Figure 91 : Évolution de la flèche littorale, ou « restinguas », de Baia dos Tigres en Angola.
 (A) Carte montrant la péninsule dos Tigres réalisée en 1854 par Fernando da Costa Leal.
 (B) Disparition de l'isthme et de l'adduction d'eau après la tempête du 14 mars 1962.
 (C) Contexte hydrologique et océanographique des côtes sud de l'Angola.

L'alluvionnement côtier ne se limite pas aux débouchés des fleuves et rivières. Il s'étend aux rivages situés à proximité notamment sous l'effet des courants marins littoraux comme il en va pour la côte languedocienne, largement colmatée par les apports venant du Rhône si bien que l'ancienne île du Mont Saint-Clair dominant la ville de Sète aurait été progressivement insularisée vers 3000 av. JC, à la toute fin de la transgression flandrienne (Figure 92A). Le même processus responsable de l'accrétion côtière, appelé tombolo, se retrouve dans la formation de flèches sablo-argileuses entre une île située au large et le mainland. En France, l'exemple le plus achevé est celui de la presqu'île de Gien qui annonce en quelque sorte les îles du Levant pour qui vient du continent et dont le tombolo à fleur d'eau est principalement occupé par des salants d'une altitude ne dépassant pas deux mètres alors que l'ancienne île présente une topographie collinaire (Figure 92B). Car Giens était encore une île pendant l'Antiquité, ce qui témoigne du caractère récent de la formation de son tombolo. De même la presqu'île de Saint-Mandrier était à la même époque l'île de Sépet. Le caractère meuble des dépôts formant les tombolos les rend particulièrement sensibles aux modifications du fonctionnement côtier, *a fortiori* en cas de montée du niveau des mers. Dans le contexte actuel, il n'est pas exclu que ces deux presqu'îles redeviennent insulaires²⁹⁹. Autre bel exemple que celui de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon qui pourrait se voir complété par une troisième île, celle de Langlade, reliée par un double cordon sableux lagunaire à Miquelon.

À l'instar de la néo-île de dos Tigres, d'autres terres insulaires étaient il y a peu encore reliées au mainland par un mince cordon alluvial. C'est le cas de l'île de Ceylan dont l'isthme sableux se serait rompu vers 1480, ce qui explique la similitude de sa faune avec celle du Deccan, le peuplement de part et d'autre par des populations tamoules et non cinghalaises, pour confirmer les légendes hindoues indiquant « qu'au quinzième siècle de notre ère, les pèlerins allaient à pied du Deccan à Ceylan. »³⁰⁰ On retiendra qu'aussi bien pour les flèches sableuses que pour les presqu'îles à tombolo, le lien avec le mainland est fragile puisqu'il dépend du bilan sédimentaire lié aux apports fluviaux et marins par la courantologie côtière. Toute modification de ces éléments y compris les forçages venant du changement climatique (CC) et ses impacts océaniques peut se traduire par une évolution rapide des cordons sableux soit par érosion soit par accrétion. Autre facteur qui ne peut être négligé dans l'atterrissement des côtes en général et de la Méditerranée en particulier : celui du défrichage et de la mise en culture lors de la révolution néolithique vers 2000 av. JC dans le cas de la Provence (Morhange & Weydert, 5000 ans de dégradation de l'environnement au Lacydon de Marseille, 1995).

Le phénomène d'accrétion provenant de grands fleuves et situé « sous le courant » côtier dominant peut également se traduire par la formation de longs panaches d'îles de forme plus ou moins allongée séparant la haute mer de la côte en ménageant des lagunes ou des mers peu profondes. Les courants de marée provoquent l'apparition de passes qui segmentent le panache sédimentaire amenant à la formation de chapelets insulaires « en tiretés », comme sur la côte sud du Texas (Figure 93A) ou « en pointillé » comme c'est le cas pour les îles frisonnes (Figure 93B). Sur le littoral texan, l'apport alluvionnaire sablo-limoneux provient en partie du Rio Grande qui draine une région semi-aride assez montagneuse alors que l'accrétion du rivage de la Frise résulte principalement de matériaux argilo-limoneux transportés depuis les bouches du Rhin et de l'Escaut en mer du Nord depuis une plaine forestière et agricole. Le contexte géomorphologique d'ensemble des côtes de ces deux régions apparaît assez semblable mais se traduit par une « empreinte » insulaire bien

²⁹⁹ Ce qui ne sera pas sans impliquer de nombreux aménagements pour la population locale (adduction d'eau, construction de pont ou mise en place d'un ferry).

³⁰⁰ Cf. Actes de la pagode de Ramisséram ou Rameswaram.

différente qui dépend de plusieurs autres facteurs : importance des marées et de la houle, puissance et régularité des courants côtiers, pente du plateau continental, granulométrie des alluvions, intensités et fréquences des tempêtes, etc. De ce fait, le panache insulaire de la côte texane se différencie clairement de celui des côtes frisonnes, le premier étant formé de longs et minces rubans sableux séparés par d'étroites passes alors le second compose un chapelet d'îles oblongues coupées par de larges chenaux marins. Une autre différence majeure tient à l'absence totale d'îlots inférieurs à 0,4 km² en Frise alors qu'on en compte 256 au Texas. Ces observations sont reflétées par les densités insulaires et la distribution des tailles insulaires. Le contraste est flagrant entre la forte densité des cordons dunaires texans ($Di2 = 287$) comparée à la faible densité du chapelet insulaire frison ($Di2 = 21$). À cela, il faut ajouter que les deux groupes insulaires semblent suivre des lois de distribution dissemblables. Pour les cordons littoraux texans, les données imposent un ajustement « par morceaux » de distributions de type puissance de part et d'autre d'une « lacune insulaire » entre 25 et 120 km². En revanche, le groupe frison présente une répartition régulière de ses tailles insulaires entre 0,4 et 164 km² si bien que le meilleur ajustement statistique s'obtient avec une fonction logarithmique au lieu d'une loi puissance. L'interprétation de ce contraste statistique majeur demanderait un examen détaillé des différents facteurs locaux capables de l'expliquer. La bibliographie assez parcellaire géographiquement et scientifiquement sur les deux domaines insulaires ne permet pas d'en faire une synthèse dans le cadre d'une étude comparative. Faute d'éléments probants, il n'est pas envisageable d'avancer une hypothèse satisfaisante à la fois pour expliquer la lacune insulaire du cordon dunaire texan et la distribution homogène de type logarithmique de l'arc frison.

Cette analyse comparative démontre que des contextes géomorphologiques *a priori* plutôt semblables se traduisent par des structures insulaires ayant des « signatures géographiques » fortement contrastées en fonction du contexte TOA local. Elle tend également à signaler l'intérêt d'une approche statistique des groupes insulaires en révélant des phénomènes peu sensibles par d'autres méthodes.

Les paysages insulaires liés à l'accrétion de sédiments fluviaux et marins déposés par les courants marins s'avèrent plus variés que ne laisserait penser la relative similitude des processus morphogéniques à l'œuvre. Hormis l'île de Sable, toutes les îles alluvionnaires se situent à la périphérie des continents ou des grandes terres insulaires puisqu'elles sont généralement associées aux apports alluviaux des fleuves au niveau des estuaires ou des deltas et aux côtes situées sous le courant des courants côtiers. Les deux critères géographiques (densités $Di2$ exprimées en nombre d'îles pour 10 000 km²) et statistiques (fragmentation b) pour différencier les *islanscapes* définissant une typologie spécifique :

- Des domaines insulaires hyperfragmentés de forte densité comme les îles au débouché du Mississippi ($Di2 = 370 \hat{.}/10^4\text{km}^2$, $b = 0,68$) mais plus encore celles situées au large des deltas sibériens comme la Léna ($608 \hat{.}/10^4\text{km}^2$, $b = 0,95$), l'Indiguirha ($1221 \hat{.}/10^4\text{km}^2$, $b = 0,78$) et la Kolyma ($771 \hat{.}/10^4\text{km}^2$, $b = 0,89$). À ces domaines deltaïques, s'ajoutent certains cordons dunaires frangeant les continents dont le littoral du sud du Texas ($287 \hat{.}/10^4\text{km}^2$, $b = 0,74$). Il faut noter que l'exutoire en mer de certains grands bassins versants dont ceux de l'Amazone, du Congo et du Nil ne comportent pas d'îles au large de leur delta du fait de l'absence de plateau continental de faible profondeur ;
- Des domaines insulaires hypofragmentés de faible densité dont font partie les îles

- frisonnes ($21 \hat{.}/10^4 \text{km}^2$, $b = 0,44$) et celles « en éventail »³⁰¹ du delta du Gange ($56 \hat{.}/10^4 \text{km}^2$, $b = 0,39$) ;
- De grands bancs sableux insulaires plus ou moins isolés comme l'île Dzhalruilgachà à l'embouchure du Dniepr (65 km^2 , Ukraine), l'ex-presqu'île de Baia dos Tigres (105 km^2 , Angola), île Dirk Hartog (627 km^2 , Australie occidentale) née du courant de Leeuwin, l'île Fraser (1673 km^2 , Queensland, Australie).

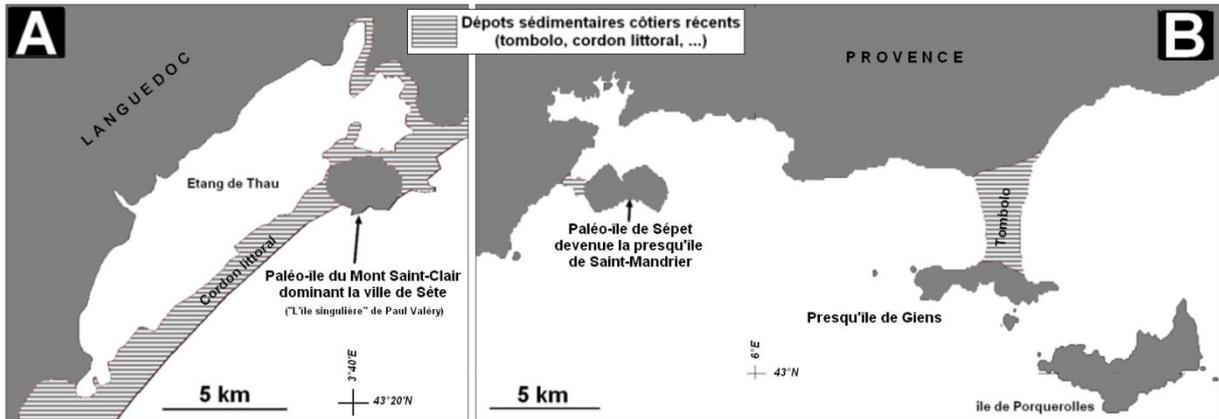


Figure 92 : colmatages alluvionnaires récents sur les côtes méditerranéennes françaises.
 (A) La paléo-île du Mont Saint-Clair près de Sète avec les cordons dunaires fermant l'étang.
 (B) Les presqu'îles de Saint-Mandrier et de Giens avec son double tombolo.

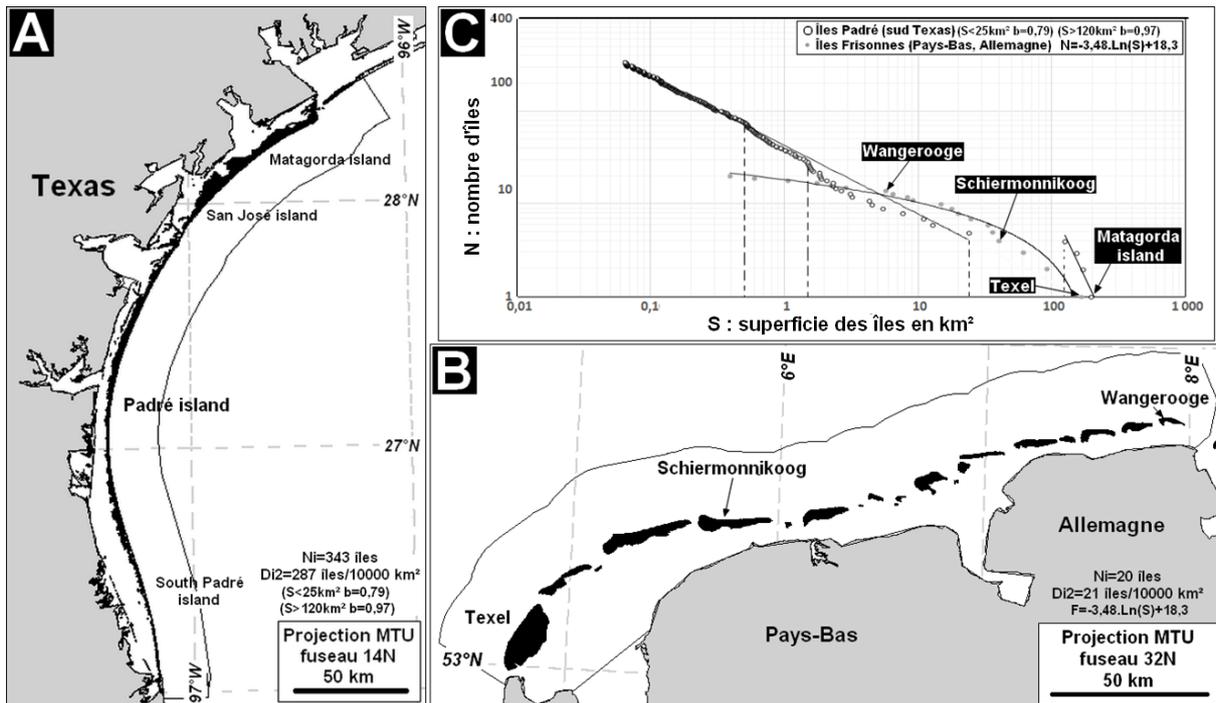


Figure 93: Chapelets de cordons dunaires insulaires le long des côtes continentales.
 (A) Îles Padré au sud du Texas au nord fleuve Rio Grande.
 (B) Îles frisonnes occidentales au nord des embouchures du Rhin et de l'Escaut.
 (C) Courbes NS des superficies des îles Padré et distribution logarithmique pour les îles frisonnes.

³⁰¹ Les îles deltaïques sont décrites comme étant en éventail ou « fan-like » dans la terminologie nord-américaine.

Pour être plus complète, cette typologie aurait dû prendre en compte d'autres critères, dont la forme des îles, notamment leur allongement, la distance à la côte du mainland et le relief, ce dernier étant peu important pour les îles d'accrétion puisqu'il se limite à quelques dunes d'origine éolienne.

2.15. Îles à fjords et de Rebond isostatique post glaciaire (RIPG)

Les processus insularogènes que sont le découpage des côtes par les fjords et l'émergence du fond marin par isostasie seront traités dans le même chapitre car ils sont un héritage de la présence d'inlandsis de grande taille. Néanmoins, leurs genèses sont fort différentes : creusement du socle par les glaciers périphériques pendant la période glaciaire pour les fjords, surrection progressive pendant et bien après la fonte de l'inlandsis pour les côtes à « jardins insulaires » ou *skjærgård*³⁰². Le Rebond Isostatique post glaciaire (RIPG) ne joue un rôle important que lorsque la masse de glace a été suffisante pour provoquer un enfoncement du socle de façon notable. Ainsi, le rebond résultant de la fonte de petits inlandsis ou glaciers locaux développés sur une étendue faible et de moindre épaisseur n'aura que peu ou pas d'effet sur l'insularisation des côtes.

Dans une étude exhaustive et détaillée des côtes à fjords dans le monde, Jules Dufour (2009, pp. 10-30) estime qu'il en existe environ 2 130. Les régions les plus concernées sont le Canada toutes côtes confondues (800), le Groenland (330), la Norvège (235, dont 35 au Svalbard), le Chili (200), les États-Unis (200, Maine, Alaska, État de Washington) et l'Islande (80). Les processus de formation des fjords à partir des inlandsis pendant les périodes glaciaires ne seront pas détaillés ici dans la mesure où notre objectif se résume à en analyser les conséquences sur le découpage des côtes et la formation de paysages insulaires typiques de ces régions. Un des effets les plus visibles est celui du festonnement de leurs côtes et donc de l'accroissement de la longueur du rivage. La Terre de Baffin apparaît à ce titre comme étant l'archétype d'une île à fjords avec un trait de côte de plus de 28 590 km pour 511 900 km², soit un indice côtier modifié (*lcm*) de 11,3³⁰³, alors que littoral du continent africain, bien qu'étant 57 fois plus étendu, ne compte que 50 000 km de côte avec un indice côtier modifié de 2,6. Plus important encore pour notre propos, le découpage du rivage par les glaciers va créer des îles dont le nombre et la taille peuvent être variables en fonction du contexte paléoclimatique (extension et masse des inlandsis) et morphostructural (lithologie, fracturation du socle, relief de l'arrière-pays, présence ou absence d'un plateau continental). La formation de fjords n'implique pas toujours l'apparition de nombreuses îles issues du même découpage à leurs périphéries. C'est le cas notamment pour l'archipel « macroinsulaire » de la Reine-Élisabeth dans l'extrême nord canadien, contrairement à ce qui se passe pour le sud du Chili, la Norvège et la côte ouest du Canada. À une échelle plus locale, la région sud-ouest de l'île du Sud en Nouvelle-Zélande, baptisée Fjordland, comporte 13 fjords assez régulièrement espacés comportant 82 îles sur un front de mer de 220 km. Du fait des proportions réduites de la calotte glaciaire ayant recouvert le sud des Alpes néo-zélandaises pendant la dernière période froide, les effets du RIPG ne sont pas sensibles. La surface ne couvrait que 5 000 km² vers 18000 BP avec une épaisseur moyenne de l'ordre de 200 mètres (Huss & Farinotti, 2012).

³⁰² Le terme anglais « *skerry guard* » dérive du suédois et signifie « essaims d'îles basses et de récifs ».

³⁰³ Pour rappel, l'Indice côtier modifié *lcm* appliqué à une terre émergée, qu'elle soit continentale ou insulaire, fait le rapport entre la longueur de la côte mesurée et le périmètre d'un cercle de même surface. Une valeur de 11,3 signifie que l'île de Baffin présente une longueur de côte 11,3 fois supérieure à celle d'une île parfaitement circulaire de superficie équivalente.

À titre de comparaison, son volume n'était que de 1 000 km³ pour environ un million de km³ pour l'Islande (Einarsson & Albertsson, 1988) .

Comme vu précédemment en Figure 6, les hautes latitudes concentrent une grande partie des îles du fait de l'ennoisement progressif des fjords pendant la transgression flandrienne et d'un RIPG encore effectif à l'heure actuelle. Il convient donc de préciser davantage ces deux processus de fjordisation et de RIPG. Les calottes glaciaires, même de faible ampleur, génèrent par simple glissement gravitaire sur le socle un ensemble d'exutoires évacuant une partie de la glace accumulée. La puissance érosive de ces langues glaciaires provoque un découpage et un creusement du bourrelet liminaire et du plateau continental qui se traduit lors des interglaciaires par des littoraux à fjordss composant un puzzle de presqu'îles, d'îles et de chenaux imbriqués. La largeur aussi bien que la longueur et l'espacement des fjords dépendent de la magnitude des glaciers qui les ont formés tout autant que de la géologie et de la fracturation du socle. Il en va de même pour les îles plus au large dont la taille dépend de l'espacement des failles principales qui compartimentent le socle. Ainsi les régions insulaires des longues façades sud du Chili (1650 km) et du nord-ouest de l'Amérique du Nord (États-Unis-Canada-Alaska, 1450 km) comportent des îles de grande étendue (maxima respectifs de 28 700 km² et de 6141 km²) alors que celles de la façade maritime norvégienne (2563 km) sont plus modestes (max 2200 km²). Comme indiqué précédemment, le désenglacement des côtes occasionne une détente lithostatique³⁰⁴ généralement de l'ordre d'1 cm/an comme en Patagonie (Jaillot & al., 2008), mais pouvant atteindre des valeurs de 3 cm/an en Alaska (Larsen & al., 2005) voire 6 cm/an dans la baie d'Hudson. Les plages soulevées de Norvège se situent à la côte 60 mètres, ce qui dénote un RIPG proche d'1 cm/an en moyenne suite à la disparition totale de l'inlandsis scandinave vers 8000 BP (Peltier, 1998, p. 626).

Les conséquences géographiques de la surrection rapide du fond marin s'observent sur la côte nord de la Baltique et dans une moindre mesure dans la baie d'Hudson. Ces deux régions correspondent à des mers épigéniques développées respectivement au droit de la partie centrale la plus épaisse des inlandsis laurentidien et fénno-scandien (Voir Figure 84 et Figure 85A). Hormis l'extrême nord du golfe de Botnie, l'ensemble du paléolac de la Baltique était déjà hors glace dès 10000 BP alors que ce ne sera qu'en 8000 BP pour la baie d'Hudson. Pour la Baltique, le rebond est encore de 9 mm/an dans le fond du golfe de Botnie, 5 mm/an aux îles Aaland et proche de zéro dans le sud de la Suède, ceci expliquant que la Scanie apparaisse comme le seul littoral suédois ne comportant presque pas d'îles. C'est dans le golfe de Botnie que le phénomène a eu la plus grande ampleur dans la durée avec un soulèvement d'environ + 285 mètres en 10 000 ans, d'où résulte une forte dynamique paysagère des littoraux ainsi décrite par Jean-Michel Caron :

« Sur cette côte [du golfe de Botnie], des îles apparaissent et s'unissent, des péninsules grandissent, des lacs se forment au fond des baies et deviennent des marais et des fagnes tourbeuses. » (Caron & al., 1992)

La carte de la Figure 94A indique la localisation des principales régions à fjordss et à RIPG comportant de fortes densités insulaires supérieures à 50 îles/10 000 km². Leur répartition correspond étroitement à l'extension des inlandsis de la dernière glaciation du Würm en particulier dans les régions où ils étaient les plus épais, soit environ 4000 mètres en

³⁰⁴ Cette détente résultant d'une diminution de la pression sur les couches sous-jacentes s'observe suite à l'érosion des reliefs et dans les karsts par la présence ou l'absence d'eau dans les cavités.

Amérique du Nord et 3000 mètres en Scandinavie et au Groenland, enfin de 600 à 1 000 mètres dans les Andes patagoniennes. À moindre échelle, des paysages à fjords s'observent au nord-ouest de l'Islande, au Svalbard (Spitzberg), en Nouvelle-Zemble, aux Kerguelen, en Géorgie du Sud, dans la partie occidentale de l'Île de Jade en Nouvelle-Zélande et sur le versant ouest de la Péninsule antarctique. Associées à d'anciens inlandsis, presque toutes ces îles sont péricontinentales (type $IP\alpha$) ou à la périphérie de grandes îles (Islande, Kerguelen, île du Sud en Nouvelle-Zélande). L'ensemble insulaire ainsi défini regroupe plus de 5 000 îles couvrant 340 000 km², soit 50 % des îles de plus 0,06 km² recensées à l'échelle mondiale (Figure 94B). En intégrant l'ensemble des territoires considérés, la densité moyenne de 348 îles/10 000 km² est bien supérieure à la moyenne mondiale obtenue pour la zone péricontinentale ($IP\alpha$), qui n'est que de 108. De même, la fragmentation moyenne telle qu'indiquée par l'exposant de Korčák pour ces régions ($b = 0,67$) est supérieure à la valeur estimée pour l'ensemble de terres émergées ($b = 0,6$). Il convient de constater que ces « moyennes » ne rendent pas compte de la disparité importante entre divers types de littoraux fortement insularisés et d'autres côtes. La combinaison ces deux éléments permet de proposer une typologie (Figure 94C) :

- Type fenno-scandien ($523 < Di^2 < 2015$, $0,73 < b < 0,95$). Le domaine côtier des trois pays scandinaves que sont la Norvège, la Suède et la Finlande se distingue par une densité exceptionnelle de respectivement 523, 1 065 et 2 045 îles/km². Cela se combine avec une hyperfragmentation (coefficient de Korčák $b > 0,6$) plus ou moins marquée allant de 0,73 pour la Norvège à 0,95 pour la Finlande en passant par 0,91 pour la Suède ;
- Type nord-américain ($258 < Di^2 < 411$, $0,56 < b < 0,91$). Ce type se définit par des densités fortes et une fragmentation moyenne à forte. Il inclut les côtes canadiennes, l'Alaska, les côtes nord des *conterminous* USA, le Groenland et le sud du Chili. Il est possible de distinguer un sous-type de fragmentation moyenne de l'ordre de 0,6 (Groenland, côte ouest du Canada et Alaska et Chili) d'un sous-type à forte fragmentation supérieure à 0,7 (nord du Canada, côte est du Canada et baie d'Hudson) ;
- Type britannique ($132 < Di^2 < 158$, $0,56 < b < 0,72$). La densité insulaire correspond à la moyenne d'ensemble. Le littoral insulaire de l'Irlande se distingue de celui de l'ouest de l'Écosse par une plus forte fragmentation (0,72 au lieu de 0,56) ;
- Type insulaire austral ($49 < Di^2 < 138$, $0,48 < b < 0,56$) à faible densité (i.e. Géorgie du Sud) et faible fragmentation (i.e. Kerguelen).

Le graphique de la Figure 94C indique qu'il existe une faible corrélation entre la densité insulaire Di^2 et l'exposant de Korčák b telle que $b \approx 0,26 \cdot Di^{0,17}$. Le fait que le critère géographique de densité insulaire ait tendance à augmenter lorsque le critère statistique de fragmentation est plus marqué nous apparaît somme toute cohérent. On notera cependant que certaines régions s'écartent de ce modèle, en particulier l'Islande et le nord du Canada, caractérisés par une fragmentation importante comparée à la densité, et la côte du sud chilien, qui se signale, à l'inverse, par une densité forte par rapport à sa fragmentation.

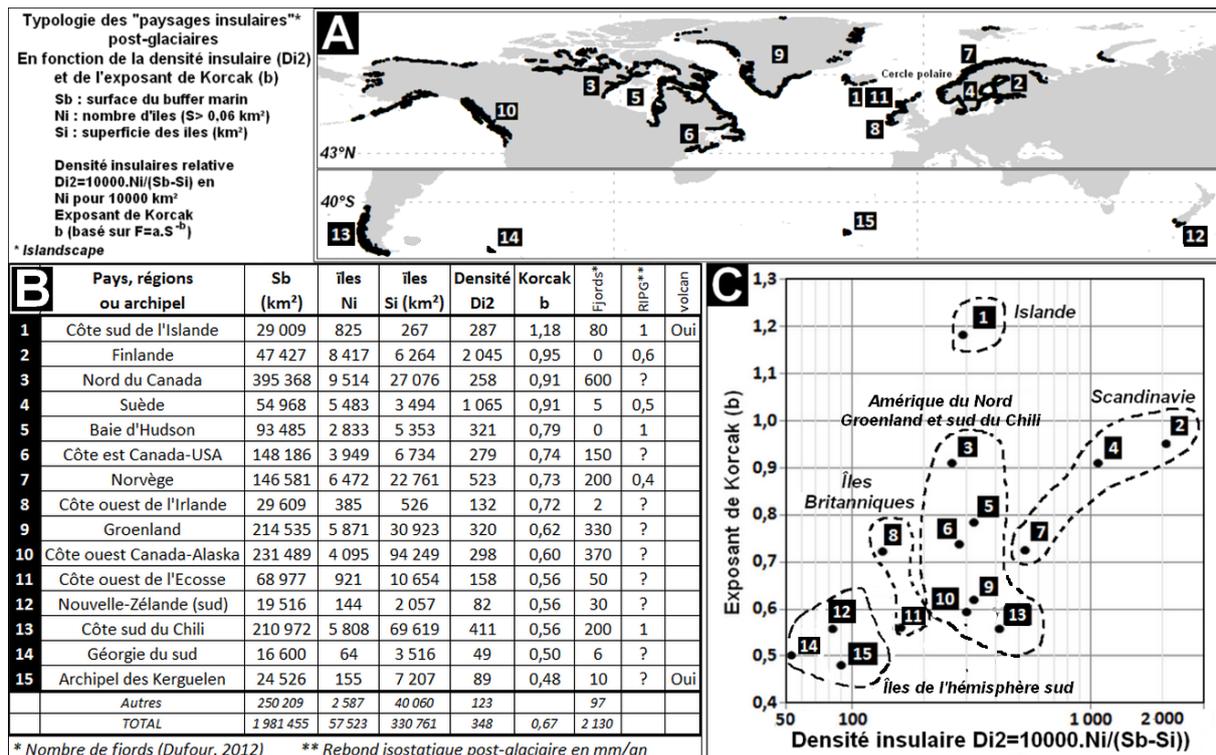


Figure 94 : Typologie des paysages insulaires (*islandsapes*) des régions à fjords et à RIPG.
 (A) Régions de forte densité insulaire ($D_{i2} > 80$ îles/10 000 km²) aux hautes latitudes.
 (B) Liste des régions par ordre décroissant d'exposant de Korčák (b).
 (C) Typologie en fonction de la densité insulaire D_{i2} et de l'exposant de Korčák (b).

Les côtes insulaires de l'Islande semblent un cas d'espèce par son hyperfragmentation ($b = 1,15$) qui est bien supérieure à celle du type fenno-scandien alors que sa densité est du même ordre que dans le type nord-américain. Cette singularité reflète en quelque sorte la complexité de son contexte morphostructural associant des côtes à fjords entaillant des trapps basaltiques fortement insularisés dans les baies de Breidafjordur et de Faxafloi, des îles volcaniques³⁰⁵ et des cordons alluviaux alimentés par les eaux de fontes des grands glaciers sur la côte sud (Figure 95A). Selon une étude de 2015, la diminution rapide de la masse de ces calottes glaciaires, dont le Vatnajökull, serait responsable d'un rebond de l'ordre d'1 à 3 cm/an le long de la côte méridionale de la grande île³⁰⁶. Une analyse plus détaillée de la distribution de la taille des îles démontre que cette hyperfragmentation est due aux fragments insulaires de moins de 0,7 km² de cette région de l'Islande (Figure 95D). Ils correspondent majoritairement aux îlots rocheux ou morainiques des deux baies occidentales (88 %), le reste étant lié à des bancs alluviaux sur la côte méridionale (10 %) ou à des îles volcaniques de l'archipel Vestmann (2 %). La configuration géographique d'ensemble des deux baies de Breidafjordur et de Faxafloi et de la péninsule de Westfjords (Figure 95A) paraît assez proche de celle de l'archipel des Kerguelen y compris en termes d'échelle et de géologie (Figure 95B). Pourtant, ces deux régions s'opposent en matière de densité insulaire (287 îles/10 000 km² pour l'Islande, seulement 89 pour les Kerguelen) et plus encore pour ce qui est de la fragmentation ($b=1,18$ pour l'Islande, 0,48 pour les Kerguelen). L'hypofragmentation des

³⁰⁵ La nouvelle île volcanique de Surtsey est apparue en novembre 1963 pour atteindre une superficie maximale de 2,65 km². Elle ne fait plus qu'1,41 km² actuellement du fait de l'érosion marine due aux courants et à la houle sur des matériaux volcaniques non consolidés.

³⁰⁶ Source Kristín Hermannsdóttir, meteorologist, South East Iceland Nature Center (Náttúrustofa Suðausturlands), Hornafjörður, Iceland.

Kerguelen est observée pour les fragments insulaires inférieurs à 35 km². L'interprétation d'un contraste aussi marqué dans des régions présentant de fortes analogies n'est pas évidente.

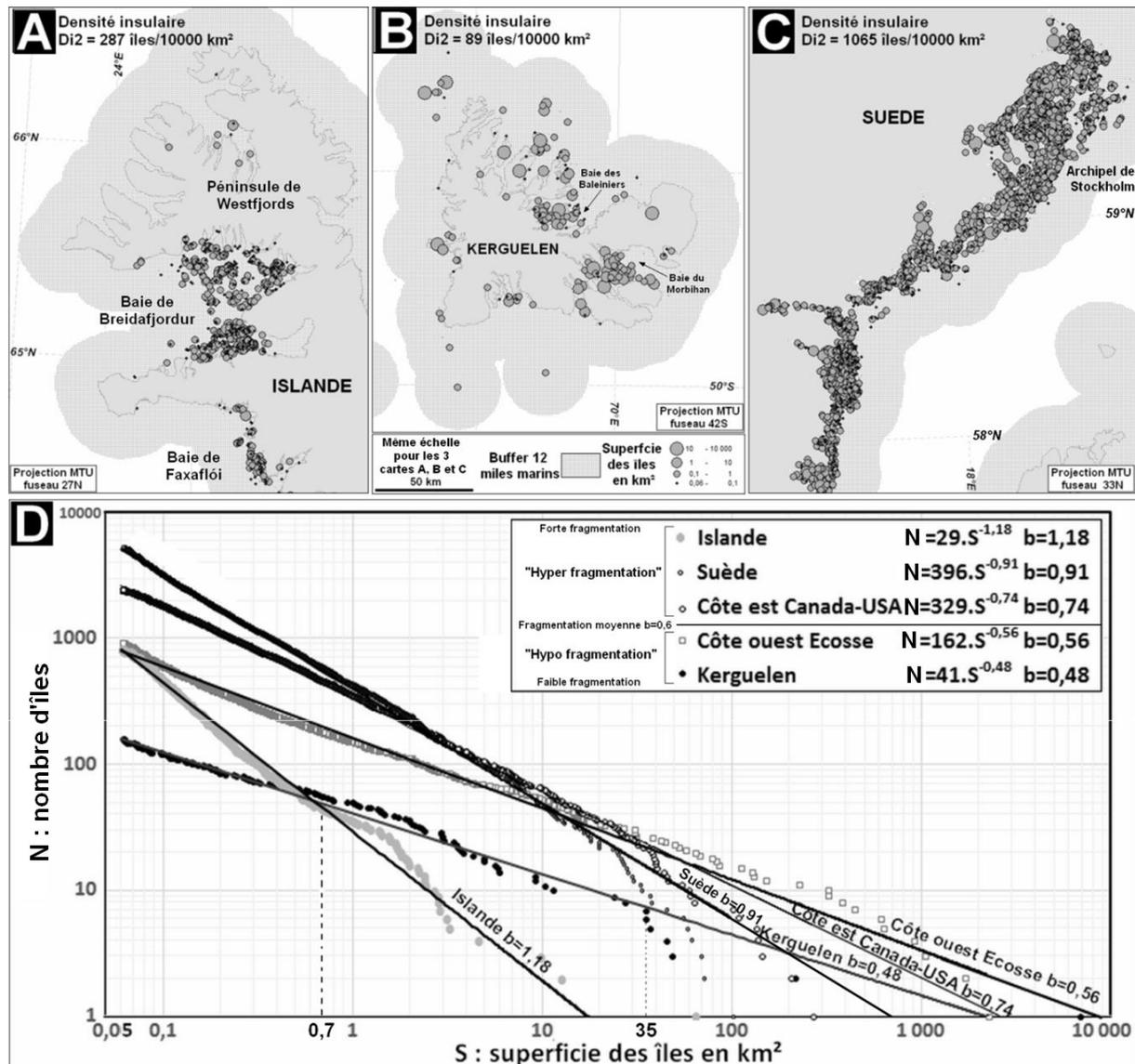


Figure 95 : Paysages insulaires ou *islandscapes* à fjords et/ou RIPG.

(A, B et C) En fonction de la densité insulaire relative ($Di2$).

(D) En fonction des courbes NS et de l'exposant de Korčák (b). On notera la présence de rupture de pente ou *knickpoint*³⁰⁷ correspondant à des changements de tendances vers 35 km² pour la Suède, la côte est de l'Amérique du Nord et les Kerguelen. Ces tendances « par morceaux » s'observent également pour l'Islande mais pour un seuil de 0,7 km².

Certes, les contextes tectoniques diffèrent puisque l'Islande n'est qu'une partie émergée de la dorsale médio-atlantique impliquant divers processus magmatiques ainsi qu'une sismologie active alors que l'archipel des Kerguelen, y compris son vaste plateau continental environnant, procède des trapps basaltiques anciens avec un volcanisme éruptif limité au Mont

³⁰⁷ Les « ruptures de pente » des courbes NS s'apparentent aux « *knickpoints* » observés sur les profils de versant ou de rivière. Bien que relevant de la géomorphologie et non des statistiques, le mot *knickpoint* semble judicieux pour décrire les changements de tendance d'une distribution statistique de fragments.

Ross, ce dernier comportant encore une mince calotte glaciaire à son sommet. Les deux domaines ont été complètement englacés pendant la dernière période froide et donc ont subi l'effet de subsidence de la lithosphère en proportion de la masse de leur inlandsis, sans doute bien moindre aux Kerguelen. Pour ces dernières, les études géophysiques montrent que la croûte lithosphérique y est particulièrement épaisse et immobile au-dessus d'un point chaud expliquant l'accumulation dans la longue durée de strates basaltiques. Subséquemment, la microplaque des Kerguelen dispose d'une grande inertie isostatique car elle fut peu affaissée par une calotte glaciaire ne couvrant que 10 000 km² et dont l'épaisseur devait être assez réduite. Ces éléments convergent pour suggérer que le réajustement isostatique a dû y être de courte durée et de faible ampleur, ce qui n'est pas le cas de l'Islande. Un autre élément plaide en faveur du rôle du rebond isostatique dans la dynamique côtière islandaise si l'on compare sa courbe de distribution des tailles de fragments insulaires avec celle du littoral suédois (Figure 95). Il ne fait aucun doute que l'exceptionnelle hyperfragmentation des côtes de la Baltique y compris la Suède ($b=0,91$) procède comme on l'a vu d'un phénomène généralisé de RIPG depuis plusieurs millénaires et encore actif de nos jours (Voir carte de la Figure 85A). La valeur encore plus forte observée dans la partie sud et ouest de l'Islande trouverait son explication par une surrection isostatique provoquant l'élévation du fond marin des deux baies occidentales et de leurs dépôts morainiques et fluvio-glaciaires, autant que par les alluvionnements importants de la côte méridionale, les îles volcaniques de l'archipel Vestmann ne jouant qu'un rôle statistique mineur dans l'hyperinsularité d'ensemble.

Cet examen montre que les deux critères de fragmentation et de densité, dont la valeur de l'exposant de Korčák, permettent de discerner le rôle du RIPG dans la formation des paysages insulaires. Il est déterminant pour les littoraux fénno-scandiens de la Baltique (Finlande et Suède) ainsi que pour la Norvège où il se combine avec le découpage insulaire dû aux fjords. Il est sensible sur les côtes de l'Amérique du Nord en particulier sur les côtes arctiques (0,91), dans la baie d'Hudson (0,79, même type de mer épicontinentale postglaciaire que la Baltique) et sur la côte est du Canada (0,74, Figure 95D). À l'inverse, la côte occidentale de l'Écosse, bien qu'ayant une densité assez forte ($Di2=158$), se révèle peu fragmentée ($b = 0,56$) à l'instar des Kerguelen. Le Groenland et la côte ouest du Canada, y compris le sud de l'Alaska, sont « mésofragmentés » avec des valeurs proches de 0,6 pour l'exposant de Korčák (b) et des densités insulaires assez fortes de l'ordre de 300 îles/10 000 km². Il va de soi que dans le cas du Groenland, l'isostasie ne peut être que limitée tant que la masse de son inlandsis ne diminue pas drastiquement, ce qui pourrait se produire selon certains scénarii de changement climatique. La configuration des côtes andines patagoniennes s'apparente aux précédentes avec une densité légèrement plus forte ($Di2 = 411$) et une fragmentation plus faible ($b=0,56$).

2.16. Les îles volcaniques et trapps basaltiques

Les processus volcaniques nous concernent pour autant qu'ils ont une influence sur les caractéristiques des espaces insulaires et archipélagiques. Aussi ne seront abordés que les éléments géomorphologiques et géologiques ayant une influence directe sur la géographie des îles³⁰⁸. De façon générale, il faut distinguer les phénomènes locaux de type cône volcanique ayant un relief plus ou moins érigé ou arrondi en fonction de la viscosité du magma, de ceux des vastes coulées basaltiques liées à des fissures de la lithosphère, et qui se caractérisent par la formation de plateaux de plusieurs centaines de milliers de km², dont la plaque du Deccan constitue le cas le plus typique. Les trapps basaltiques, du fait de la fluidité du magma, génèrent des surfaces tabulaires sur de vastes étendues, par exemple aux Kerguelen, en Islande et dans l'archipel Penghu au large de Taiwan. Pour les volcans, en fonction de la fluidité des laves, qu'elles soient andésitiques ou basaltiques, les coulées vont générer des formes amples, arrondies et peu pentues comme c'est le cas pour les volcans de points chauds, ou des cônes plus pointus avec forte pente. En raison du relief, les seconds seront sujets à des effondrements importants (îlot de Ball's Pyramid au large de Lord Howe), alors que les premiers évolueront de façon progressive sous l'effet de l'érosion et de la subsidence postéruptive (Hawaï, Comores, Mascareignes, ligne Bioko-Annobon). Les volcans au profil surbaissé sont liés aux processus éruptifs intraplaques alors que les cônes volcaniques seront davantage associés aux zones de subduction (îles de la Sonde) ou à des failles transformantes (Açores, Saint-Paul et Amsterdam).

Fait est que la majorité des îles volcaniques se localisent dans la zone comprise entre 33° N et 33° S et permettent ainsi le développement de colonies madréporiques de subsurface responsables de l'apparition de récifs-barrières et de récifs frangeants pouvant être partiellement émergés sous la forme d'îles basses (ou *motus*) formées de sables coralliens (Figure 96). Nous avons vu que les espaces insulaires à fjords étaient peu ou prou associés à des phénomènes de RIPG générant des kyrielles d'îlots plus petits que ceux issus du découpage par les langues glaciaires. La plupart des volcans insulaires intertropicaux sont associés le long de leurs côtes à des formations récifales et des mangroves qui vont modifier la dynamique du littoral. À l'instar des côtes à fjords et RIPG, les paysages insulaires associant de hautes îles volcaniques avec des îles basses coralliennes sont polygéniques en combinant deux types de formation de nature totalement différentes et composant des structures géographiques fort contrastées tant en matière de taille, de relief et de forme. Au même titre que les volcans sont des reliefs « postiches » d'origine magmatique venant coiffer leur socle continental ou océanique, les formations coralliennes d'origine madréporique se surimposent à la périphérie des premiers composants. On a donc un double empilement de deux processus insularogènes ayant des évolutions géomorphologiques spécifiques, même si celle des seconds dépend de celle des premiers. De même, le relief volcanique est contraint par la dynamique de son socle lithosphérique et des mouvements des plaques tectoniques et des courants de convection de l'asthénosphère. De cet empilement de processus d'échelles temporelle et spatiale variables résulte une infinité de conditions lithologiques, morphostructurales, tectoniques et géomorphologiques, de telle sorte que chaque île volcanique, notamment lorsqu'elle est associée à des formations coralliennes, peut se prétendre unique et créer un nuancier subtil de paysage.

³⁰⁸ Sur la typologie des volcans et trapps, se reporter au *Précis de géomorphologie* de Max Derruau (1965, pp. 269-304).

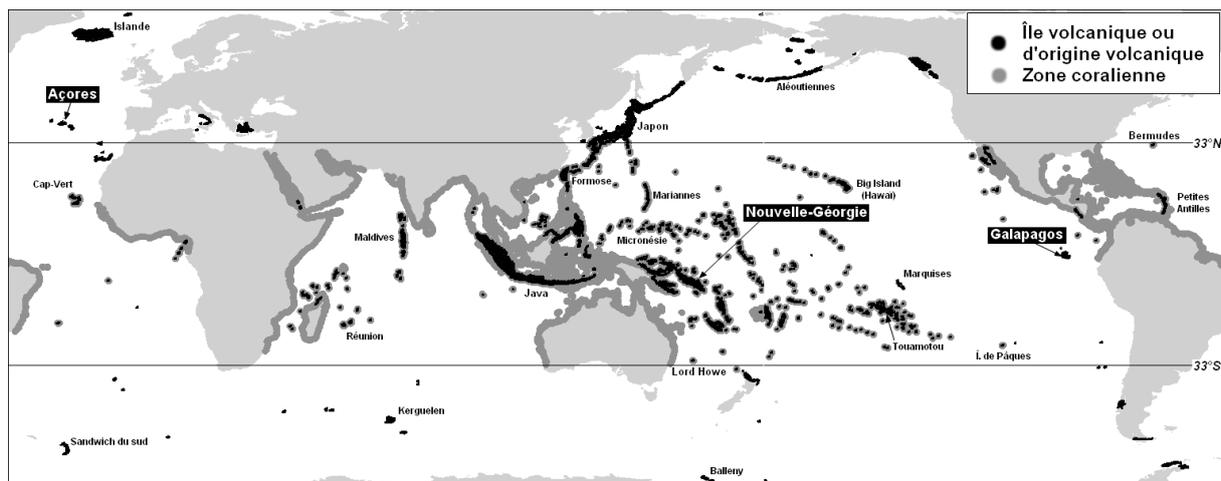


Figure 96 : Îles volcaniques ou d'origine volcanique et zone corallienne entre 33° N et 33° S.

Trois exemples d'archipels volcaniques viendront illustrer cette diversité en fonction de la présence ou de l'absence de formations coralliennes. Celui de la Nouvelle-Géorgie et de ses terres voisines aux Salomon comporte à la fois une grande île résultant de la coalescence de trois volcans (mainland Nouvelle-Géorgie), plusieurs îles monovolcaniques (Kolombangara, Ngattokae) ainsi qu'un cortège d'îlots associé aux récifs frangeants autour du mainland (Figure 97A). Les archipels des Galapagos et des Açores sont peu ou pas associés à des formations madréporiques, ainsi que l'attestent leurs cortèges réduits d'îlots dispersés entre les grandes terres (Figure 97B et C). La densité D_{i2} est de 164 îles/ 10^4 km² pour le groupe insulaire de la Nouvelle-Géorgie, une des valeurs les plus fortes observées pour un ensemble volcanique océanique, tandis que celle des Galapagos et des Açores n'est que de 19 et 10 îles/ 10^4 km². L'analyse comparative des distributions SN pour ces trois entités volcaniques montre qu'il existe une différence importante entre le dispositif statistique de la Nouvelle-Géorgie et les Açores. Pour ce qui est des îles de Salomon, sous climat équatorial, les îles monovolcaniques ($10 < S < 500$ km²) sont hypofragmentées ($b=0,32$) alors que les fragments insulaires plus petits ($0,06 < S < 10$ km²) présentent une mésofragmentation ($b=0,63 \approx 0,6$) pour l'essentiel issue des récifs-barrières, des récifs frangeants et d'îlots intralagonaires. Le cas de l'archipel central des Açores présente une distribution bien plus erratique avec une absence de fragments insulaires compris entre 0,25 et 65 km² qui, combinée à un faible échantillonnage des superficies avec seulement 12 îles, n'autorise pas le calcul d'une loi de distribution significative. Les quelques îlots ne sont que des chicots rocheux sans trace de coraux du fait de la latitude. La distribution des tailles insulaires du groupe central des Galapagos se signale par une notable ressemblance avec celle observée sur la Nouvelle-Géorgie : hypofragmentation pour les fragments volcaniques compris entre 0,5 et 1 000 km² ($b=0,28$) et mésofragmentation entre 0,06 et 0,5 km² ($b=0,63 \approx 0,6$). La différence entre ces deux ensembles insulaires tient à la valeur du seuil entre les grandes îles et leurs cortèges de fragments plus petits qui sont de 10 km² pour la Nouvelle-Géorgie et 0,5 km² pour les Galapagos. S'il est clair que ces dernières ne disposent pas de récifs-barrières ou de récifs frangeants du fait des eaux froides de la dérive équatoriale du courant de Humboldt, elles comportent en revanche quelques îlots coralliens³⁰⁹ dont la fonction de distribution est

³⁰⁹ Les quelques récifs coralliens des Galapagos ont un intérêt scientifique car la courantologie particulière et le faible impact anthropique en font des sites expérimentaux idéaux pour étudier les effets potentiels du changement climatique et des oscillations

identique à celle de la Nouvelle-Géorgie.

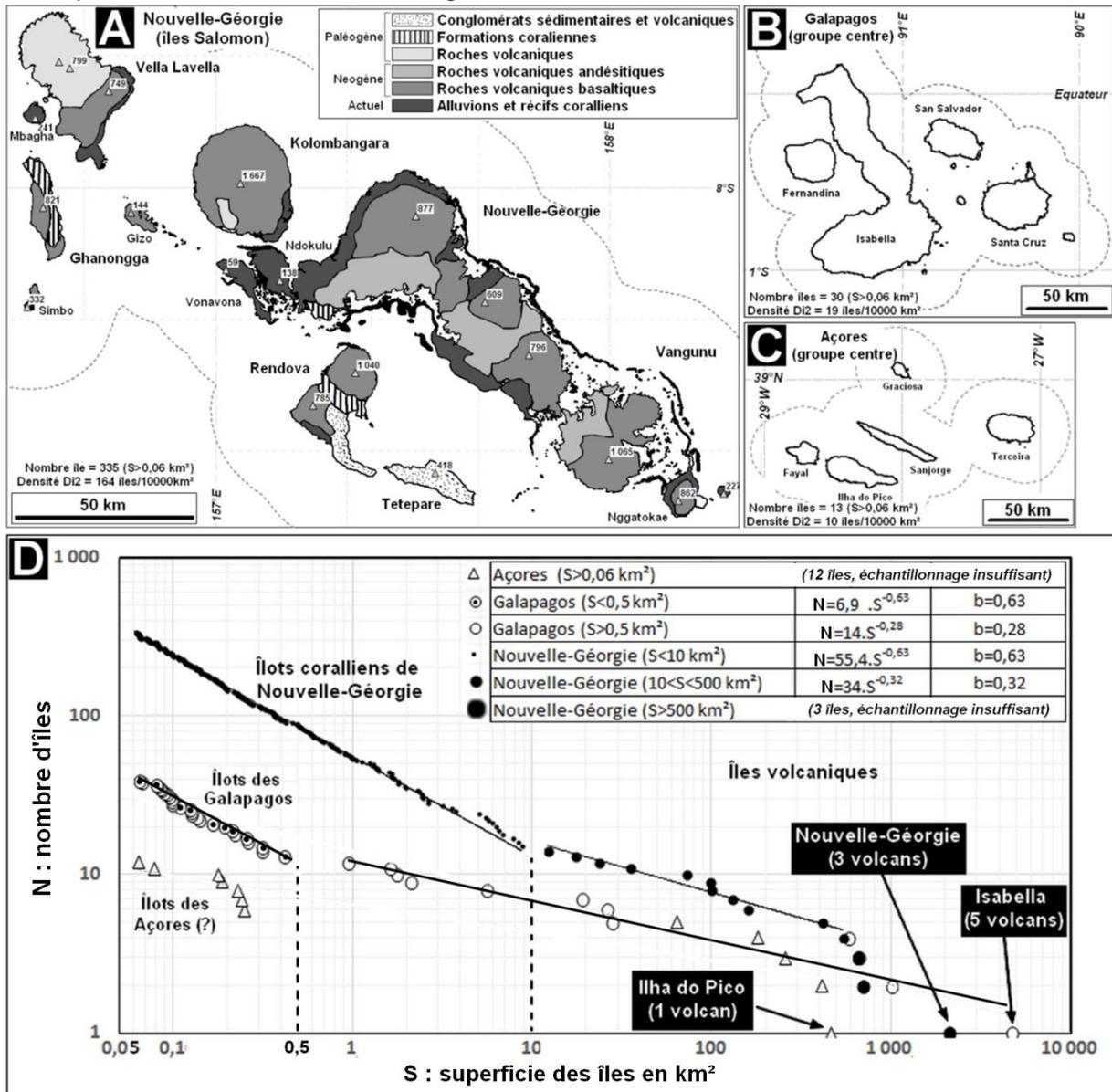


Figure 97 : Comparaison d'archipels volcaniques

en fonction des densités insulaires (D_i2) et de l'exposant de Korčák (b).

- (A) Géologie de la Nouvelle-Géorgie³¹⁰ avec grandes îles volcaniques et îlots coralliens.
- (B) Groupe central de l'archipel des Galapagos avec quelques îlots, dont certains coralliens.
- (C) Archipel du groupe central des Açores sans îlots coralliens.
- (D) Courbes NS et exposants de Korčák « par morceaux » appliqués aux trois archipels.

Sur ces exemples, le fait que la fonction doive être calibrée par classes de superficie s'impose de lui-même, si bien que l'ajustement « par morceaux » apparaît comme une évidence dans la simulation de la Figure 38. Il faut rappeler que le même phénomène a déjà été observé précédemment dans des contextes et à des échelles diverses : au Vanuatu (Voir Figure 31), dans la Baltique et en Méditerranée (Figure 37), sur les littoraux du sud de la Chine

des températures océaniques sous l'effet du phénomène ENSO/ENOA (cf. expédition de la *Khaled bin Sultan Living Oceans Foundation* en partenariat avec l'Université de Miami sur le site de la *Living Oceans Foundation*).

³¹⁰ Geological map of the British Solomon Islands, Department of Geological Survey, British Solomon Islands Protectorat. Crown copyright, 1969.

(Figure 109A), pour les cordons littoraux du sud du Texas (Figure 93C), au sud-ouest de l'Islande (Figure 95D) et en Nouvelle-Géorgie (Figure 97D). L'examen d'autres archipels volcaniques permet de penser que ce phénomène de « multidistribution » des tailles de fragments insulaires s'avère suffisamment fréquent et homogène pour qu'il ne soit dû qu'à un biais d'échantillonnage ou à un contexte morphotectonique particulier, notamment à l'échelle de la Macaronésie (Figure 98A). Le triptyque statistique se compose de grandes îles hyperfragmentées ($S > 200 \text{ km}^2$, $b = 1,2$), d'une classe d'îles intermédiaires fortement hypofragmentées ($0,3 < S < 200 \text{ km}^2$) et de petites îles hypofragmentées ($S < 0,3 \text{ km}^2$, $b = 0,41$). Une distribution analogue est également sensible à l'échelle des archipels des Açores, des Canaries et du Cap-Vert. L'ensemble macaronésien, comme les archipels qui le composent, est entièrement composé de stratovolcans associés à des points chauds et sans îlots coralliens, y compris le Cap-Vert (Figure 98B) posé sur la partie océanique de la plaque africaine à l'est de la dorsale médioatlantique. On peut donc à bon droit parler d'un type archipélagique macaronésien caractérisé par une polyfragmentation en trois classes de superficie et par une densité insulaire d'ensemble de $8,5 \text{ îles}/10^4 \text{ km}^2$ proche de celle des principaux archipels (Açores 8,6, Canaries 7,8 et Cap-Vert 9,1). On peut évoquer une similitude de la distribution en « trois segments » de l'archipel de Nouvelle-Géorgie avec un « replat intermédiaire » pour les îles comprises entre 10 et 400 km^2 (Figure 97D), de même que pour le Vanuatu, entre 50 et 200 km^2 (Voir Figure 31), bien que ces deux archipels comportent un panache de petits fragments coralliens importants responsables de leurs plus fortes densités, respectivement 164 et $21 \text{ îles}/10^4 \text{ km}^2$. En élargissant l'analyse à d'autres domaines insulaires volcaniques, la même structure statistique se rencontre dans des contextes assez variés (Figure 98B), dans l'Atlantique (Ligne Bioko-Annobon), dans la Caraïbe (arc interne des Petites Antilles au nord des Grenadines), dans le Pacifique (Hawaï, Mariannes, grande et petites Samoa), dans l'océan Indien (Comores, Mascareignes) et même dans la zone périantarctique (Crozet). À l'instar du segment statistique pour les petits fragments insulaires inférieur à 1 ou 10 km^2 , les densités signalent la présence ou l'absence d'îlots coralliens, de récifs-barrières ou frangeants intralagonaires confondus (Figure 98C) :

- Densités faibles $Di < 15 \text{ îles}/10^4 \text{ km}^2$ avec peu ou pas de formations coralliennes émergées : Mariannes (7,8), Bioko-Annobon (12,2), Crozet (12,2), Samoa (12,7) ;
- Densités moyennes $15 < Di < 30 \text{ îles}/10^4 \text{ km}^2$ avec quelques îlots coralliens : Hawaï (15,4 surtout dans à l'ouest de l'archipel), Mascareignes (15,4 surtout autour de Rodrigues), Comores (19,3 surtout à Mayotte), Vanuatu (21,3), Petites Antilles (28) ;
- Densités fortes $Di > 30 \text{ îles}/10^4 \text{ km}^2$ pouvant dépasser 100 comme dans le cas extrême de la Nouvelle-Géorgie (164) comportant d'innombrables formations coralliennes émergées principalement autour du mainland, y compris des îles dépassant 10 km^2 .

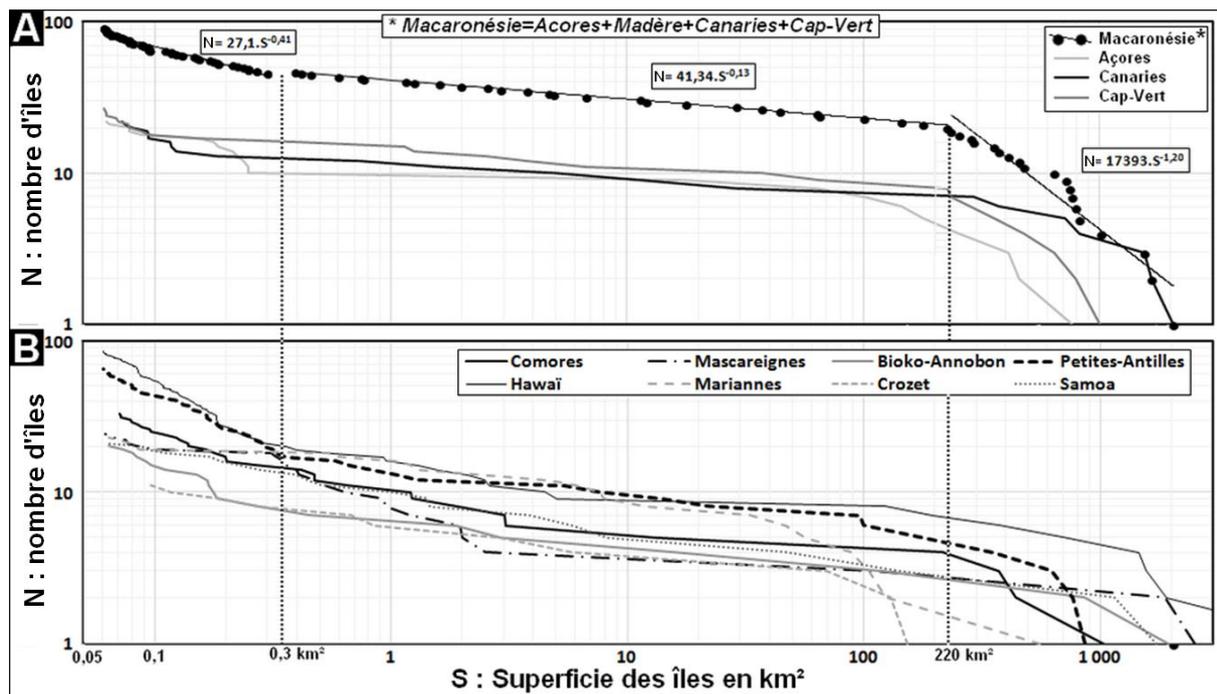
Étant donné qu'il existe une loi de taille des fragments assez constante pour les archipels de type macaronésien, il est possible d'établir un indice simple faisant le rapport entre la fréquence des fragments inférieurs à 1 km^2 et ceux supérieurs à 100 km^2 . Les premiers peuvent être soit les ultimes chicots rocheux d'anciens volcans érodés soit des récifs coralliens émergés. Cet indice $PiGi$ rend compte de l'importance relative des petits fragments par rapport aux grands. Il est faible ($PiGi < 3$) pour l'ensemble macaronésien, Crozet et les Mariannes qui ne comportent pas d'îlots coralliens. Il est de l'ordre de 5 pour la plupart des autres archipels à l'exception de Hawaï et des Petites Antilles où il est proche de 9. Le même indice appliqué à la Nouvelle-Géorgie donne une valeur de 40 signalant ainsi l'importance des formations coralliennes dans la composition géographique de cet archipel dont les îles

principales sont volcaniques. À titre anecdotique, nous citerons la chaîne de stratovolcans de l'archipel des Balleny au large de l'Antarctique. Elle comporte trois grandes terres de plus de 15 km², seulement cinq fragments insulaires de 1 à 5 km² et aucun en-dessous de 1 km². Il apparaît donc « macaronésien » et sans aucun doute possible indemne de toute interférence avec des formations madréporiques puisqu'il est au niveau du cercle polaire antarctique. On notera que la gamme de superficie des îles Balleny est proche de celle des Crozet.

L'interprétation géomorphologique du type macaronésien s'avère délicate car il inclut à la fois des stratovolcans (Macaronésie, Balleny) et des volcans boucliers (Hawaï, Mascareignes) souvent associés à des points chauds sous des plaques océaniques créant des alignements insulaires (Hawaï, Bioko-Annobon, Comores, Mascareignes, Crozet, Balleny) ou des « *clusters* » (Macaronésie, dont plusieurs pour les Açores). Dans le cas des archipels présentant un alignement, il résulte du déplacement de la plaque au-dessus d'un point chaud stable une gradation dans l'évolution des parties émergées reflétant l'ancienneté de la phase éruptive : Hawaï, Bioko-Annobon, Comores, Mascareignes, Samoa. Les îles les plus anciennes, fort érodées, sont de petite taille et souvent associées à des formations coralliennes enserrant un lagon (Rodrigues, Mayotte, nord des îles Mariannes, ouest de l'archipel hawaïen), l'ultime étape pouvant être celle d'un atoll ne présentant plus aucun affleurement de roches volcaniques. Les îles les plus récentes sont les plus étendues, les plus élevées, de forme plus ou moins circulaire (Big Island à Hawaï, la Réunion, Grande Comore, Bioko). À ces dynamiques géotectoniques intraplaques se joignent des arcs insulaires positionnés le long de lignes de contact entre les plaques comme c'est le cas pour les Mariannes et les Petites Antilles. Le fait qu'il y ait « convergence évolutive » des paysages insulaires dans des contextes géodynamiques aussi différents s'avère *a priori* surprenant. Avant d'émettre des hypothèses, il apparaît utile d'analyser d'autres structures archipélagiques d'origine volcanique afin de mieux cerner la sensibilité des résultats fournis par les méthodes utilisées pour aller plus avant dans leur interprétation.

Les plus grandes terres insulaires partiellement ou totalement volcaniques ne seront que mentionnées du fait qu'elles ont un caractère exceptionnel et sont en quelque sorte des « monstres statistiques »³¹¹ dont le poids reste marginal par rapport à un large échantillonnage : Sumatra, Java, Philippines, Islande, île du Nord en Nouvelle-Zélande), grandes îles japonaises (à l'exception de Shikoku), Sicile. Hormis ces dernières, les autres terres insulaires volcaniques de taille notable se situent dans les petites îles de la Sonde, à Sunbawa (14 600 km²), Florès (14 180 km²), Bali (5471 km²) et Lombok (4680 km²) (Figure 99A). Comme observé dans le cas de l'archipel de Nouvelle-Géorgie, la carte géologique de Sumbawa et de Lombok montre que plus une île est étendue plus sa lithologie devient complexe en juxtaposant des terrains magmatiques plus ou moins anciens avec d'autres types de roches telles que les altérites, consécutives à la météorisation et à l'érosion des volcans, les calcaires coralliens et les formations alluvionnaires récentes (Figure 99B). Leur paysage est donc polygénique.

³¹¹ Les « monstres statistiques » sont fréquents en géographie : l'Ancien Monde par rapport à l'archipel monde, l'océan Pacifique au regard des autres océans et mers, l'Himalaya par rapport autres massifs montagneux, la superficie de la Russie (et plus encore de l'ex-URSS) comparée aux autres pays, les populations indiennes et chinoises en démographie par pays, etc.



C	Archipel volcanique de type "macaronésien"	îles Corail liennes	Superficie			Nombre îles Ni en km ²	Densité relative Di2=10000.Ni/(Sb-Si) en îles/10000 km ²	% îles		Indice Ratio PiGi Pi%/Gi%
			Buffer 12 MM Sb en km ²	îles Si en km ²	max île Simax en km ²			< 1 km ² Pi%	> 100 km ² Gi%	
	Canaries	Non	41 007	7 517	2 051	26	7,8	57,7	26,9	2,1
	Açores	Non	27 902	2 394	767	22	8,6	59,1	31,8	1,9
	Cap-Vert	Non	33 713	4 139	1 006	27	9,1	44,4	29,6	1,5
	Macaronésie	Non	102 621	14 050	2 051	75	8,5	53,3	29,3	1,8
	Mariannes	?	29 434	1 057	559	22	7,8	31,8	13,6	2,3
	Crozet	Non	9 374	363	152	11	12,2	54,5	18,2	3,0
	Bioko-Annobon	Oui	19 294	2 960	1 957	20	12,2	70,0	15,0	4,7
	Samoa	Oui	19 669	3 093	1 730	21	12,7	52,4	9,5	5,5
	Hawaï	Oui	72 951	16 909	10 531	86	15,4	81,4	9,3	8,8
	Mascareignes	Oui	20 094	4 536	2 531	24	15,4	70,8	12,5	5,7
	Comores	Oui	19 219	2 092	1 034	33	19,3	69,7	12,1	5,8
	Petites-Antilles	Oui	34 130	4 804	1 469	82	28,0	63,4	7,3	8,7
	Autres archipels	Oui	224 164	35 815	10 531	299	15,9	66,9	10,4	6,5
	TOTAL		429 407	63 916	2 153	449	12,3	53,5	11,8	4,5

Figure 98 : Courbes NS pour divers archipels volcaniques de type « macaronésien ».
 (A) Exposant de Korčák (b) pour différentes classes de superficie des îles macaronésiennes et courbes NS pour les archipels des Açores, des Canaries et du Cap-Vert.
 (B) Courbes NS pour différents archipels apparentés au type macaronésien avec îlots coralliens (sauf pour les Crozet et probablement pour les Mariannes).
 (C) Densités insulaires (Di2) et ratio (PiGi=Pi%/Gi%) entre les petites îles (Pi%, S<1km²) et les grandes îles (Gi%, S>100 km²) pour les archipels de type macaronésien.

À l'inverse, le cortège insulaire autour de ses mainlands insulaires est formé d'îlots que l'on peut considérer comme monogéniques : volcanisme récent pour Sangeang et Satonde (petit volcan adventif), anciennes roches volcaniques pour Rak, formation corallienne pour Moyo, Panjang et Saringi, dépôts alluvionnaires pour Lawang et Sulat. La comparaison des trois stratovolcans de la région, dont le Tambora, permet de définir l'échelle des édifices volcaniques qui sont l'élément structural déterminant des îles de la Sonde au sens large, y compris Java et la chaîne montagneuse occidentale de Sumatra. On notera en premier lieu qu'il n'y a pas de plateau continental, les profondeurs atteignant plus de 1 000 mètres à une centaine de kilomètres des côtes. Les deux édifices majeurs du Tambora sur Sumbawa et du Rinjani sur Lombok ont des diamètres du même l'ordre, soit environ 50 km. Leurs sommets

respectifs atteignent respectivement 2 850 et 3726 mètres avec des pentes radiales légèrement concaves comprises entre 10 et 25 %. L'altitude plus faible du Tambora s'explique par l'explosion en 1815 de son ancien cône, lequel devait avoir une altitude supérieure à 4 000 mètres en se basant sur la forme actuelle des anciennes planèzes, ce phénomène cataclysmique étant de même nature si ce n'est du même ordre que celui qui occasionna le déclin de la civilisation minoenne suite à l'éruption de l'île de Thera, l'actuelle Santorin, vers 1600 av. JC. En revanche, ce n'est que récemment qu'a été démontré que la caldeira de Samalas, associée au volcan Rinjani sur Lombok, a aussi donné lieu à un événement du même type en 1257 (Lavigne & al., 2013). Ces exemples illustrent le caractère brusque et discontinu du démantèlement des stratovolcans lorsqu'on les compare à ceux des volcans boucliers qui se fait essentiellement par érosion progressive des reliefs et affaissement postéruptif de l'ensemble de l'édifice. L'île volcanique de Sangeang (155 km²), qui culmine à près de 2 000 mètres, n'est que la partie émergée d'un cône dont la base se situe vers -500 mètres, ce qui devrait correspondre à un cône de volume et de hauteur comparable aux précédents. Au nord de Sumbawa, les affleurements de la grande île tabulaire de Moyo (340 km²) sont principalement des formations coralliennes. Seul son centre voit affleurer des terrains volcaniques anciens. L'examen détaillé de la géomorphologie de certaines îles et îlots de l'arc des îles de la Sonde permet de mieux cerner la complexité qui les caractérise bien qu'elles se situent dans un même contexte morphotectonique de subduction d'une plaque océanique. Ce point doit être présent à l'esprit quand des méthodes statistiques sont utilisées.

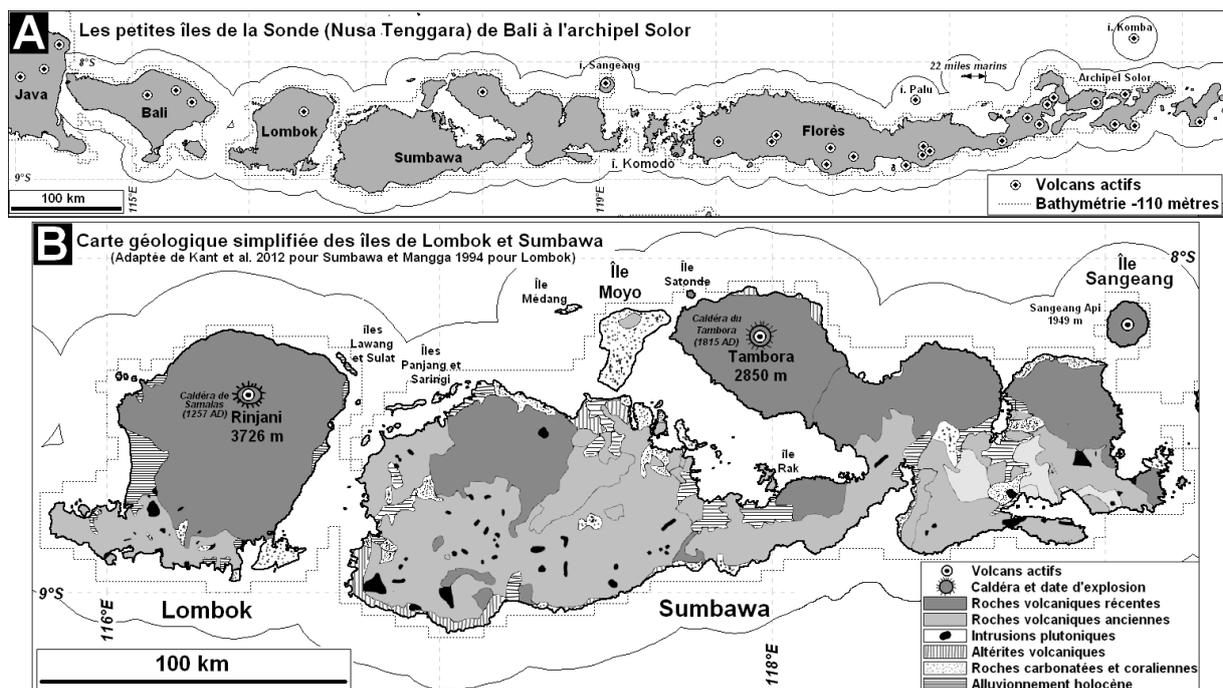


Figure 99 : Chaîne de stratovolcans des petites îles de la Sonde.

(A) Localisation des volcans actifs.

(B) Géologie simplifiée des îles Lombok et Sumbawa
(adaptée de Mangga & al., 1994 et de Kant & al., 2012).

En comparant les « guirlandes » des trois grands arcs insulaires des Kouriles et des Aléoutiennes avec les petites îles de la Sonde, il apparaît que chacune présente des particularités. Les Kouriles sont régulièrement espacées et de taille assez semblable sur les 1 200 km entre Hokkaïdo et le Kamchatka (Figure 100A). Les Aléoutiennes voient leur taille diminuer et leurs terres s'espacer depuis l'Alaska vers l'ouest sur 1 700 km (Figure 100B).

L'arc des petites îles de la Sonde avec ses prolongements volcaniques orientaux a une forme d'hameçon qui voit décroître la superficie et augmenter la distance entre les fragments insulaires vers l'est sur une longueur de 2400 km (Figure 100C). Des volcans actifs s'égrènent de façon régulière sur ces trois régions. Certains d'entre eux créent des îles circulaires au relief marqué d'environ 150 km² et 2000 mètres d'altitude, soit des formes coniques de 7 km de rayon avec une pente longitudinale de 30 % typique de la partie supérieure des versants des stratovolcans (Figure 100D). La densité insulaire D_{i2} de 13 îles/10⁴ km² des Kouriles est semblable à celles observées pour le type macaronésien défini ci-dessus. Les îles de la Sonde avec 29 îles/10⁴ km² ont une densité comparable aux Petites Antilles. Quant aux Aléoutiennes, elles se démarquent des précédentes par une densité bien plus forte de 56 îles/10 000 km², ce qui en fait un cas intermédiaire entre les faibles densités macaronésiennes (~10 îles/10⁴ km²) et les latitudes périarctiques (≥100 îles/10⁴ km²). Les courbes NS distinguent clairement la distribution des îles de la Sonde des deux autres arcs insulaires (Figure 100E). Elle reste homogène sur l'ensemble du spectre de superficie depuis 0,06 jusqu'à 14 000 km² avec un exposant de Korčák (b) de 0,38 qui dénote une hypofragmentation sensiblement inférieure à la tendance mondiale ($b = 0,61$ voir Figure 26) et même à la valeur obtenue pour l'ensemble de l'Indonésie ($b = 0,48$ voir Figure 32). Cette hypofragmentation s'avère cependant du même ordre que celle de l'archipel du Vanuatu majoritairement composé d'îles volcaniques ($b=0,33$, voir Figure 31).

Le dispositif statistique des Kouriles et des Aléoutiennes n'est pas sans rappeler celui du domaine macaronésien. Dans les deux régions, une rupture de pente ou *knickpoint* permet de distinguer les fragments les plus petits. Ces seuils s'observent vers 0,4 km² pour les Kouriles et 0,25 km² pour les Aléoutiennes. Ces deux *knickpoints* pour les magnitudes insulaires comprises entre 0,1 et 1 km² se révèlent tout à fait comparables à ceux qui avaient été déterminés pour divers archipels de type macaronésien avec un seuil de 0,3 km² : Hawaï, Petites Antilles, Comores et Bioko-Annobon (voir Figure 98B). Ces derniers sont intertropicaux avec des cortèges d'îlots ($S < 0,3$ km²) essentiellement récifaux. Dans le cas des Kouriles et des Aléoutiennes pour la même classe d'îlots, l'interprétation suppose des phénomènes comparables à ce qui a été observé dans les régions périarctiques, à savoir un découpage par les glaciers ou un RIPG voire une combinaison des deux. L'importance de ces processus serait particulièrement nette sur les Aléoutiennes puisque l'exposant de Korčák est de 0,98 pour $S < 0,3$ km². Ce seuil de surface est du même ordre pour diverses régions à des latitudes comparables : Baltique ($b=0,89$, Figure 37), archipel Aaland ($b=1,01$, Figure 87) et côte sud-ouest de l'Islande ($b=1,18$, Figure 94). Ces trois ensembles étant affectés par un RIPG, l'hypothèse est que le même phénomène serait responsable de l'apparition d'îlots notamment aux Aléoutiennes et dans une moindre mesure aux Kouriles. La partie orientale des Aléoutiennes depuis le mainland de l'Alaska jusqu'à Tanaga a bien été occupée par une digitation de l'inlandsis nord-américain alors que les Kouriles n'ont connu qu'un englacement partiel sous forme de calottes aux sommets. Enfin, le découpage des côtes par des fjords est clairement identifiable sur quelques Aléoutiennes (Unalaska, Atka, Adak, Amlia) alors qu'il n'y en a pas trace aux Kouriles. Un second *knickpoint* apparaît vers 150 km² pour les Aléoutiennes de sorte que cet archipel s'apparente clairement au type macaronésien. Pour les deux archipels, on note que les îles d'une superficie supérieure à 150 km² ont une forme allongée dans le sens du grand axe de leurs arcs insulaires, au même titre, d'ailleurs, que les petites îles de la Sonde. Elles sont partiellement formées d'un socle magmatique plus ancien sur lequel se sont développés les reliefs postiches de volcans plus récents, dont certains encore actifs. C'est vers 150 km² que se rencontrent le plus fréquemment les cônes volcaniques élémentaires formant des îles subcirculaires (diamètre≈14 km) plus ou moins érodées en

fonction de l'ancienneté des dernières phases éruptives. Le degré de festonnement de la côte en est un bon indicateur lorsqu'on compare le littoral régulier de Sangeang (petites îles de la Sonde) à celui plus découpé de Great Sitkin (Aléoutiennes). Le rivage d'Atlasova possède un tracé intermédiaire par rapport aux précédents (Figure 100D). D'autres îlots volcaniques plus ou moins circulaires ont des diamètres compris entre 2 et 15 km (superficie S de 3 à 177km²) dans les trois arcs insulaires considérés, notamment dans la partie centrale des Aléoutiennes, le nord des Kouriles et l'est des petites îles de la Sonde. La particularité principale des Kouriles est que sa fonction de distribution s'ajuste au mieux selon une loi logarithmique pour les fragments insulaires supérieurs à 0,4 km², ce qui n'est pas le cas pour les Aléoutiennes et encore moins pour les petites îles de la Sonde. Le fait est d'autant plus surprenant qu'il est identique à ce qui avait été déterminé pour les îles alluvionnaires de la Frise (Voir Figure 93C), donc dans des contextes totalement différents. Pour les îles de la Sonde, la fonction puissance est satisfaisante pour l'ensemble du spectre depuis 0,06 km² jusqu'à 14 000 km². Pour la configuration aléoutienne, elle est typiquement celle d'un ajustement par morceaux avec des fonctions se conformant au dispositif de type macaronésien. Comme dans le cas des îles frisonnes et pour les mêmes raisons, il n'est pas possible de donner une interprétation du particularisme statistique des Kouriles.

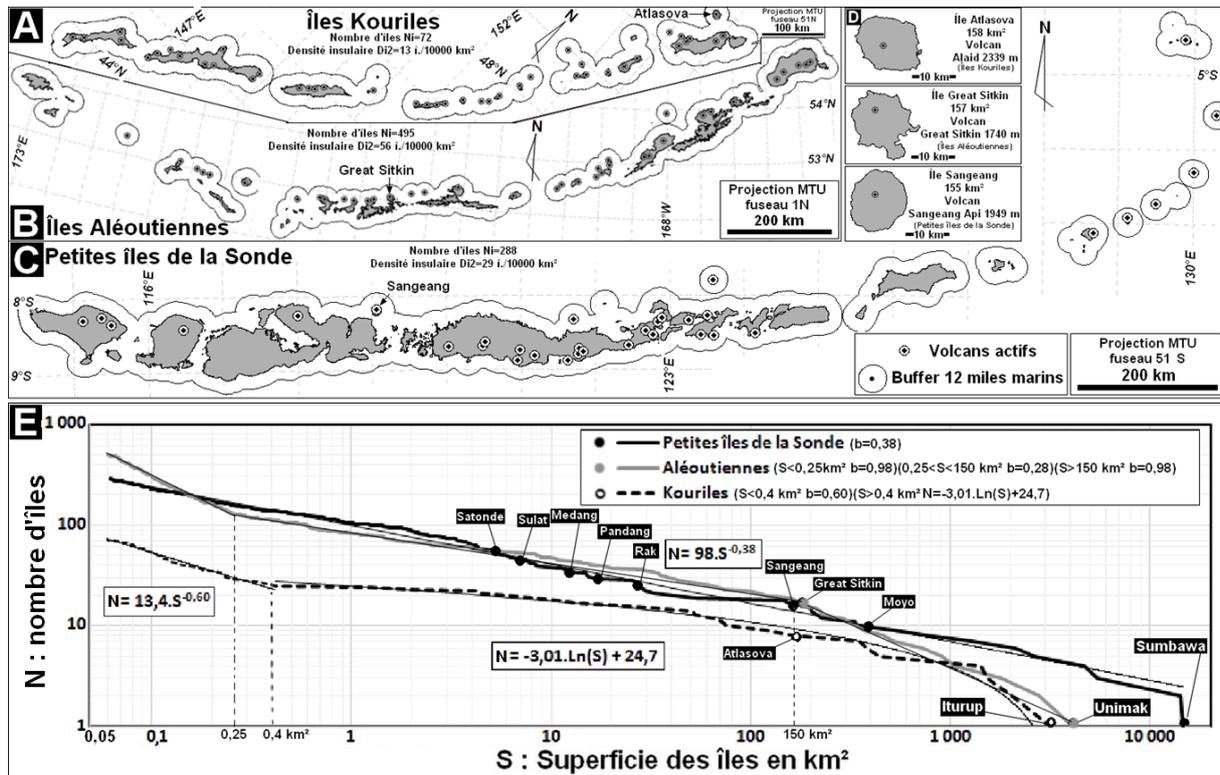


Figure 100 : Arcs insulaires volcaniques avec stratovolcans actifs.

(A) Kouriles (Russie). (B) Aléoutiennes (Alaska, États-Unis). (C) Petites îles de la Sonde (Indonésie). (D) Courbes N pour les trois régions, dont fonction de distribution pour les petites îles de la Sonde et pour les Kouriles. Certaines îles et îlots sont monogéniques : cônes volcaniques pour Great Sitkin, Sangeang et Atlasova, coralliennes pour Moyo, Medang et Pandang, roches volcaniques anciennes pour Rak, alluvions actuels pour Sulat, cratère adventif pour Satonde (voir Figure 99B).

Les arcs insulaires, qu'ils soient des stratovolcans de type Petites Antilles ou des volcans-boucliers type Hawaïen, ont en commun d'être contraints par l'échelle de leur forme et l'espacement entre les terres principales. Il en résulte des densités faibles comprises entre

10 et 20 fragments insulaires pour 10 000 km², ce qui revient à une distance interîles de 30 km. Cette estimation peut être comparée à celle obtenue en divisant le nombre de volcans actifs par la longueur des arcs insulaires, ce qui donne 72 km pour les petites îles de la Sonde, 41 km pour les Aléoutiennes et 27 km pour les Kouriles. Ces mêmes valeurs pour les « clusters » insulaires de Macaronésie sont de 30 km pour les Açores, 35 km pour le Cap-Vert et 100 km pour les Canaries. Il y a donc adéquation entre la densité insulaire des grandes terres et la distance interinsulaire. Ce constat fait écho au modèle conceptuel de « mésoéchelle » de la Figure 86B, les topographies volcaniques ayant une « longueur d'onde » de 30 km pour une « amplitude » de quelques milliers de mètres. Cette métrique liée aux processus magmatiques interfère avec celle qu'imposent des formes de taille plus réduites que l'on peut assimiler au « microrelief » du modèle conceptuel (Voir Figure 86C). Il s'agit de processus morphogéniques de type fjord voire RIPG pour les Aléoutiennes, de platiers coralliens pour les îles de la Sonde, de récifs-barrières pour la Nouvelle-Géorgie. Leur longueur d'onde est d'ordre kilométrique pour une amplitude hectométrique. On notera que ces processus dépendent de la zonalité morphoclimatique et non de la géotectonique. Le microrelief, lorsqu'il est important, se traduit par de nombreux îlots qui vont modifier la fonction de distribution et la densité insulaire. L'interférence entre des formes de terrain et des processus morphogéniques d'échelle bien différentes peut se traduire par la présence de *knickpoints* dans les courbes NS (Figure 101A) pour le type macaronésien. Quand les formes sont monogéniques (nord de la Baltique) ou au contraire s'avèrent polygéniques avec des reliefs issus de l'action de multiples processus, la distribution des superficies tend à être homogène sur une large gamme d'échelles, comme c'est le cas pour le type des petites îles de la Sonde (Figure 101B). Il faut noter que cette uniformité de la distribution s'observe à l'échelle de tous les fragments insulaires de l'archipel monde du fait qu'elle intègre tous les types de structure insulaire de la planète (Voir Figure 28). À ces deux types principaux, il est possible d'ajouter celui observé sur l'arc insulaire des Sandwich du Sud et de l'archipel des Lipari, qui s'apparentent au type macaronésien mais à une échelle spatiale bien moindre (Figure 101C). La comparaison des courbes NS de la Figure 101D met en regard ces trois types de distribution statistique avec d'autres structures insulaires volcaniques déjà mentionnées. L'ensemble de l'archipel des Galapagos s'apparente au type macaronésien. Le cas du Vanuatu présente également quelque analogie avec ce dernier type mais s'en distingue par l'absence de rupture de pente pour les faibles superficies, ce qui tend à le rapprocher du type défini pour les petites îles de la Sonde. Bien que leur géographie et leur positionnement géotectonique diffèrent, les courbes SN des Sandwich du Sud et des Lipari s'avèrent remarquablement similaires quand bien même l'échantillonnage insulaire est faible dans les deux cas : 19 îles pour les premières, 13 pour les secondes.

Le tableau de la Figure 101E indique les densités insulaires des divers types d'archipels volcaniques. Les valeurs supérieures à 20 îles/10⁴km² sont dues à l'existence de petits fragments insulaires qui rendent compte des microreliefs de « haute fréquence » au sens de leur « longueur d'onde » et de leur amplitude, par exemple au niveau des diverses formations coralliennes émergées pour la Nouvelle-Géorgie, du découpage par les fjords et de l'exondation des reliefs sous-glaciaires des Aléoutiennes. Le tableau de la Figure 101F complète les courbes SN de la Figure 101D en permettant une comparaison plus précise des propriétés des trois classes de superficie spécifique au type macaronésien ou apparenté. La classe des grands fragments ($S > K1$) est hyperfragmentée puisque leur exposant de Korčák est supérieur à 0,6 voire à 1 (Macaronésie, Sandwich du Sud). La classe des petits fragments ($S < K2$) apparaît fort variable puisque les Galapagos et la Nouvelle-Guinée se démarquent des autres par une valeur de 0,63 pour l'exposant de Korčák, reflétant ainsi l'effet statistique

spécifique des formations coralliennes émergées. La classe intermédiaire entre les deux *knickpoints* ($K_2 < S < K_1$), avec une valeur faible pour leur « pente statistique » ($0,13 < b < 0,32$), ne fait que rendre compte de la moindre fréquence des îles ayant une superficie comprise entre les deux seuils définis par les *knickpoints*. Dans le cas des Lipari, des Sandwich du Sud et des Canaries, cette classe peut être considérée comme lacunaire puisqu'elle ne contient pas ou peu d'îles.

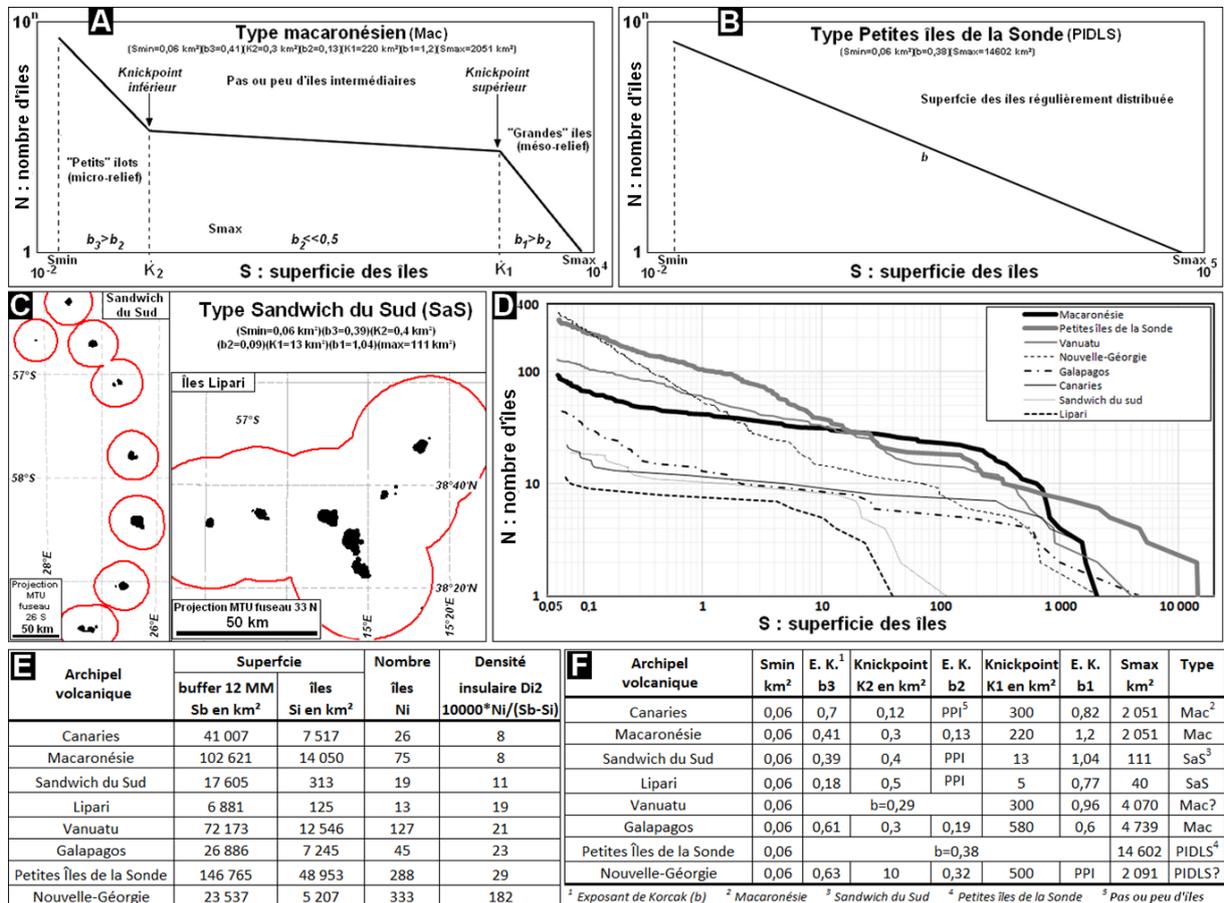


Figure 101 : Typologie des archipels volcaniques

en fonction de la distribution des superficies des îles.

(A) Schéma du type macaronésien avec les trois classes de superficie, leur exposant de Korčák et leurs *knickpoints* (ruptures de pente).

(B) Idem pour le type petites îles de la Sonde.

(C) Cartes des Sandwich du Sud et des Lipari.

(D) Courbes SN pour les trois types et autres archipels (Sandwich du Sud et Lipari).

(E) Liste de quelques archipels volcaniques classés par ordre croissant de densité Di_2 .

(F) Exposants de Korčák (b) et des *knickpoints* pour différents types d'archipels volcaniques.

Le phénomène de lacune insulaire peut être interprété comme étant du même ordre que celui simulé précédemment à partir d'hypothèses théoriques élémentaires en combinant « mésorelief » et « microrelief » (Voir Figure 86). Le fait que l'analyse de plusieurs configurations réelles apparemment complexes et diverses soit cohérente avec un modèle virtuel simple démontre l'intérêt d'une approche mêlant intimement abstraction et observation. L'interprétation géomorphologique des lacunes insulaires suppose la prise en compte d'un facteur essentiel pour comprendre un « paysage insulaire » : le facteur temps. Sans entrer dans le détail de l'équilibre dynamique entre les formes de terrain et les processus qui les façonnent tout autant qu'ils en dépendent, on peut distinguer les phénomènes qui contribuent

à la genèse des reliefs émergés (orogénèse tectonique, isostasie positive, régression marine, sédimentations, processus magmatiques) de ceux qui contribuent plus ou moins directement à leur disparition : isostasie négative, transgression marine, météorisation des roches, érosion sur les versants et par les rivières, érosion marine et côtière. Partant de ces éléments, il faut parvenir à comprendre comment l'évolution de groupes insulaires volcaniques aussi divers tant d'un point de vue pétrographique et tectonique que morphoclimatique a pu converger vers ce qui a été défini comme étant de type macaronésien³¹². L'hypothèse la plus cohérente pour tenter d'expliquer cette convergence évolutive est que, passé la phase éruptive contribuant à préserver les reliefs émergés, l'érosion et l'engloutissement des édifices doit être rapide en comparaison de la durée du phénomène volcanique. En raisonnant de façon probabiliste, ceci expliquerait que les fragments issus du démantèlement et de la dislocation des édifices originels soient statistiquement sous-représentés. Le phénomène d'affaissement progressif des volcans associés à des points chauds, notamment pour les volcans-boucliers, est bien connu et parfaitement illustré par les archipels hawaïen, comorien et des Mascareignes. De même, seule la lente subsidence du substrat volcanique explique la formation des atolls dont la couche corallienne repose sur des guyots dont la partie sommitale plate correspond à la partie arasée par l'érosion pendant la phase émergée du volcan. Trois facteurs principaux contribuent à faire disparaître la partie émergée des dômes ou des cônes magmatiques : importants glissements de terrain quand le relief est encore marqué, érosion qui tend à s'amortir avec le temps du fait de la diminution corrélative des pentes, érosion des côtes qui, toutes choses égales par ailleurs, augmente du fait de la réduction de la taille de l'île et donc de la longueur relative du rivage³¹³. La lacune insulaire procéderait donc d'une première phase de réduction rapide du volume émergé sans que la superficie diminue dans les mêmes proportions (cf. canyons de Tahiti), suivie d'une courte phase d'ennoiement terminal de la surface arasée (cf. îles volcaniques de faible relief) se traduisant par une réduction et une fragmentation des ultimes parties émergées. Cet aperçu succinct ne prend pas en considération le rôle protecteur des alluvionnements côtiers et des récifs coralliens face à l'action des courants côtiers et des vagues en particulier.

Contrairement à la multitude d'îles volcaniques, les archipels développés sur des trapps basaltiques ne se rencontrent que dans quelques cas : pour ne citer que les principaux, la Terre de François-Joseph dans l'Arctique russe, les Féroé entre l'Écosse et l'Islande, l'archipel Penghu entre Taiwan et la Chine continentale, et Kerguelen, déjà évoquée pour ses côtes à fjords. Ces exemples offrent une gamme de contextes morphoclimatiques assez complète. Ils se distinguent des précédents par leur relief tabulaire avec pour corollaire un rivage fait de falaises parfois impressionnantes comme aux Féroé. Un élément vient agrémenter ces paysages austères : ce sont les orgues basaltiques nés des conditions de refroidissement particulières des basaltes (Photo 3). Bien que la structure d'ensemble soit simple, des phénomènes tectoniques de fracturation résultant de horsts et de grabens en « touches de piano » (île de Penghu, cf. Juang & Chen, 1992 et Figure 102), ainsi que des phénomènes éruptifs secondaires (mont Ross aux Kerguelen), contribuent à donner à chaque archipel sa singularité qui se combine avec des processus morphoclimatiques contrastés.

³¹² Concernant l'évolution de la morphologie des volcans voir Lageat, 1994.

³¹³ En supposant que la partie émergée reste circulaire dans la durée (superficie $S = \pi \cdot R^2$ avec R le rayon) et que la quantité érodée soit proportionnelle à la longueur de la côte ($L = 2 \cdot \pi \cdot R$), il advient que la longueur relative par rapport à la surface (soit l'indice côtier I_c de François Doumenge, $L/S = 2/R$) augmente. Cela signifie qu'une île de 6 km de rayon aura une longueur de côte de $2/6 = 0,33 \text{ km/km}^2$ alors qu'elle sera de $2/0,5 = 4$ pour un îlot de $0,5 \text{ km}^2$, ce qui implique une érosion côtière potentiellement douze fois supérieure.

Orgues basaltiques dit des "Mille Totems"



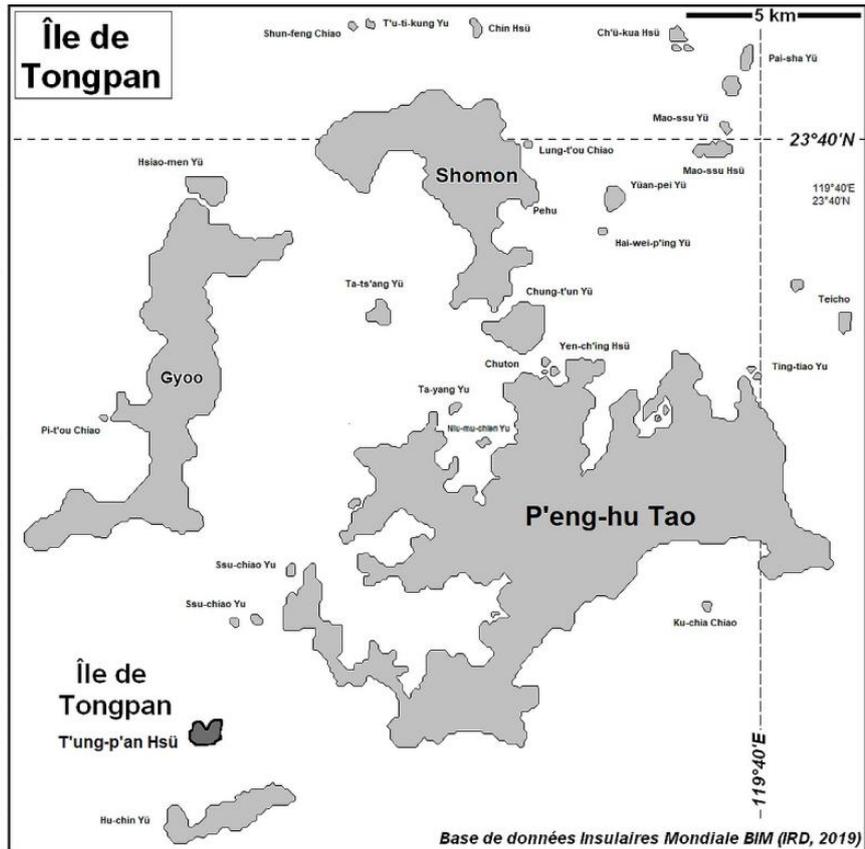
Photo C. Depraetere, septembre 2014

Photo 3: Relief et modelé de type orgues basaltiques sur l'île de Tongpan (桶盤嶼;) dans l'archipel Penghu (ou Pescadores)

Base de données Insulaires Mondiale

code IIC/CI : Code Insulaire International
 Name/nom : nom usuel ou international
 Area : superficie à partir de GSHHS
 Perimeter : longueur de la côte à partir de GSHHS
 Distance : distance au continent le plus proche (en l'occurrence l'Asie).

Code IIC/CI	Island/île Name/nom	Area km ²	Perimeter km	Distance km
17880	P'eng-hu Tao (Hoko)	69,29	108,59	141,76
37460	Gyoo (Fisher)	20,14	39,3	133,18
42680	Hakusa (Pehu)	16,22	29,02	134,28
124480	Hu-chin Yü	2,65	10,41	146,55
162960	Chung-t'un Yü (Table)	1,68	5,49	141,35
266140	Hsiao-men Yü (Shomon)	0,73	3,55	132,61
360870	T'ung-p'an Hsü (Tongpan)	0,44	2,98	145,09
381520	Conch (Tori)	0,40	2,93	141,96
411750	Ta-ts'ang Yü (Daiso)	0,35	2,47	138,9
425880	Yüan-pei Yü (Inkai)	0,33	2,2	140,95
536790	?	0,22	1,83	141,15
569980	Pai-sha Yü (Sable)	0,20	1,9	140,97
574500	?	0,20	1,8	156,53
588550	Teicho Island	0,19	1,77	148,21
651580	Ch'ü-kua Hsü	0,16	1,63	139,05
769050	Chin Yü	0,12	1,48	134,83
860510	?	0,10	1,22	146,58
967210	Ssu-chiao Yu	0,08	1,09	143,11
968710	Ta-yang Yu	0,08	1,16	142,55
1025570	?	0,07	1,03	143,55
1026170	Mao-ssu Yü	0,07	1,1	141,93
1069830	?	0,07	1,03	142,76
1090940	Niu-mu-chien Yu	0,07	1,11	143,78
1165700	Ku-chia Chiao	0,06	0,91	151,53
1171280	Ssu-chiao Yu	0,06	0,91	143,26
1258570	Chuton	0,05	0,86	143,63
1259550	Yen-ch'ing Yü	0,05	0,86	143,26
1261620	T'u-ti-kung Yu	0,05	0,9	132,71
1357500	Hai-wei-p'ing Yü	0,04	0,78	141,69
1368080	?	0,04	0,77	138,38
1369560	Saha Island	0,04	0,79	154,82
1370050	Shun-feng Chiao	0,04	0,8	132,44
1459660	Ting-tiao Yu	0,04	0,73	147,84
1467480	Kutsuso Island	0,04	0,72	139,65
1471820	Pi-t'ou Chiao	0,03	0,72	136,39



Base de données Insulaires Mondiale BIM (IRD, 2019)

Figure 102 : île de Tongpan, archipel Penghu à Taiwan (source BIM 2019)

Les cartes des Figure 103A à D illustrent la diversité géographique des archipels développés sur des trapps. Au pavage insulaire régulier et espacé de la Terre de François-Joseph s'oppose l'imbrication de l'ensemble féroïen, la dispersion des fragments de Penghu, la masse festonnée de fjords aux Kerguelen. L'empreinte glaciaire se traduit par le découpage et le laniéragé du rivage et s'effectue selon des modalités différentes sur l'archipel polaire de l'archipel François-Joseph, les Féroé aux latitudes subarctiques et aux Kerguelen à la périphérie du continent antarctique dans les cinquantièmes hurlants. Quant aux îles Penghu, elles sont associées à des formations coralliennes en particulier dans le sud de l'archipel.

Les distributions statistiques de la Figure 103 rendent compte de cette diversité si ce n'est que les Kerguelen et Penghu suivent des fonctions d'ajustement semblables alors qu'elles appartiennent à des domaines morphoclimatiques fort différents (b proche de 0,5 dans les deux cas sur l'ensemble du spectre statistique). La Terre de François-Joseph montre de façon claire un *knickpoint* autour de 300 km², soit une caractéristique observée sur les archipels de type macaronésien. Cette coïncidence s'avère d'autant plus étonnante que l'environnement de cet archipel au rude climat polaire et sa géologie n'ont que peu de chose à voir avec la Macaronésie. Enfin, à l'instar des îles frisonnes et des Kouriles, la hiérarchisation de la superficie des fragments insulaires de l'archipel des Féroé s'ajuste sur une distribution de type logarithmique. L'existence d'un « particularisme logarithmique » dans des espaces aussi divers permet d'écarter la thèse monogénique au profit d'une convergence évolutive qui, sans être explicative, peut servir de base à la réflexion. Le fait que le phénomène soit observé sur des échantillonnages insulaires conséquents et uniformément répartis (20 pour les îles frisonnes, 71 pour les Kouriles, 28 pour les Féroé) suggère que cela n'est pas dû à un hasard statistique mais procède d'un mode de fragmentation spécifique aux espaces archipélagiques considérés.

En résumé, pour ce qui est des îles d'origine magmatique, leur localisation est liée à la dynamique des points chauds de l'asthénosphère et à la géotectonique d'ensemble de la lithosphère. Elles sont, *de facto*, réparties sur toutes les latitudes, et sont soumises à des conditions morphoclimatiques allant du type polaire (Terre de François-Joseph) au type équatorial (îles de la Sonde). Cette azonalité fait que la géomorphologie de ces îles est autant influencée par leur pétrographie que par les processus morphogéniques zonaux. Ainsi les Kerguelen sont à la fois représentatives d'un relief de trapps basaltiques et d'un modelé postglaciaire fjordisé. De même, l'archipel de Nouvelle-Géorgie est manifestement composé de stratovolcans plus ou moins anciens tout en étant l'hôte de multiples processus récifaux responsables de la formation de myriades d'îles et d'îlots coralliens. Force est de constater que, de la combinaison de facteurs géologiques et climatiques passés et présents, naissent des compositions insulaires variées pour celles d'origine magmatique.

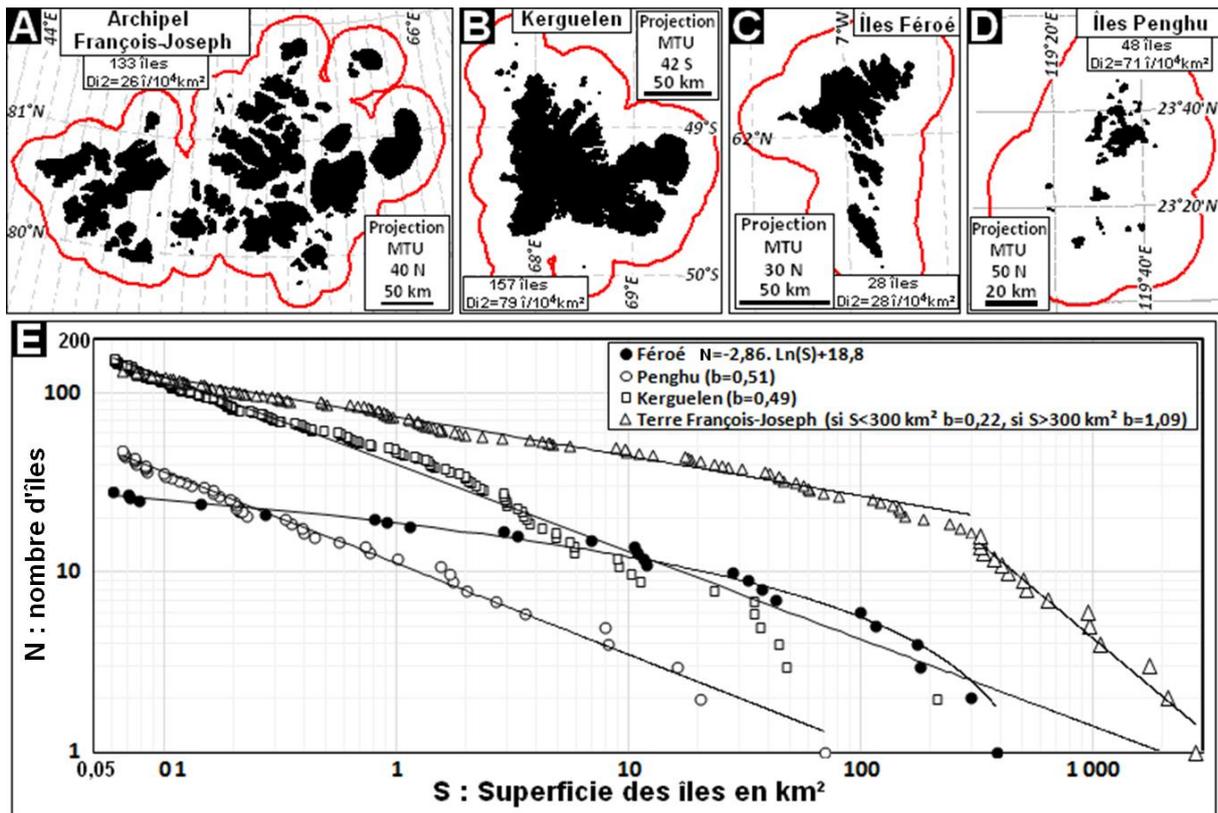


Figure 103 : Archipels formés de trapps basaltiques.

(A) Terre François-Joseph (Russie). (B) Kerguelen (France).

(C) Féroé (Danemark). (D) Penghu (Pescadores, Taiwan).

(E) Courbes NS et fonctions d'ajustement puissance $N = a.S^{-b}$ pour Penghu, Kerguelen et François-Joseph ou fonction logarithme $N = a.Ln(S)+b$ pour les Féroé.

Tout comme les contextes postglaciaires ont engendré des paysages insulaires spécifiques dans les zones péripolaires et tempérées froides, la zone corallienne tropicale et subtropicale génère des structures archipélagiques qui lui sont propres tant dans leur géographie d'ensemble que dans la forme des îles et îlots qui les composent.

2.17. Les îles coralliennes

Notre intérêt ne portera que sur les formations madréporiques émergées et donc non fonctionnelles qui sont pour partie formées de bancs de sable corallien, notamment les *motus* des atolls. Bien que partageant la même origine, les trames insulaires de ce type d'îles se révèlent particulièrement variées. Trois grands types de structure peuvent être définis sur une base strictement géographique :

- Les archipels composés de grandes terres plates (ou platiers) associés à un cortège de récifs plus ou moins importants, dont les Bahamas et Turques-et-Caïques sont le meilleur exemple (Figure 104A). Quand l'épaisseur des accumulations coralliennes exondées dépassent quelques dizaines de mètres, elles peuvent développer un système karstique, comme cela s'observe sur certaines des îles Loyauté en Nouvelle-Calédonie (Maurizot & Lafoy, 2005, p. 20).
- Les récifs-barrières, les récifs frangeants et les îlots lagunaires se combinent pour donner des paysages complexes juxtaposant de longs rubans insulaires à une

myriade de terres plus menues de forme oblongue ou circulaire. C'est dans la mer Rouge que le phénomène est le plus généralisé, notamment sur les côtes de l'Arabie saoudite et en Érythrée (Figure 104B).

- Les atolls ainsi que les *motus* entourant certaines îles volcaniques en phase de subsidence sont essentiellement des formes d'accumulation des sédiments issus de l'érosion marine et biologique des récifs sur lesquels ils reposent. Dans le cas des atolls, un anneau d'îles enserre sous la forme de pointillé ou de tireté un lagon pouvant lui-même comporter quelques îlots rocheux. Ces colliers insulaires présentent le plus souvent un allongement et un alignement d'ensemble conforme à l'orientation des principaux bombements océaniques formant ainsi une chaîne d'atolls, comme cela s'observe dans la partie centrale des Touamotou (Figure 104C). Il faut mentionner deux cas extrêmes d'évolution : celui des lagons soulevés du fait de la surrection du fond marin (Henderson dans les Pitcairn avec sa forme oblongue régulière) et les lagons fermés (Clipperton).

Procédant de l'activité des colonies madréporiques, la plupart des terres coralliennes se situent dans la bande océanique comprise entre 33°N et 33°S même si des affleurements de récifs fossiles se trouvent en dehors de cette zone climatique, comme sur la presqu'île de Crozon en Bretagne et au sud-est de l'île de Sjælland au Danemark. La mer de Corail et son immense barrière d'environ un million de km² comporte peu de parties émergées, avec seulement 22 fragments insulaires de quelques dizaines d'hectares tout au plus. Divers archipels et côtes continentales comportent des formations récifales relativement isolées (Bermudes, Lord Howe, quelques atolls dans le sud et l'ouest de la Caraïbe) ou ayant un rôle marginal au sens insulaire (Cap-Vert, Galapagos). L'analyse portera davantage sur de grands domaines où le phénomène insulaire corallien domine. On distinguera, d'une part, les vastes régions récifales de la Caraïbe (côtes cubaines, archipel des Bahamas), de la mer Rouge et du golfe arabo-persique, et, d'autre part, les grands domaines formés d'atolls comme le groupe Maldives-Laquedives-Chagos dans l'océan Indien, la « grande Micronésie » (y compris ses extensions vers le Kiribati) et les Touamotou (Figure 105A). Cet échantillonnage insulaire exclusivement composé de terres coralliennes couvre plus d'un million de km² et comporte 8 181 îles et îlots, soit une densité insulaire de l'ordre de 70 îles/10⁴km² (Figure 105B). Ces mêmes densités varient de 32 îles/10⁴ km² pour le golfe arabo-persique à 214 îles/10⁴ km² pour les côtes cubaines. Il faut cependant garder présent à l'esprit que la différence (du simple au double) des densités entre les domaines récifaux péricontinentaux (96 îles/10⁴km²) et les atolls situés en pleine mer (49 îles/10⁴km²) procède en partie de leur mode de calcul par *buffer*, qui tend à multiplier par un facteur deux les mesures faites sur les rubans côtiers des grandes terres³¹⁴. En tenant compte de cela, et en ramenant les mesures à des espaces de référence océanique, tous les fragments insulaires résultant de formations récifales ou d'atolls ont une densité moyenne de l'ordre de 50 îles/10⁴ km², soit plus du double de celle observée pour les domaines volcaniques qui se situent dans la fourchette de 10 à 20 îles/10⁴ km². Ces densités sont bien inférieures aux densités souvent supérieures à 100 îles/10⁴ km² que l'on rencontre dans les régions de RIPG.

³¹⁴ Sur ce point méthodologique, se reporter à l'annexe 3.

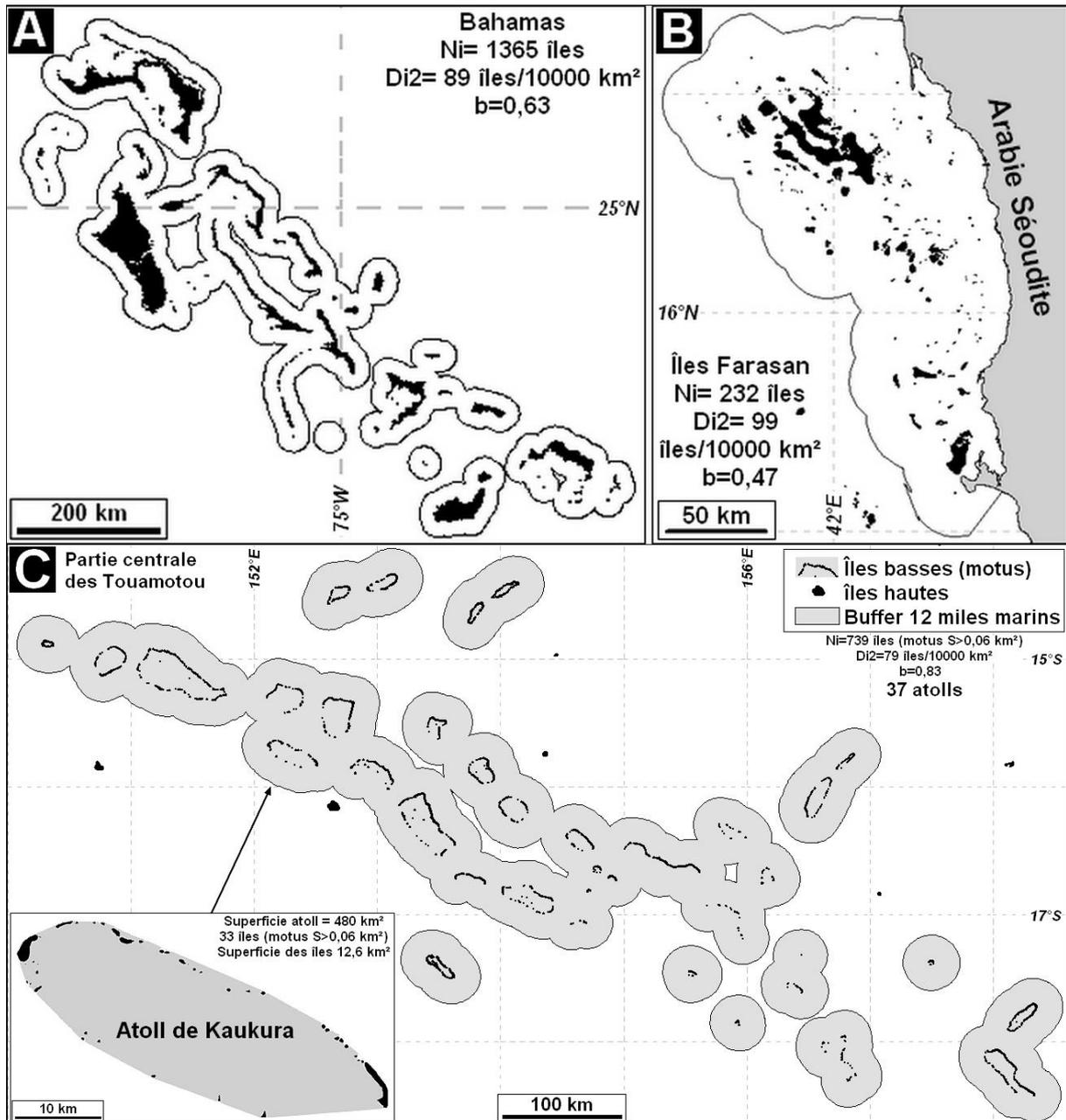


Figure 104 : Différents types d'îles d'origine corallienne.

(A) Récifs coralliens avec quelques grands platiers (Bahamas).

(B) Récifs-barrières et îlots lagunaires (îles Farasan, Arabie Séoudite).

(C) Les 37 atolls de la partie centrale des Touamotou (Polynésie française).

La comparaison des distributions statistiques de la superficie des fragments insulaires pour les deux types de domaine corallien montre qu'elles suivent des tendances analogues selon des modalités différentes. En effet, la forme générale des courbes SN se caractérise par un calibrage satisfaisant de fonction de type puissance ($N = a \cdot s^{-b}$) pour les superficies supérieures à 1 km² alors que ces mêmes courbes présentent une inflexion négative en deçà de ce seuil (Figure 105C). Ceci dénote une valeur moindre de N par rapport une estimation extrapolée à partir de la fonction ajustée sur l'échantillonnage de surfaces insulaires observées. Il ne s'agit pas à proprement parler d'une rupture de pente mais d'une tendance progressive et régulière à l'amortissement du nombre d'occurrences N qui s'écarte d'un mode de distribution de type loi puissance pour les fragments insulaires inférieurs à 1 km². Cette

tendance apparaît moins marquée pour les atolls que pour les îles associées à des récifs-barrière ou lagunaires. En ne considérant que les tendances calibrées pour les fragments supérieurs à 1 km² pour les deux ensembles insulaires, avec pour l'exposant de Korčák b des valeurs comprises entre 0,78 et 1,05, elles restent proches de celles établies pour les domaines deltaïques ($0,78 < b < 0,95$, Figure 89) des îles sédimentaires ($0,79 < b < 0,97$ pour les cordons dunaires du sud du Texas, Figure 93C) et des régions à RIPG ($0,72 < b < 1,18$, Figure 94 et Figure 95). La spécificité des îles coralliennes porte donc sur ce phénomène d'amortissement du nombre d'occurrences d'îles de faible superficie qui n'avait pas été observé de façon sensible sur les autres types de domaines insulaires.

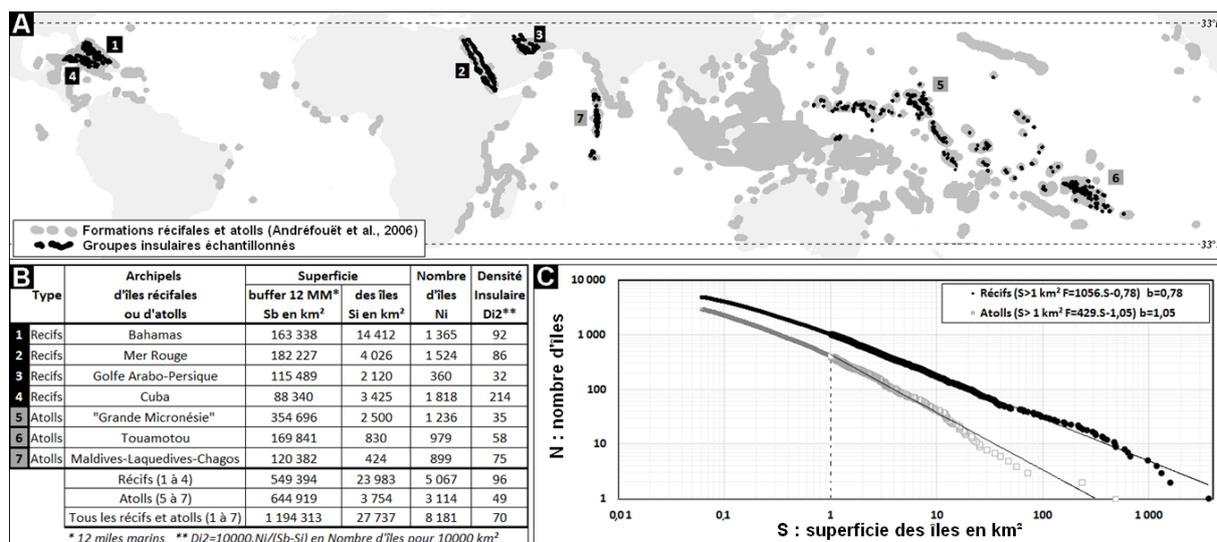


Figure 105 : Îles coralliennes.

(A) Principales régions comportant des récifs coralliens émergés et des atolls. (formations récifales dérivées d'images LANDSAT (Andréfouët & al., 2006, p. 1734)).
 (B) Densités insulaires. (C) Courbes SN et exposant de Korčák b pour les îles >1 km².

Il convient d'insister sur le phénomène d'amortissement car il est révélateur des nuances certes subtiles mais significatives qu'autorise une analyse fine des structures géographiques, illustrant ainsi ce qu'il faut comprendre par « mathématisation du réel » au sens que Giorgio Israel donne à cette expression (1996). En examinant plus avant les résultats de ce phénomène, la même analyse appliquée aux divers groupes insulaires coralliens devrait permettre de mieux les caractériser en les comparant à des tendances analogues observés sur d'autres types d'archipels précédemment étudiés. Dans le cas des domaines récifaux côtiers, ce phénomène apparaît dès le seuil de 10 km² pour la mer Rouge. Il est observé de façon moins marquée vers 1 km² pour Cuba, mais n'est pas (ou peu) sensible pour le golfe arabo-persique et les Bahamas (Figure 106A). Pour les atolls, il est évident pour les Maldives avec $S < 1$ km², légèrement sensible pour l'ensemble micronésien, et absent pour les Touamotou (Figure 106B). Pour cette dernière région, l'amortissement apparaît plutôt manifeste entre 1 et 10 km². Pour les îles récifales de plus de 10 km², les distributions sont remarquablement semblables pour Cuba, la mer Rouge et le golfe arabo-persique. Seul l'archipel des Bahamas se singularise par la surface exceptionnelle des platiers, jusqu'à plusieurs centaines de km² pour les Andros, Grande Aboca et Grande Inagua. Les résultats sont plus contrastés pour les régions à atolls. La distribution des îles de plus de 10 km² de la Micronésie apparaît en tout point identique à celle des régions récifales, à l'exception des Bahamas. Les îles de plus de 10 km² sont rares aux Touamotou. Il n'y en a qu'une dans

l'ensemble archipélagique Maldives-Laquedives-Chagos : il s'agit de Diégo-Garcia... qui sert de base navale et surtout aérienne pour l'armée américaine.

Le phénomène d'amortissement entre 0,06 et 1 km² sur 5 des 7 régions coralliennes étudiées mérite d'être considéré de manière plus détaillée, car il n'a été observé jusqu'à présent que sur un nombre limité de régions, toutes situées hors de la zone corallienne :

- Archipel de Nordenskjöld (Voir Figure 82) ;
- Chapelet des îles frisonnes occidentales (Voir Figure 93C) ;
- Arc des Kouriles (voir Figure 100E) ;
- Groupe des îles Féroé (Voir Figure 103E).

Un examen précis des fonctions de distribution appliquées aux îles récifales (Bahamas, mer Rouge, Cuba) et à des atolls (Grande Mélanésie et ensemble Maldives-Laquedives-Chagos) amène au constat suivant : le meilleur ajustement des observations serait intermédiaire entre les valeurs données par des distributions de type puissance $N=a.S^{-b}$ et de type exponentielle $N=a.e^{-b.S}$. Dans le cas des deux régions que sont la mer Rouge et l'ensemble Maldives-Laquedives-Chagos qui apparaissent les plus nettement représentatives du phénomène, la courbe NS se situe bien, de fait, entre les deux fonctions de distribution (Figure 107A). Il s'avère que la moyenne des deux fonctions s'ajuste avec les observations faites en particulier pour les îles Maldives-Laquedives-Chagos (Figure 107B).

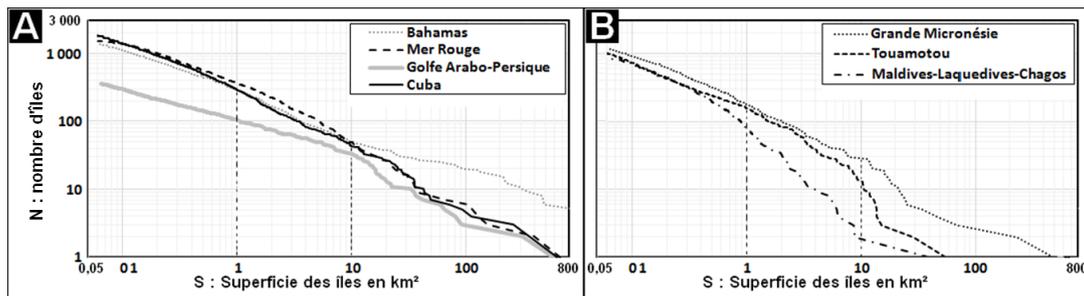


Figure 106 : Courbes NS pour diverses régions insulaires coralliennes.
 (A) Îles avec formations coralliennes (platier, récif-barrière, récif frangeant, îlot lagunaire).
 (B) Pour les atolls.

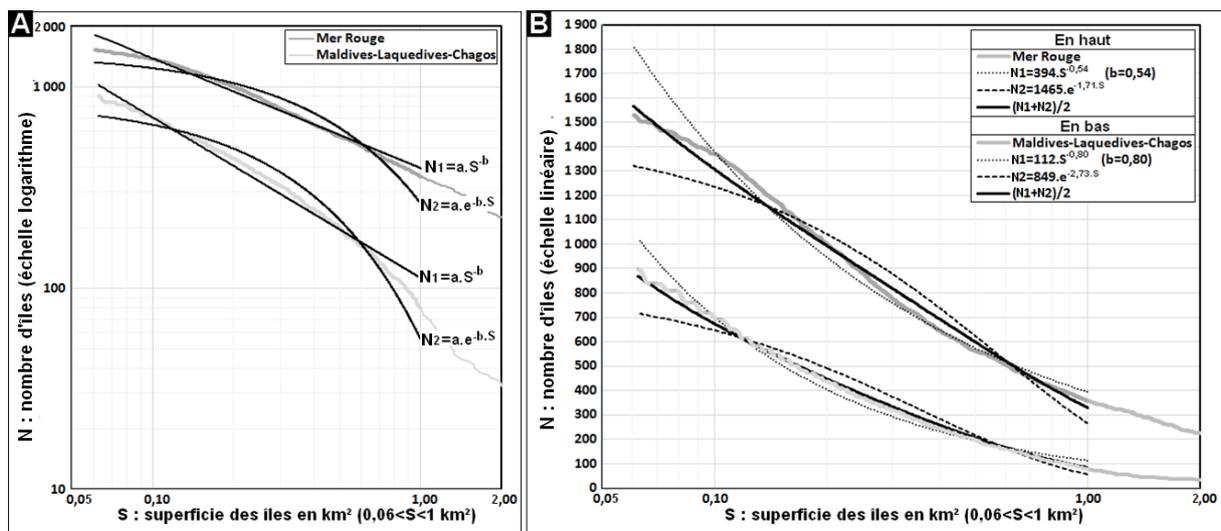


Figure 107 : Ajustement de fonctions de distribution pour la mer Rouge et l'ensemble Maldives-Laquedives-Chagos.
 (A) Courbes NS avec distributions intermédiaires entre fonctions puissance et exponentielle.
 (B) Courbes NS avec loi de distribution combinant des fonctions puissance et exponentielle.

À la différence des quatre domaines insulaires non coralliens sur lesquels une fonction d'ajustement logarithmique semblait la plus adaptée pour tout ou partie du spectre de superficie, il s'agit cette fois d'une fonction exponentielle. L'interprétation de cette spécificité statistique propre aux systèmes récifaux et aux atolls supposerait une connaissance approfondie des mécanismes morphogéniques susceptibles d'expliquer le phénomène aussi bien sur des récifs-barrières que sur des récifs frangeants (mer Rouge) et sur les motus des atolls (Maldives-Laquedives-Chagos), dans des environnements marins et tectoniques fort différents. À défaut de pouvoir apporter un début de réponse, il est du moins possible de faire une remarque d'ordre général qui sera reprise ultérieurement : une différence fondamentale entre les fonctions puissance et logarithme d'une part et les exponentielles d'autre part tient à ce que les premières tendent vers un nombre infini de fragments insulaires alors que les secondes sont asymptotiques à une valeur finie lorsque les superficies considérées tendent vers 0^{315} , ce qui s'avère davantage conforme à l'intuition et sera sans nul doute conforme aux observations... dans le futur³¹⁶.

2.18. Les îles d'enneigement du plateau continental

Ces îles correspondent à ce qu'Aubert de la Rüe qualifiait « d'îles isolées du continent par variation du niveau de la mer ». À ce titre, elles ont déjà fait l'objet de commentaires dans le chapitre consacré aux mouvements eustatiques sur les cas des Falkland et des Seychelles (Figure 83). Nous nous intéresserons donc à une étude régionale comparative entre deux larges façades de dimension assez semblable, celle de l'Europe atlantique de Gibraltar à Mourmansk et extrême-orientale de la baie d'Halong à Vladivostok. Comme précédemment, leur longueur ne sera pas calculée à partir du trait de côte mais en suivant le grand axe du « ruban côtier » de 12 milles marins déjà utilisé pour établir la typologie insulaire distinguant îles péricontinentales et îles océaniques (types *IP* et *IO*, Figure 62 et Figure 63) et pour mesurer les densités insulaires (Figure 66 et Figure 67). Ainsi, les deux bandes littorales s'étendent sur près de 8 000 km dont une partie se développe sur le plateau continental sur des gradients latitudinaux de plusieurs dizaines de degrés depuis les milieux tropicaux (Vietnam, sud de la Chine) et subtropicaux (sud de la péninsule ibérique) jusqu'aux climats subpolaires (nord de la Norvège, sud de la province maritime de l'Extrême-Orient russe) (Figure 108A). On notera que ces deux ensembles côtiers, qui ont eu une grande importance historique, sont symétriques par rapport à l'Eurasie mais présentent un décalage en latitude lié au fait que les façades orientales des continents connaissent des climats bien plus froids que leurs pendants occidentaux du fait de la courantologie océanique. Les côtes chinoises et celles de la partie ouest de la péninsule coréenne bordent des mers épicontinentales (mers de Chine du sud et orientale, mer Jaune, golfe de Bo Hai) alors que les rivages de la mer du Japon ne sont pas associés à des plateformes continentales. Sur la façade européenne, les plateaux continentaux submergés se limitent à la mer du Nord à l'exclusion des côtes de la Norvège, la Manche et une partie des côtes françaises jusqu'à la latitude de Bordeaux. Les deux systèmes littoraux offrent de forts contrastes (Figure 108B) :

³¹⁵ Voir annexe 1.

³¹⁶ Cette remarque prospective sur ce que seront capables de fournir des capteurs de résolution plus fins dans un proche avenir fait écho à ce qui a été relaté sur l'estimation du nombre de fragments insulaires entre la publication de 1991 (voir Figure 26) (Depraetere, 1991) et celle de 2007 (voir Figure 28) (Depraetere & Dahl, 2007).

- Littoral atlantique européen de Gibraltar à Mourmansk où les fortes densités ($Di_2 > 160$ îles/ 10^4 km²) se limitent à la côte norvégienne sans plateau continental ayant connu de processus glaciaires et postglaciaires. Plus au sud, les densités sont faibles ($Di_2 < 20$, côte occidentale du Jutland, littoral normand, pays basque). Les densités moyennes ($40 < Di_2 < 80$) s'observent sur les deux caps « finisterres », en Bretagne et îles anglo-normandes ($Di_2 = 65$) et la Galicie ($Di_2 = 62$), la première associée à un plateau continental mais pas la seconde.
- Le littoral depuis la baie d'Halong à Vladivostok, les côtes méridionales de la Chine et de la partie ouest de la péninsule coréenne affichent des densités égales ou supérieures à 160 îles/ 10^4 km² alors que la côte orientale de la Corée du Sud, les rives du golfe de Bohai et la partie centrale des côtes chinoises sont presque exemptes de toute terre insulaire.

La comparaison de deux sous-régions comme les îles du Ponant y compris les îles anglo-normandes et le Sud de la Chine depuis Shanghai jusqu'à la péninsule de Leizhou devrait permettre d'illustrer les ressemblances en même temps que les contrastes d'espaces insulaires envoyés dans des contextes assez similaires. En effet, ces deux ensembles insulaires ont en commun d'être rattachés à d'anciens cratons pénéplanés se prolongeant en mer par des plateaux continentaux : cratons armoricain et de Cathaysia (cf. Ru-Ya & al., 2019). S'étendant sur une bande littorale de 620 km³¹⁷ autour de la péninsule armoricaine, les îles du Ponant³¹⁸ formées de roches granitiques et métamorphiques hercyniennes, composent un paysage complexe et diversifié d'îles et d'archipels séparés par de larges chenaux marins. Cette géographie insulaire procède des amples ondulations du socle de la pénéplaine armoricaine envoyée et des microreliefs spécifiques à l'altération et au démantèlement des formations cristallines. « Mésorelief » avec espacement de 20 à 40 km pour les grandes îles, « microrelief » d'ordre kilométrique pour les hauts-fonds des Glénans, des Minquiers et de Chausey. La plateforme continentale qui prolonge la péninsule armoricaine ayant été exondée pendant la dernière glaciation sans être pour autant englacée fait que sa topographie présente encore un modelé fluvial en milieu périglaciaire, les îles actuelles n'en étant que les interfluves les plus élevés. La configuration du domaine côtier insulaire de la Chine du sud, de Shanghai à la péninsule de Leizhou via la baie de la Rivière des Perles (Hong-Kong), offre la particularité de présenter une structure et une densité homogène sur une bande littorale de 1700 km. La méthode Korčák dissocie les fragments de plus de 80 km² (16 îles avec $b=1,65$) d'un cortège de terres plus petites (2110 îlots avec $b=0,66$). Leur géologie s'apparente à celle des îles du Ponant puisque leur socle est formé de roches granitoïdes datant du Crétacé et du Jurassique (Zhao & al., 2015, p. 4).

La comparaison des deux ensembles insulaires met en lumière une nette convergence statistique dans la distribution des tailles de leurs fragments insulaires (Figure 108C), même si l'échantillonnage de la côte chinoise est bien plus important et concerne une bande littorale trois fois plus longue et quatre fois plus étendue. La différence majeure s'observe au regard des densités insulaires qui sont trois fois plus faibles pour les îles bretonnes (Figure 109). Deux arguments permettent d'expliquer ce différentiel. L'échantillonnage sur le domaine

³¹⁷ La longueur de la bande littorale est estimée à partir des rubanoïdes côtiers établis pour définir la typologie des îles et leurs densités (voir annexes 4 et 5). Cette estimation consiste à suivre le grand axe de ces « rubans » côtiers, ce qui équivaut à un traitement de type « squelettisation » sur un objet géographique (cf. méthodes de la morphologie mathématique). L'intérêt d'établir ainsi la longueur de la façade marine tient à ce qu'elle est peu sensible à l'échelle des cartes ou des données et au pas de mesure, ce qui n'est pas le cas pour la longueur du rivage.

³¹⁸ Inclut toutes les îles depuis Belle-île au sud jusqu'à l'archipel anglo-normand au nord.

breton se caractérise par l'absence totale d'îles dont la superficie serait comprise entre Ouessant (17 km²) et Guernesey (66 km²)³¹⁹ alors que l'on n'en compte pas moins de 25 dans la bande littorale du sud de la Chine. Bien que moins marquée, la même différence est observée pour les fragments insulaires compris entre 1 et 17 km² avec seulement 14 îles (8% de 170) pour la Bretagne et 313 (15% de 2126) pour la côte chinoise. Le second élément permettant d'expliquer la différence de densité repose sur le fait que les îles bretonnes sont généralement plus éloignées de la côte, augmentant d'autant le buffer de 12 milles marins autour des terres émergées (mainland et îles comprises), ce qui réduit nécessairement la densité. L'interprétation géomorphologique de cette analyse comparative supposerait une étude plus approfondie de la genèse des paysages dans le temps long de leur évolution géologique sous l'effet des processus liés au système Terre-Océan-Atmosphère, ce qui n'est pas envisageable dans le cadre imparti de cet ouvrage. Néanmoins, des hypothèses générales peuvent être avancées en se basant sur le modèle conceptuel présenté au début de ce chapitre. La géométrie d'ensemble des deux régions considérées est conforme au modèle R1 (Figure 86A) de vastes domaines avec une pente générale. Le caractère discontinu des fonctions NS conduit à penser que plusieurs types de mésoreliefs et de microreliefs analogues à ceux des modèles R2 et R3 (Voir Figure 86B et C) sont à l'œuvre en se combinant selon des échelles et des magnitudes spécifiques. Ces différences supposées dans l'« amplitude » et la « longueur d'onde » des modelés de méso et microéchelle ne peuvent que produire des simulations différentes telles que celles de la Figure 86D, contribuant à expliquer les convergences et divergences statistiques et géographiques observées sur deux ensembles insulaires.

³¹⁹ Cette « lacune insulaire » d'une classe de superficie a été observée dans d'autres contextes (voir Figure 101A et D).

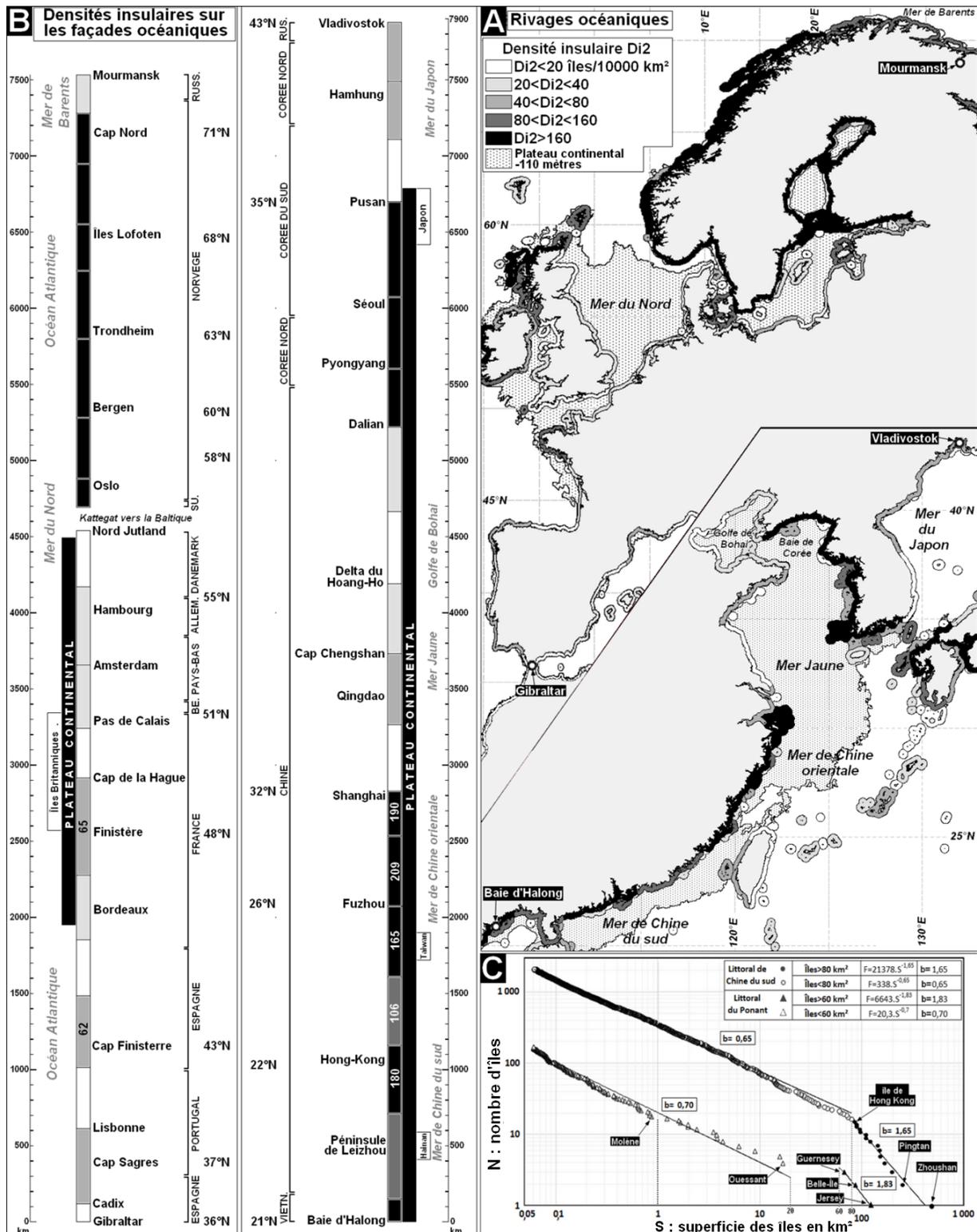


Figure 108 : Comparaison des deux façades littorales de l'Europe atlantique de Gibraltar à Mourmansk et de l'Extrême-Orient depuis la baie d'Halong jusqu'à Vladivostok.

(A) Cartes des densités insulaires et des plateaux continentaux envoyés suite à la transgression flandrienne (isobathe - 110 mètres).

(B) Cartouche linéarisé des densités d'insularité des deux façades maritimes et leur position par rapport aux plateaux continentaux submergés et aux îles hauturières.

(C) Comparaison des courbes NS et de leur exposants Korčák pour les îles du Ponant en France et celles du littoral de la Chine du Sud entre Shanghai et la péninsule de Liezhou.

Domaines insulaires	Classes de superficie en km ²	Méthode de Korcak		Méthode des densités insulaires			
		Fonction de distribution $N=a.S^{-b}$	Exposant de Korcak b	Superficie en km ²		Nombre d'îles N_i	Densité insulaire relative $Di2=10000.N_i/(S_b-S_i)$
				du buffer 12MM*	des îles		
Littoral de Chine du sud	Îles >80 km ²	$N=21378.S^{-1,65}$	1,65	104 600	2 411	16	1,57
	Îles <80 km ²	$N=338.S^{-0,65}$	0,65	104 600	2 693	2 110	207
	Toutes les îles	$N=329.S^{-0,66}$	0,66	104 600	5 104	2 126	214
Littoral du Ponant <small>* 12 miles marins</small>	Îles >60 km ²	$N=6643.S^{-1,83}$	1,83	25 720	274	3	1,18
	Îles <60 km ²	$N=20,3.S^{-0,7}$	0,70	25 720	101	167	65
	Toutes les îles	$N=21,9.S^{-0,66}$	0,66	25 720	375	170	67

Figure 109 : Comparaison de l'insularisation des côtes de la Chine du Sud et des îles du Ponant pour l'exposant de Korčák par classes de superficie et pour les densités insulaires.

Les mêmes Îles du Ponant (Figure 110A) peuvent être comparées à celles relevant d'un contexte bien différent, comme ceux de la mer Égée (Figure 110B) et la mer de Seto au Japon (Figure 110C). Dans les deux cas, nous avons non des plateaux continentaux mais des hauts-fonds partiellement submergés qui présentent une tectonique complexe de failles et de blocs basculés de pétrographie variée. Pour ce qui est des densités, les îles de la « Méditerranée japonaise » se démarquent par leur forte densité insulaire ($Di2=279$ îles/10⁴ km²). Cela peut s'expliquer par la faible extension de la mer de Seto encadrée par les grandes terres de Honshu, de Shikoku et de Kyushu, au regard du nombre de fragments insulaires ($N_i=296$) qui l'occupent (Photo 4). La mer Égée est aussi encadrée par de grandes terres sur trois cotés mais sur une étendue bien plus importante, avec de larges espaces marins séparant un pavage assez régulier de terres insulaires. Bien qu'ayant un nombre élevé d'îles ($N_i=876$), la densité de l'ensemble égéen ($Di2=52$) est du même ordre que celle des îles du Ponant ($Di2=65$) qui, comme indiqué plus haut, font partie d'une façade océanique ouverte vers le large. En considérant la tendance générale des fragments insulaires supérieurs à 0,06 km², la mer Égée apparaît hypofragmentée ($b=0,48$), la mer de Seto mésofragmentée ($b=0,57$) alors que, comme nous l'avons déjà noté, les îles du Ponant sont proches de l'hyperfragmentation ($b>0,7$) avec une valeur de 0,66. Toutefois, un examen plus attentif des distributions démontre une fois encore que des tendances diverses semblent se dégager en fonction des classes de superficie considérées. En mer Égée, un seuil statistique s'observe autour de 5 km² avec une tendance à l'augmentation progressive de la valeur de b^{320} lorsque S tend vers 0,06 km². En mer de Seto, une rupture de pente est sensible autour de 10 km² avec, à l'inverse du cas précédent, une diminution de la pente tendancielle pour les valeurs proches de 0,06 km². Les cas grec et japonais sont donc bien différents de celui des îles bretonnes, qui s'en distinguent également par l'hyperfragmentation des îles de moins d'1 km² avec $b=0,8$, alors que la pente tendancielle pour la même classe de fragments insulaires n'est que de 0,55 pour la mer Égée et 0,43 pour la mer de Seto.

La méthode SN et la valeur de l'exposant de Korcak constituent en quelque sorte des « signatures statistiques » dépendant des contextes climatiques et morphostructuraux dans lesquels s'inscrivent les paysages insulaires au sens d'*landscapes* :

- La tendance générale pour toutes les îles de plus de 0,06 km² oscille entre hypofragmentation (îles de la mer Égée, $b=0,48$), mésofragmentation (mer de Seto, $b=0,57$, Photo 4), et l'hyperfragmentation (Îles du Ponant, $b=0,66$) ;
- Les seuils de rupture de pente ou de changement de tendance pour les courbes SN se situent entre 1 et 50 km² pour les îles bretonnes, autour de 5 km² pour les îles

³²⁰ Soit la pente tendancielle de la fonction puissance $N = a.S^{-b}$.

grecques et de 10 km² pour les îles japonaises ;

- Les tendances par classes de superficie, notamment pour les valeurs inférieures aux seuils précédents, donnent une hyperfragmentation constante avec des valeurs proches de 0,8 pour les « petites îles » bretonnes. L'amortissement des fréquences des îles de la Méditerranée japonaise lorsque S tend vers 0,06 km² signifie par contre une hypofragmentation de plus en plus marquée correspondant à une fonction de distribution de type logarithmique que reflète la convexité de la courbe SN. C'est l'inverse pour les « petites îles » grecques qui voient augmenter leur fragmentation lorsque leur superficie diminue (concavité de la courbe SN).



Photo 4 : 163 îles de plus de 0,5 km² totalisant 1814 km² dans la mer de Seto, la « Méditerranée japonaise » (voir Figure 110C). Combien d'îlots plus petits ?

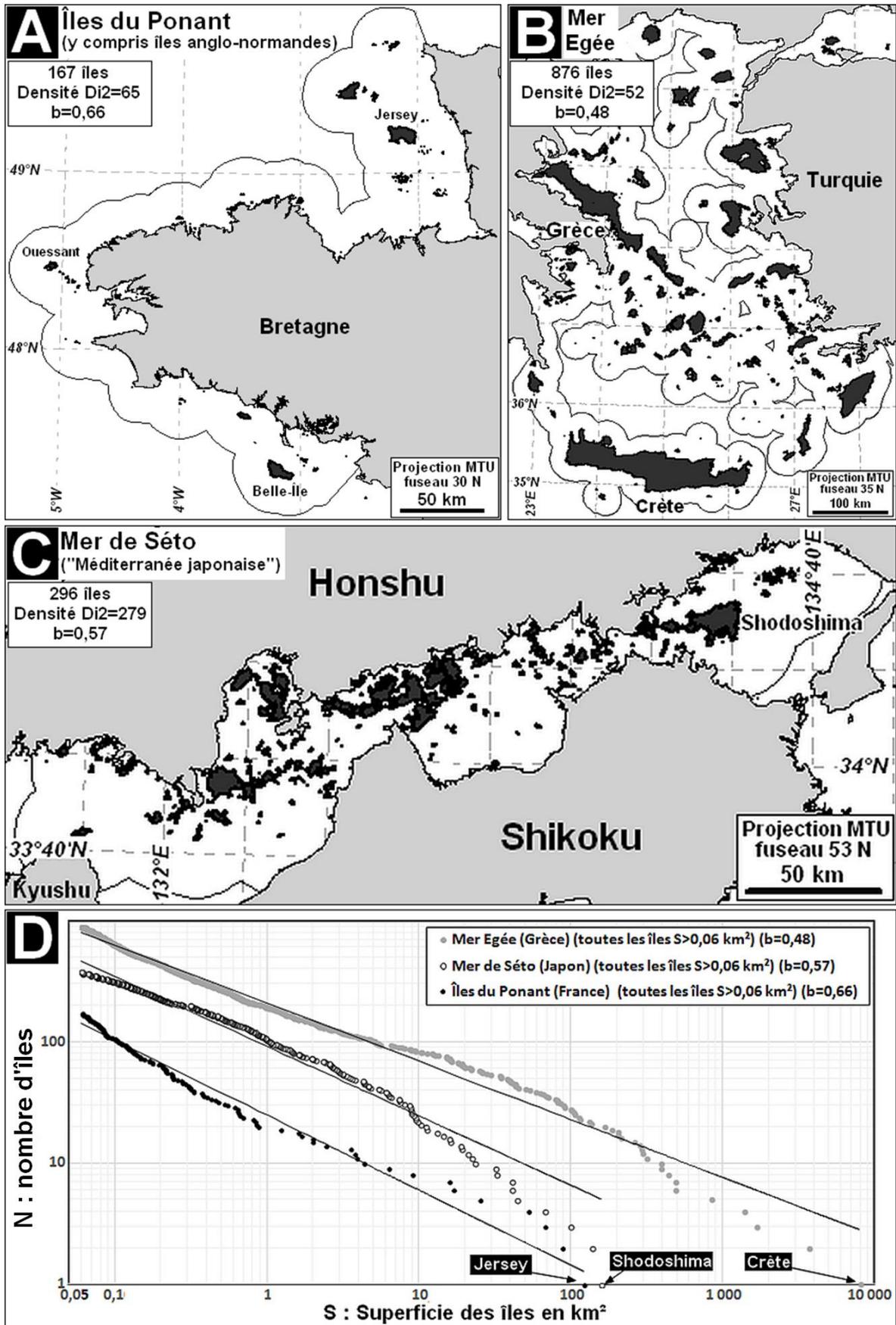


Figure 110 : Comparaison des îles du Ponant, de la mer Égée et de la mer de Seto.
(A) Îles du Ponant. (B) Îles de la mer Égée. (C) Îles de la mer de Seto
(D) Comparaison des courbes NS et exposants de Korčák pour les trois régions insulaires.

L'examen comparatif précis des propriétés des courbes NS en fonction de classes de superficie de nos trois régions insulaires souligne tout l'intérêt d'une approche analytique des espaces insulaires en révélant des modulations selon le type de fragmentation qui, pour être subtils et donc imperceptibles au regard d'autres méthodes, n'en sont pas moins le reflet de propriétés intrinsèques des systèmes TOA locaux et de leurs effets géomorphologiques en termes de formation des îles soit la morphogénèse. Sur ce point, il convient de faire un parallèle entre la vitesse de remontée du NMM postglaciaire et la vitesse du recul des côtes et de l'insularisation de nouvelles terres, en particulier dans des régions où l'homme occupait les plaines littorales maintenant submergées. Nous avons vu que la montée du NMM était de l'ordre d'1,5 cm/an de 15 000 à 7 500 BP atteignant même 3 cm/an entre 15 000 et 14 000 BP (Voir Figure 78A). Or, la pente des plateaux continentaux dépasse rarement un pour mille. Le long du littoral de la Chine du sud, elle est même de 0,06 %. Une montée d'1,5 cm/an doit se traduire par un recul de la côte de 25 m/an soit 2,5 km/siècle. Les changements ont dû paraître évidents même à l'échelle d'une génération puisqu'ils sont de l'ordre du kilomètre. Ces phases de submersion rapide sont contemporaines de la protohistoire voire du début de la diffusion du Néolithique pour le sud de la Chine. L'insularisation de Formose et des populations protoformosanes est un phénomène récent qui s'est fait par étape puisque des péninsules et des îles facilitaient les échanges. En comparant le banc de Taiwan (Figure 111B) avec celui de Dogger en mer du Nord (Figure 111A), à partir de la bathymétrie actuelle et l'évolution du NMM (voir Figure 78A), il apparaît probable que les deux paléoîles de 5000 km² environ ont été submergées en moins de 2000 ans entre 10 000 et 8 000 BP. Des artefacts et des os de mammifères terrestres ayant été trouvés par dragage sur le banc de Dogger, il est plus que probable que le banc de Taiwan ait été aussi occupé par des populations humaines. L'effet de « rétrécissement insulaire »³²¹ à l'échelle d'une trentaine de générations humaines a sans doute conduit à des migrations vers les terres voisines et éventuellement à des légendes dans la tradition orale. La diffusion de la culture des Protoformosans vers le sud débutera vers 6000 BP, soit quelques millénaires après la submersion totale du banc de Taiwan.

Parmi les îles péricontinentales posées sur les plateaux continentaux, il en est une famille bien particulière ; ce sont les îles karstiques, capables de générer des paysages d'une grande originalité. Elles sont suffisamment peu nombreuses pour qu'on en liste quelques-unes : les karsts coralliens soulevés des îles Loyauté (Maurizot & Lafoy, 2006), l'archipel maltais, dans des strates coralliennes anciennes (Guilcher & Paskoff, 1975, p. 226), le plateau de Djerba, les îles de Gurello et Tariton dans le Sud chilien (Jaillet & al., 2008, p. 3), certaines îles des Ryukyu³²², l'archipel Aru au sud-ouest de la Nouvelle-Guinée (Spriggs, O'Connor, & Veth, 2006, p. 4), l'île d'If au large de Marseille, etc. Toutefois, les plus connues et les plus vastes domaines karstiques ennoyés restent les enfilades de fuseaux insulaires de la côte dalmate (Figure 112A) et plus encore les cathédrales rocheuses de la baie d'Halong (Figure 112B). Le littoral marin de la Croatie correspond à un ensemble de plissements calcaires parallèles dont les anticlinaux émergent de la mer épicontinentale de l'Adriatique. Pour la baie d'Halong, il s'agit d'un empilement de calcaire stratifié mais peu plissé posé sur la mer épicontinentale de Chine du sud et ayant évolué pendant vingt millions d'années dans un climat tropical. Bien qu'ayant des affinités morphostructurales, les deux ensembles se distinguent nettement à la fois en termes de densité insulaire et de fragmentation. Si la densité des îles dalmates constitue un record pour la Méditerranée avec 189 îles/10⁴ km², celle de la baie d'Halong donne lieu à la plus forte valeur mondiale, hormis les régions à RIPG de la zone

³²¹ Phénomène de « *shrinking or strained island* » en biologie animale (Russell & al., 2016 ; Li & Li 2011).

³²² Des karsts entièrement sous-marins ont été récemment découverts au large de l'île Ishigaki (Hironobu & al., 2015).

périglacière, avec presque 1300 îles/10⁴ km², soit un rapport d'1 à 7 entre les deux domaines karstiques. Quant à la fragmentation (Figure 112C), elle s'affirme nettement plus marquée sur les îles vietnamiennes ($b=0,79$, cas d'hyperfragmentation) que sur les îles de l'Adriatique ($b=0,52$, proche de l'hypofragmentation). Les dispositifs insulaires apparaissent ainsi fort différents. La raison peut être d'ordre lithologique du fait de la nature géochimique des roches carbonatées, de l'interstratification de dépôts non calcaires ou de l'intensité de la tectonique plissante, pour ne pas parler du climat.

Outre leur intérêt scientifique certain du moins pour les karstologues, il est opportun de remarquer que les deux régions sont éminemment touristiques et vantent le caractère exceptionnel de leurs paysages en évoquant le nombre d'îles qui les composent. Sur un site touristique du WEB, il est fait état de 1244 îles sur le littoral croate³²³. Pour la baie d'Halong, les chiffres varient entre 1600 et 2000. En adoptant la même démarche qu'en début d'ouvrage pour les côtes norvégiennes (Voir Figure 29) en partant de la relation superficie-nombre (Voir [4]), on s'aperçoit que le dénombrement « touristique » des îles pour la Dalmatie suppose la prise en compte de tous les fragments insulaires supérieurs à 0,5 hectare alors que pour celles de la baie d'Halong le seuil insulaire serait de l'ordre de 3 hectares. Ce détail atteste, s'il en était besoin, que les chiffres indiqués pour vanter le caractère hyperinsulaire d'un lieu touristique n'ont qu'un intérêt très limité. Il faut insister à nouveau sur le fait qu'un décompte insulaire n'a de sens que s'il est défini par rapport à une gamme d'échelle définie. Si seuls les fragments insulaires de plus de 2 km² sont considérés, alors la Dalmatie est plus insularisée que la baie d'Halong. En deçà, c'est l'inverse. Par cet exemple et tant d'autres y compris dans la littérature scientifique, il devient évident que les îles plurielles possèdent une géographie variable dont l'intérêt des valeurs chiffrées parfois d'une précision toute illusoire (i.e. les 1244 îles croates) lorsqu'elles ne sont pas traçables en termes de données et de méthodes.

À l'instar d'Aubert de la Rüe qui définissait une classe d'îles « particulières », nous ne mentionnerons que quelques-unes d'entre elles. Parmi les côtes à fjords et à RIPG plus ou moins important, certaines îles se distinguent par l'absence de relief sur tout ou partie de leur territoire, d'où leur nom de *strandflat* qui signifie « plage plate » en norvégien (Guilcher & al., 1986). Les plus étendues sont les Shannon (1 241 km² Figure 113A) et l'île Île-de-France (242 km² Figure 113B) au large de la côte nord-est du Groenland. Bien que de plus petite taille, on en trouve également sur le littoral norvégien, par exemple à Grönö (3,7 km², par 13° 26' E 66° 47' N) au milieu d'îles à fort relief (Derruau, 1965, p. 387). Les processus de formation de ces plateformes glaciaires ennoyées ou à fleur d'eau restent à ce jour à élucider.

³²³ Voir site WEB <https://www.croatie-location.fr/en/croatia-travel-guide/islands-of-croatia/16.html>

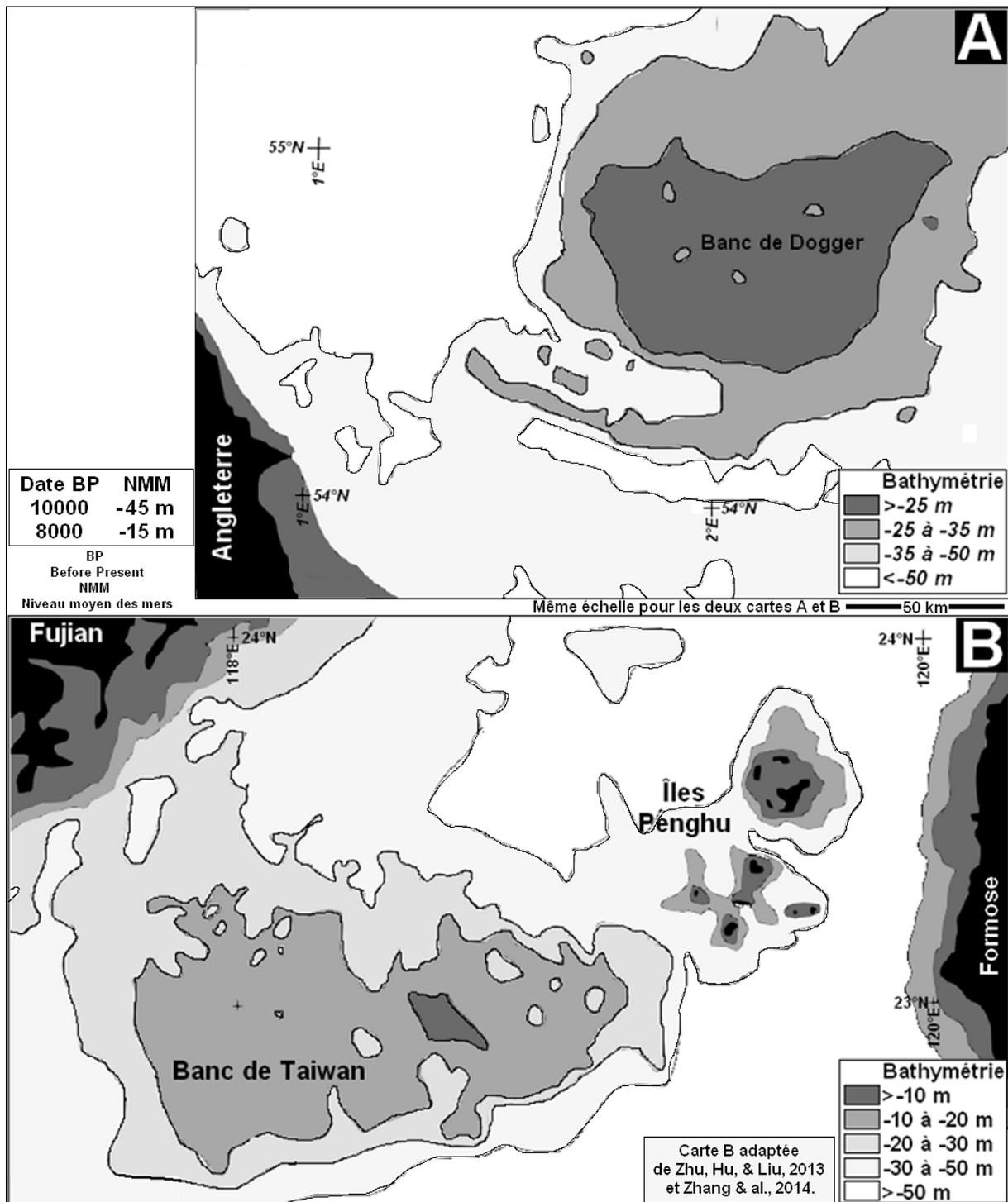


Figure 111 : submersion des bancs de Dogger (A) et de Taiwan (B) entre 10000 et 8000 BP.

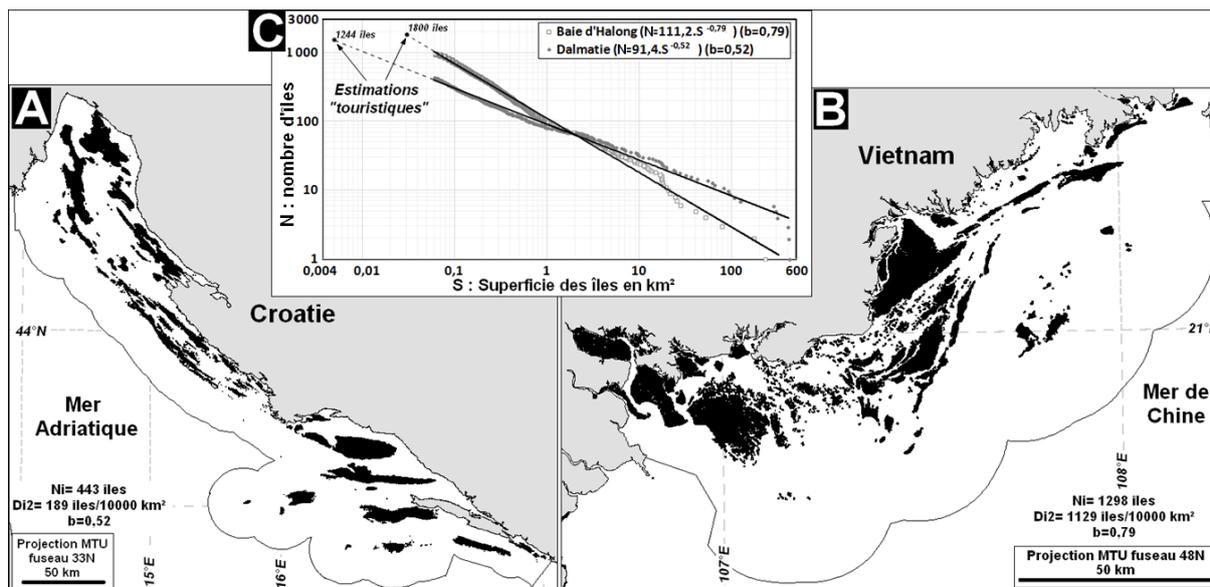


Figure 112: Groupe d'îles karstiques de la côte dalmate (A) et de la baie d'Halong (B). (C) Comparaison des courbes SN et de leurs fonctions d'ajustement pour les deux régions avec extrapolation pour comparaison avec les informations « touristiques » (voir texte).

La recherche d'engrais pour l'agriculture au cours du XIX^e siècle a provoqué un grand intérêt pour les îles à guano sur les îlots baignés par les eaux extraordinairement poissonneuses du courant de Humboldt du fait d'un phénomène d'*upwelling* sur toute la côte occidentale de l'Amérique du Sud et jusqu'à l'équateur. Les déjections d'oiseaux pêcheurs se sont accumulées pendant plusieurs milliers d'années sur les îles où ceux-ci nidifient. Le phénomène y est facilité par l'absence de pluie. Évoquer les « îles à phosphates » ramène au cas emblématique et tragiquement édifiant du micro-État moninsulaire de Nauru : de cet atoll soulevé de 21 km², ce ne sont pas moins de 70 millions de tonnes de guano qui ont été exportés de 1906 à 2005, ce qui représente une épaisseur moyenne de 3,2 mètres MTU les 14 km² de la partie centrale de l'île (Scholz & Wellmer, 2013)³²⁴. La carte de Nauru de 1934 de la Figure 114A offre un raccourci saisissant sur le fonctionnement du monde d'alors, archétype du caractère synecdochique de l'île en tant que « micromonde » illustrant le fonctionnement du « macromonde » : un hinterland à guano en devenir d'exploitation, une concession minière en cours d'exploitation, un espace de cocoteraies et de jardins pour les populations autochtones, un quartier européen entre la concession et le port, enfin une parcelle de terre pour les manœuvres chinois sous contrat travaillant dans la mine. Il va sans dire que tout cela se faisait et tend encore à se faire avec une considération mineure pour l'environnement et les ressources naturelles, et notamment quant aux conséquences de l'excavation de terre sur les lentilles d'eau douce tant en quantité qu'en qualité dont dépendent les populations locales. La quête de guano a conduit à une « course aux îles » pendant tout le XIX^e siècle avec en point d'orgue la guerre du guano en 1863 entre l'Espagne et des États sud-américains pour les 36 hectares des îles Chincha³²⁵. L'île Henderson, non loin de Pitcairn (Figure 114B), Clipperton et son lagon fermé (Figure 114C), ainsi que l'île de la Navasse (*Navassa island*) entre Haïti et Cuba (Figure 114D), vont faire l'objet de prospections voire d'exploitations, comme ce fut le cas pour les deux dernières (Voir tableau de la Figure 114). Au même titre que les îles

³²⁴ D'autres atolls du même type ont connu le même destin funeste en particulier l'île Océan (ou Banana) dans l'archipel gilbertien.

³²⁵ Le Pacifique fut la principale région touchée par ce phénomène mais on trouve également quelques îles à phosphate dans l'océan Indien, dont Christmas au nord-ouest de l'Australie, Juan de Nova dans les îles éparses du canal du Mozambique ainsi que l'île de la Navasse dans la Caraïbe.

Loyauté, les îles à guano de type atolls soulevés comme Nauru, Henderson et Navassa peuvent avoir un système karstique qui a pu être partiellement fossilisé du fait du guano qui, étant un matériau meuble, peut colmater les fissures et les dolines sous l'effet du ruissellement. Suite à son exploitation, une reprise de la circulation vadose peut provoquer une redistribution des ressources en eau entre la partie lenticulaire et les nappes karstiques.

Pour clore cette périégèse géomorphologique insulaire, il faut au moins évoquer quelques particularités liées à la longueur des côtes ou au relief. Pour les longueurs du littoral par rapport à la superficie, l'indice côtier modifié (I_{cm}) tel qu'illustré dans la Figure 23 permet d'identifier des îles remarquables : sur la carte de la Figure 115A, l'extrême festonnement de la Terre de Baffin ($I_{cm}=11,3$) fait contraste avec sa voisine toute ronde et lisse, l'île du Prince Charles ($I_{cm}=1,2$)³²⁶. Parmi les grandes terres, Terre-Neuve mais aussi la Grande-Bretagne se distinguent par un fort allongement des côtes avec respectivement 8,4 et 6,1 comme I_{cm} ³²⁷. Inversement, l'île de la Réunion ($I_{cm}=1,26$) mais aussi Bornholm dans la Baltique (1,33) et Arran en Écosse (1,37) se caractérisent par la faible longueur relative de leurs côtes à la fois de par la forme générale de leur île et le tracé régulier du rivage.

À l'instar des longueurs de côte, la fonction établissant une tendance statistique entre altitude maximale (Z_{max}) et superficie (S) peut servir de critère pour distinguer les îles ayant un relief particulier ($Z_{max}=55.S^{0,33}$ voir Figure 49A). En faisant le rapport entre l'altitude maximale d'une île de superficie S et la valeur tendancielle de la formule précédente, on obtient un indice I_{zmax} indiquant si le relief est inférieur ($I_{zmax}<1$) ou supérieur ($I_{zmax}>1$) à la valeur altitudinale de référence pour une île de même superficie ($I_{zmax} = 1$). Les terres insulaires de faible relief ($I_{zmax}<0,5$) sont légion et relèvent de divers types géomorphologiques : îles alluviales de delta (delta du Gange) ou de panache côtier (îles frisonnes), de mangrove (Yos Sudarto), coralliennes (Bahamas) ou encore née de RIPG (Aaland). L'île du Prince Charles déjà remarquée pour sa rotondité s'affiche comme étant une des plus plates avec une altitude maximale de 71 mètres et un $I_{zmax} = 0,07$ (Figure 115B). À titre de comparaison, la Corse a la même superficie mais culmine à 2 706 mètres, si bien que le même indice a pour valeur 2,6. La plupart des îles ayant un indice I_{zmax} supérieur à 3 sont volcaniques à l'exception de la Géorgie du Sud 3,5³²⁸. Ce genre d'édifices insulaires a pour représentants Fogo au Cap-Vert (6,74), Tristan du Cunha dans l'Atlantique sud (7,71) et Atlasova dans les Kouriles (7,83). Il existe un îlot australien qui se démarque totalement des ordres de grandeur habituels en matière de relief : au large de Lord Howe, le sommet de la Pyramide de Ball (Ball's Pyramide en Anglais), qui ne mesure que 35 hectares, est de 562 mètres, de sorte que son indice I_{zmax} est de 14,6 (Figure 116A et B). Les parois subverticales de cet îlot en forme de croissant procèdent du dégagement par érosion différentielle d'un neck volcanique encadrant une ancienne caldeira devant avoir un diamètre de l'ordre de 2 km. Ces ultimes témoins actuels constituent un paysage sans équivalent dans l'archipel monde (Figure 116C). Nous verrons également dans le chapitre consacré à la biogéographie insulaire que cet îlot aux pentes subverticales habrite une espèce endémique ayant survécu sur quelques buissons accrochés sur un léger replat de la paroi : le phasme géant de l'île de Lord Howe (*Dryococelus australis*).

³²⁶ La côte de la Terre de Baffin est 11 fois plus longue qu'une île parfaitement circulaire de même superficie.

³²⁷ Rappelons que pour être comparables les indices côtiers modifiés doivent être calculés à partir de données de trait de côte de même pas, ce qui est le cas avec les données GSHHG utilisées.

³²⁸ L'indice I_z représente le pourcentage de la topographie observée par rapport à la valeur tendancielle. Ainsi la valeur de 0,07 pour l'île du Prince Charles indique que son altitude maximale ne représente que 7 % de celle attendue pour une île de cette taille. De même, le chiffre de 3,5 pour la Géorgie du Sud signale que le relief est 3,5 fois plus élevé que la « moyenne ».

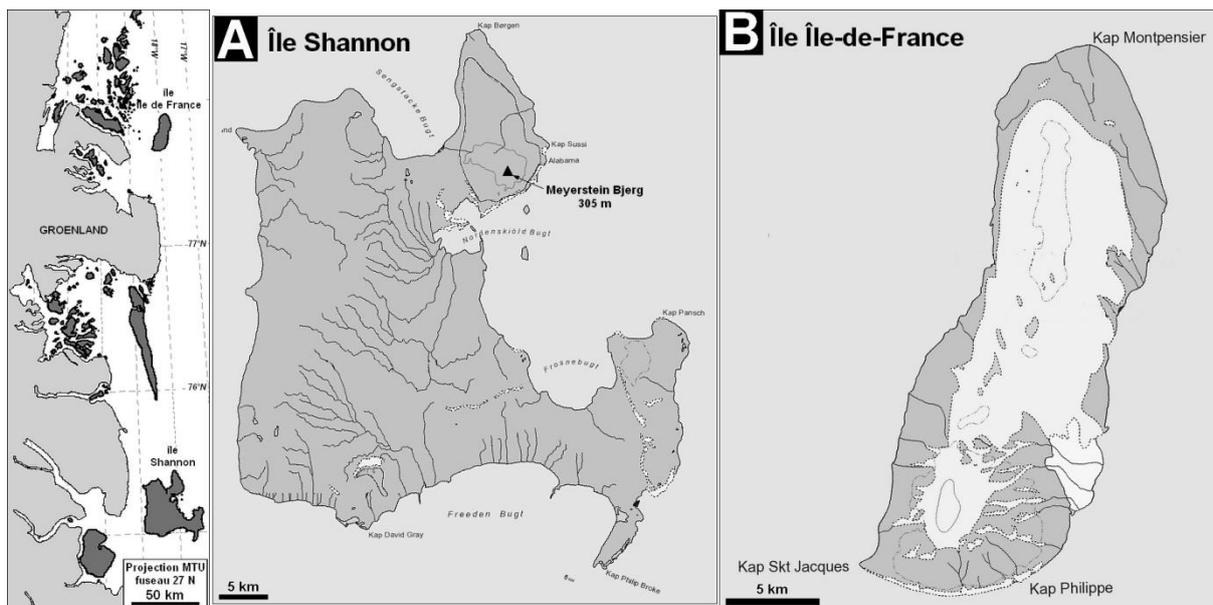


Figure 113 : îles Shannon (A) et île Île-de-France (B) sur le *strandflat* au nord-est du Groenland.

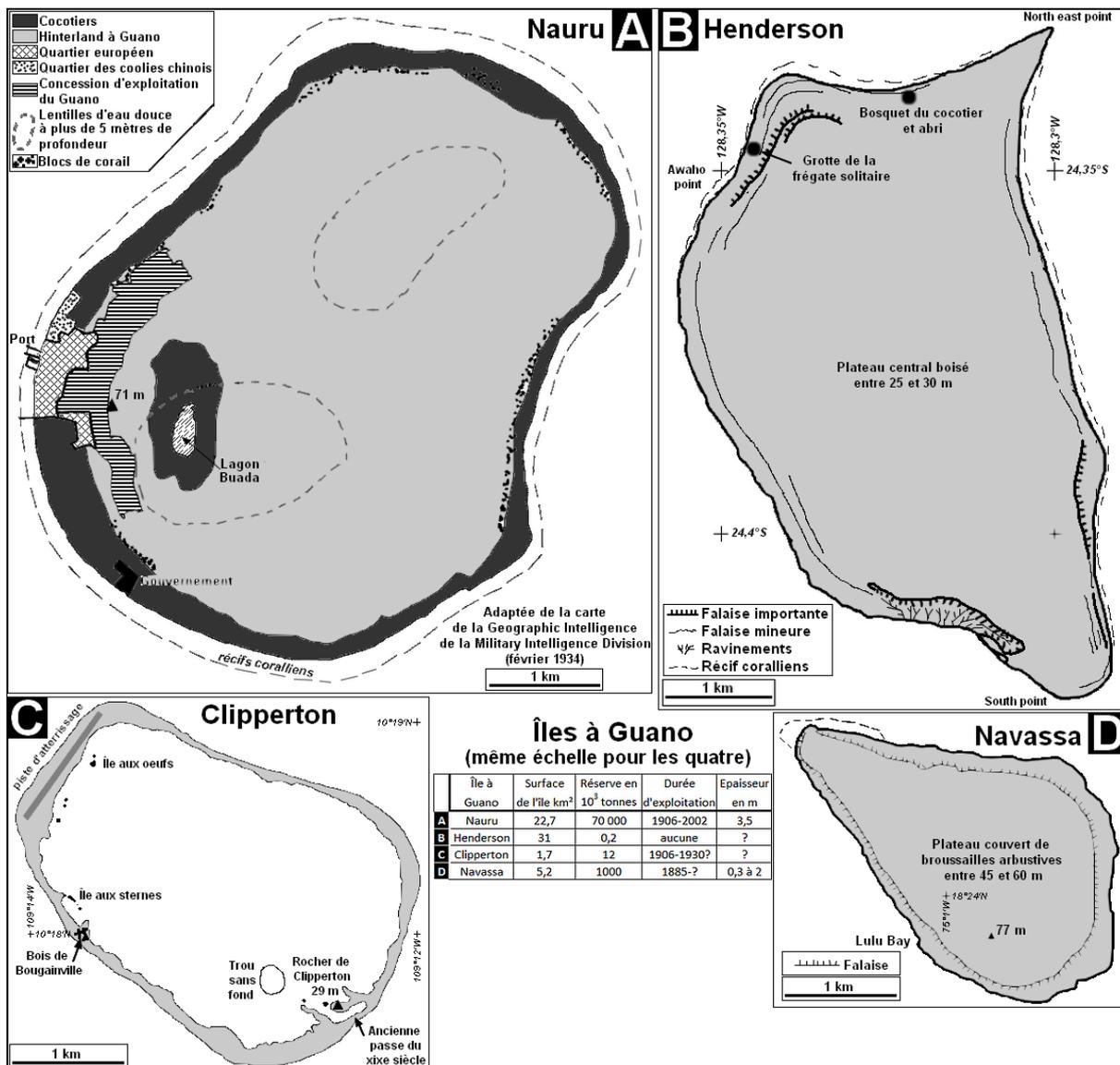


Figure 114 : îles à guano (A) Nauru. (B) Henderson (C) Clipperton (D) Navassa.

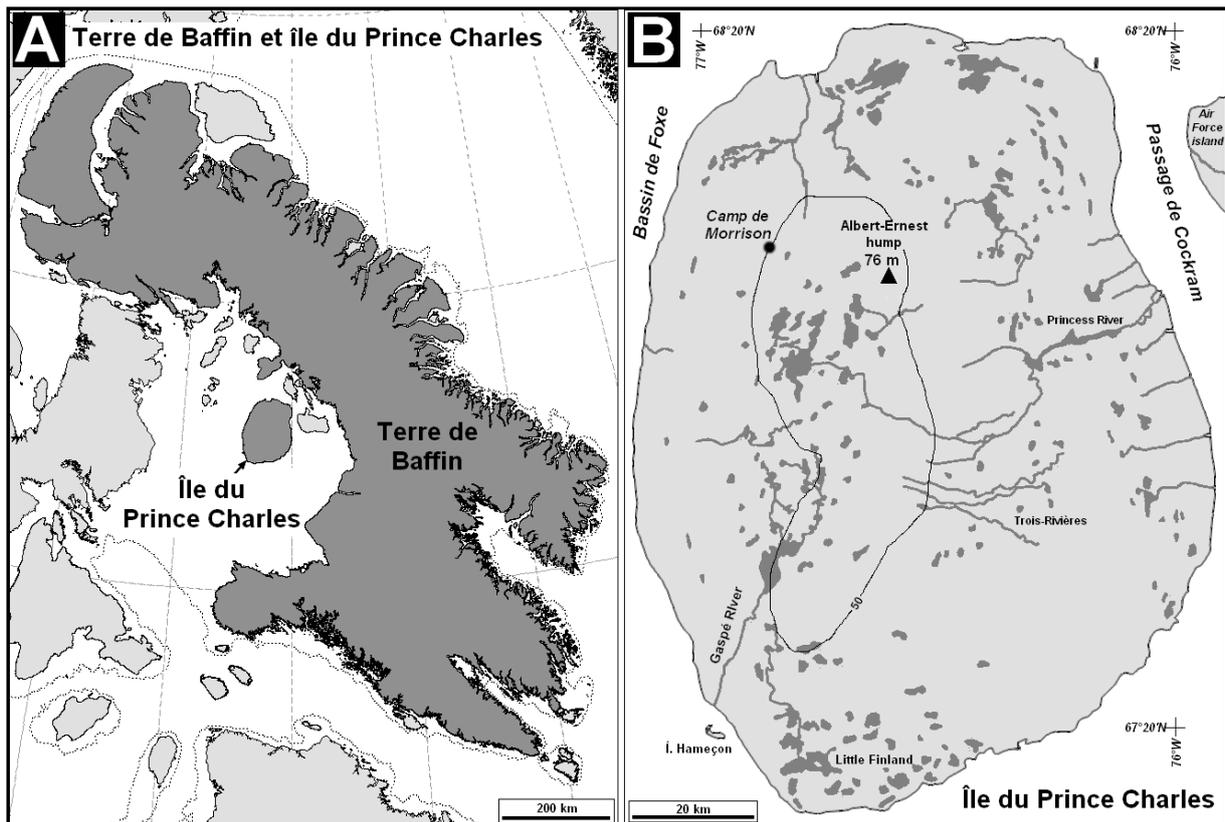


Figure 115 : Contraste de longueur de côte entre la Terre de Baffin et l'île du Prince Charles
 (A) Fort découpage de la côte de la Terre de Baffin ($I_{cm}=11,3$) comparée au rivage régulier de l'île du Prince Edouard ($I_{cm}=1,2$).
 (B) Île du Prince Charles caractérisée par une faible longueur de côte ($I_{cm}=1,2$) et un relief plat ($I_{zmax}=0,07$) (Carte adaptée de Morrison, 1997)

Aux notions de polygénisme et de dépendance d'échelle des processus, si familières aux géomorphologues, il n'est pas sans intérêt d'ajouter l'approche densimétrique et fragmentologique des formes de terrain telle qu'esquissée sur des espaces insulaires comme une contribution possible, sinon souhaitable, au renouvellement des thèmes de recherche et de réflexion sur la notion de signature morphologique. Le big data en cours nous en donne à présent les moyens.

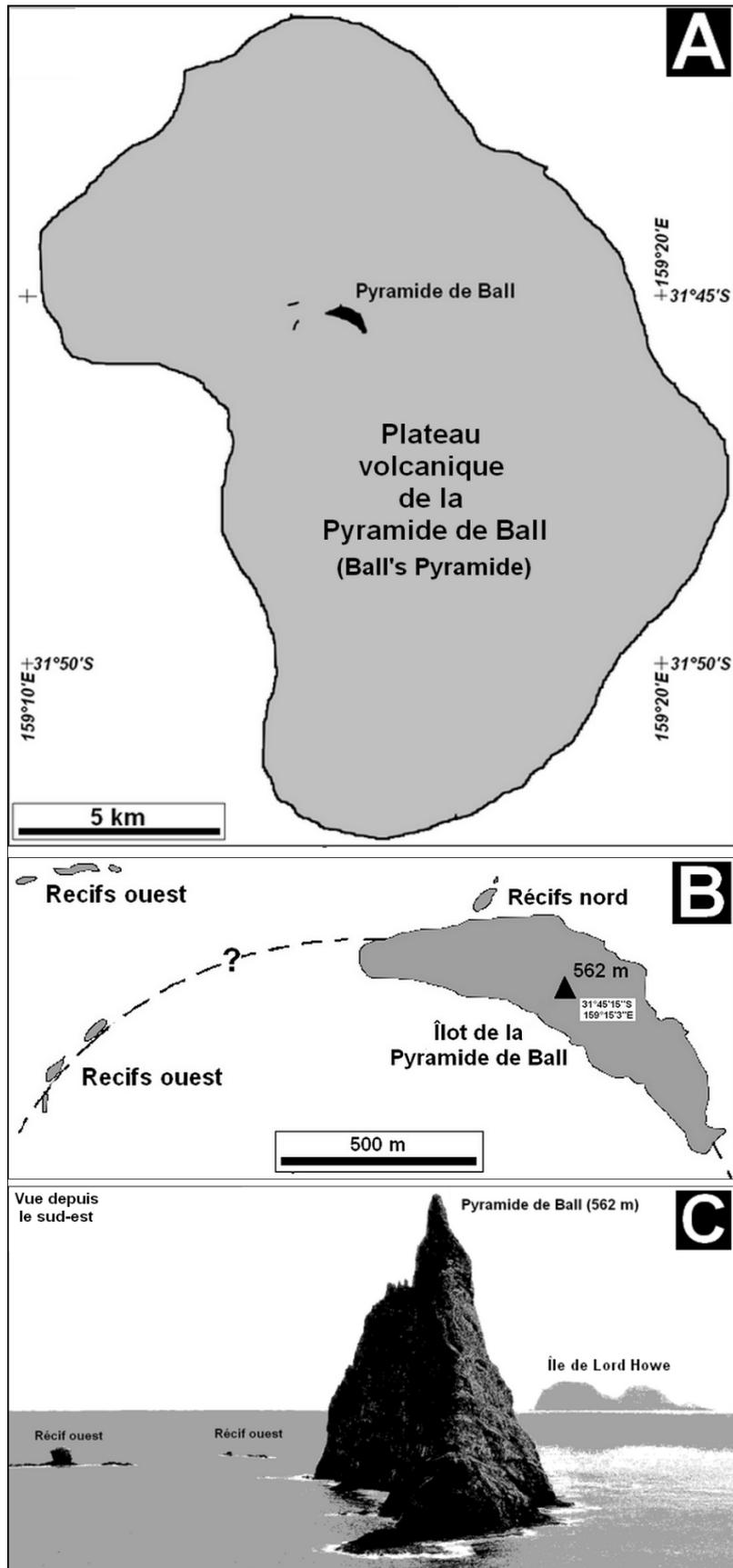


Figure 116 : Îlot de la Pyramide de Ball (Australie) au relief exceptionnel ($Iz_{max} = 14,6$).

(A) Plateau volcanique de la Pyramide de Ball (adapté de Linklater & al., 2015).

(B) Îlot de la Pyramide de Ball et ses récifs de l'ouest (d'après GoogleEarth).

(C) Îlot vu du sud-est avec en arrière-plan l'île principale de Lord Howe à 24 km.

2.19. Fragmentologie et densimétrie des espaces insulaires

La fragmentation des terres émergées reflète des processus ayant des dépendances d'échelles qui tendent à se combiner pour donner des paysages complexes, variés et plus ou moins uniques tant la combinatoire des formes de terrains et de leurs morphogénèses s'avère infinie. Pourtant (c'est en cela que des approches sérielles peuvent être fécondes) force est de constater que la fragmentation de l'archipel monde suit une loi statistique somme toute assez simple : tous les fragments insulaires, de 0,06 à 1 000 000 de km² s'ajustent sur une fonction de distribution puissance étonnamment régulière comme décrit dans la Figure 28 au début de cet ouvrage. La « mise en équation » d'un phénomène à la fois polygénique et multifactoriel a, cependant, de quoi rendre perplexe plus d'un géomorphologue. Comment interpréter cette apparente régularité de la fragmentation insulaire à l'échelle mondiale ? La démarche suivie consiste à examiner les propriétés fragmentologiques et leurs liens avec la densimétrie des domaines insulaires en diverses régions et à toutes les échelles afin d'évaluer la stationnarité spatiale du phénomène. La tendance observée à l'échelle globale est-elle uniforme ? Une stationnarité parfaite supposerait que la même fonction avec des paramètres du même ordre soit universelle sur différents échantillonnages de fragments émergés. Le constat général est le suivant :

- Les fonctions de distribution statistique des superficies de fragment se révèlent le plus souvent de type puissance $N=a.S^{-b}$. Toutefois, d'autres types de fonction peuvent localement s'avérer plus adaptés, dont les fonctions logarithme $N=a.Ln(S)+b$, exponentielle $N=a.e^{-b.S}$, voire s'apparenter à des sigmoïdes $N=1/(1+e^{-a.S})$;
- En ne considérant que le cas le plus fréquent des fonctions puissance, il est de fait que le paramètre b évolue dans une gamme de valeurs bien plus large que celle estimée par Mandelbrot pour des surfaces fractales « réalistes », confirmant ainsi que la fragmentologie insulaire n'est pas de nature strictement fractale mais suit des lois de fragmentation qui ne peuvent être à homothétie interne au sens de similarité de forme à toutes les échelles et en tous lieux. Ce point est capital car il est davantage conforme à ce que l'on sait de la dépendance d'échelle des formes de terrains, ce qui nous amène au troisième point ;
- Dans de très nombreux cas, la même fonction de distribution ne s'applique pas de façon uniforme à l'ensemble de l'échantillonnage de superficie mais doit être ajustée empiriquement par morceaux. Cela se traduit par des valeurs de b spécifiques à des classes de superficie séparées par des seuils statistiques, des ruptures de pente sur les graphiques Log-Log, qui peuvent être plus ou moins nets. Il arrive que ce changement soit progressif avec changement de nature de la fonction d'ajustement passant par exemple d'une fonction puissance à une fonction logarithme ou exponentielle notamment pour les petites superficies inférieures à 1 km², ce qui nous amène au quatrième point :
- L'amortissement des fréquences des fragments insulaires lorsque leur superficie tend vers 0 est un phénomène théorique attendu et ceci pour deux raisons. Il ne peut y avoir un nombre infini de fragments émergés picométriques à la fois parce que cela n'a plus de sens physique mais aussi du fait que l'érosion marine les ferait disparaître instantanément à supposer qu'ils existent.

Or, la fonction puissance la plus généralement ajustée sur les fragments supérieurs à 0,06 km², voire moins quand les données d'échantillonnage le permettent (archipel des Scilly, voir Figure 35), ne peut se traduire par un amortissement. Seule la fonction exponentielle $N=a.e^{-b.S}$ permet de converger vers une valeur finie du nombre de fragments lorsque leur superficie devient proche de 0 (voir annexe 1). La fonction linéaire $N=a.S+b$ n'est pas à considérer, bien qu'elle présente la même propriété, car elle ne correspond à aucune distribution observée. En corollaire à ce qui précède et en toute logique, il devient évident qu'il doit y avoir un phénomène d'amortissement statistique pour les valeurs faibles de superficie sans doute sous la forme d'une fonction exponentielle venant relayer des fonctions de type puissance ou logarithme non asymptotiques. Ne disposant de données homogènes et exhaustives que pour les îles de plus de 0,06 km², il est probable que le seuil d'amortissement se situe généralement en deçà de cette valeur. Toutefois, dans quelques cas un amortissement exponentiel est sensible vers 0,1 km² (îles récifales de la mer Rouge et atolls de l'ensemble Maldives-Laquedives-Chagos, Figure 107) ou peut être logarithmique (voir archipel arctique de Nordenskjöld en Figure 82 et fonction logarithme généralisée sur l'ensemble de l'échantillon pour les îles frisonnes en Figure 93C, Féroé en Figure 103E).

Il faut revenir sur le cas des ajustements de fonctions puissance par morceaux distinguant « petites », « moyennes » et « grandes » îles, dispositif typique de ce que nous avons appelé la fragmentation dite macaronésienne pour les archipels volcaniques (Voir Figure 101E). Une classe intermédiaire y correspond aux îles « moyennes ». Elle est identifiable par un palier statistique hypofragmenté soit une valeur de b faible comparée à celle des deux classes encadrantes, ce qui signifie que les fragments, dans cette gamme d'échelle, sont moins fréquents que le laisserait supposer la distribution d'ensemble. Dans certains cas, il peut y avoir une lacune insulaire entre les « grands » et « petits » fragments (Canaries, Lipari, Sandwich du Sud, Figure 101D et F), si bien que, dans ce cas, la notion de tendance statistique d'ensemble de la fragmentation perd un peu de son sens lorsqu'une large gamme de superficie ne présente pas ou peu d'observations. De ce fait, la valeur de fragmentation $b=0,13$ extrêmement faible pour la classe intermédiaire de 0,3 à 220 km² des îles macaronésiennes a une signification statistique limitée tout en indiquant qu'il existe une nette différenciation entre deux magnitudes de superficie insulaire, celles de superficie supérieure à 220 km² des édifices volcaniques en place et celles inférieures à 0,3 km² reflétant la présence d'îlots liés au démantèlement d'anciens volcans ou de récifs coralliens. Dernier point concernant les ajustements par morceaux, on note que souvent les « grands » fragments divergent légèrement de la distribution d'ensemble ; le plus souvent les plus grands fragments sont davantage hyperfragmentés que la tendance générale (cas manifeste avec $b=1,03$ pour les îles de la Terre François-Joseph de plus de 300 km², Figure 103E) ou parfois l'inverse (îles de la Baltique supérieures à 40 km² avec $b=0,58$, Figure 37).

Comme le montrent les multiples exemples précédents, les propriétés de fragmentation des terres, par type de fonction, paramètres et classe de superficie des diverses fonctions permettent de dégager des différences que l'on peut qualifier de « loi d'échelle » des formes de terrain, que ce soit dans des contextes volcaniques, coralliens, alluviaux ou postglaciaires. À cette signature statistique des fragments insulaires s'ajoutent celle des densités insulaires, d'ordre géographique. Sans revenir sur les aspects méthodologiques, il est utile de rappeler qu'elles sont établies en fonction de deux critères : seuls sont pris en compte les fragments de

plus de 0,06 km² et l'utilisation d'un buffer de 12 milles marins en tant que « surface marine de référence ». Le fait le plus marquant reste celui des très fortes densités de plus de 500 îles/10⁴ km², qui ne s'observent que dans les régions postglaciaires combinant laniéragage des côtes par les fjords et rebond isostatique du plancher marin. En dehors de ces régions péripolaires, le site karstique de la baie d'Halong (Di2=762), les côtes septentrionales à récifs-barrières et frangeants du nord de Cuba (Di2=706) et les îles alluviales à l'embouchure de la Léna (Di2=518) composent des espaces insulaires hyperfragmentés dans des contextes forts différents. À l'inverse, les domaines volcaniques, essentiellement océaniques, ont une faible densité inférieure à 20 îles/10⁴ km², sauf lorsqu'ils sont associés avec des récifs coralliens (Nouvelle-Géorgie, Figure 97D). Entre ces deux extrêmes, il y a la configuration ô combien particulière des atolls dont les fragments insulaires de type motu peuvent poser question : faut-il considérer ces « tiretés annulaires » comme une seule terre insulaire ou les comptabiliser un à un comme nous l'avons fait par souci de cohérence de la méthode. En conséquence de quoi, leurs densités peuvent être assez fortes localement (environ 100 aux Chagos, au Touamotou et à Tonga) tout en restant le plus souvent proche de 50 (Micronésie, Maldives). Les récifs coralliens, notamment les récifs-barrières, sont le plus souvent dans la fourchette de 100 à 200 îles/10 000 km² comme c'est le cas en mer Rouge, aux Bahamas et localement en Indonésie et aux Philippines. Quant aux espaces insulaires d'enneigement des périphéries continentales, leurs densités apparaissent éminemment variables du fait de la diversité des contextes y compris le cas extrême d'absence d'îles au large de la côte, ce qui est fréquemment le cas le long des rivages de l'Afrique et d'une grande partie de l'Amérique du Sud. Dans des contextes morphostructuraux particuliers, les densités dépassent 200 îles/10 000 km² : sud-ouest de la Corée, mer intérieure de Seto du Japon, côte ouest de la Birmanie, littoral occidental de l'Irlande partiellement découpé par des processus glaciaires. Hormis les domaines postglaciaires, les régions volcaniques et coralliennes, il est plus difficile d'associer une « signature » densimétrique avec des processus ou un contexte particulier. À titre d'exemple, les karsts ennoyés de la baie d'Halong, de la côte dalmate et des îles Aru en Irian Jaya ont des densités respectives de 762, 138 et 100 îles/10 000 km².

Partant des observations précédentes, des simulations d'espaces insulaires peuvent être faites en utilisant les propriétés des fonctions de distribution des fragments et en les spatialisant sur des superficies du même ordre que celles des côtes ou archipels de référence de la Figure 38. Les quatre types de fragmentation simulés en Figure 117A se basent sur les données des côtes de la Suède (simulation B et Figure 95C et D), des archipels de la Macaronésie (C et Figure 98A), de la Terre François-Joseph (D et Figure 103A et E) et des Féroé (E et Figure 103C et E). Ces régions correspondent à des côtes à RIPB, des archipels de stratovolcans et de trapps basaltiques avec des variantes de fjordisation en fonction de la latitude. Elles sont toutes associées à des fragmentations de type puissance à l'exception des Féroé, pour lesquelles une fonction de distribution logarithme était plus adaptée.

L'apparente complexité de la répartition des terres émergées se laisse rarement réduire à une fonction de distribution aléatoire, celle-ci n'étant qu'un référent par rapport à une hypothèse nulle³²⁹, notamment dans nos simulations précédentes. Dans les suivantes, nous imposerons des contraintes spatiales à la répartition des fragments émergés. Il a été démontré que la fréquence des îles dépend en partie de la distance au mainland, qu'il s'agisse d'un continent ou d'une grande île (Figure 43). Cela s'observe sur nombre d'espaces insulaires péricontinentaux ($IP\alpha$ et dans une moindre mesure $IP\beta$), tout en étant plus manifeste sur les

³²⁹ Cette hypothèse postule l'égalité entre des paramètres statistiques des échantillons provenant de populations équivalentes.

côtes de la Suède et de la Finlande, où les fragments insulaires sont contraints proches du mainland en raison des propriétés géomorphologiques des socles sous-glaciaires et du processus géophysique de RIPG. Comment simuler un *islanscape* qui ressemblerait à ces côtes baltes hyperinsularisés et donnant lieu à des densités insulaires exceptionnelles ? Il suffit d'utiliser une fonction de répartition spatiale, par exemple de type logarithme en fonction de la distance au mainland, pour générer une structure qui a indubitablement un air de famille avec les dédales insulaires au large de Stockholm ou de Turku (Figure 117B). On obtient de la sorte un *islandscape* de forte densité dont la valeur de 3847 îles/10⁴ km² est conforme à ce que l'on mesure en Baltique (Voir Figure 67E, Figure 87A et Figure 95C). La simulation de type macaronésienne génère un espace beaucoup plus lâche avec quelques grands fragments et un cortège de microfragments des plus réduits qui l'apparentent aux Canaries ou à l'archipel du Cap-Vert (Figure 117C), de densité très faible pouvant être inférieure à 10 îles/10⁴ km². La carte de la simulation de type Terre de François-Joseph permet de retrouver le pavage de grands fragments de l'archipel de référence ainsi que des densités moyennes de l'ordre de 20 îles/10⁴ km² (Figure 117D). Enfin, la simulation de type Féroé forme un *cluster* de grands fragments dont la densité de 28 îles/10⁴ km² est du même ordre que l'archipel référent avec 25 îles/10⁴ km² (Figure 117 E).

En filigrane, ce chapitre ambitionne d'illustrer le caractère fécond de méthodes simples et génériques pour explorer les structures spatiales insulaires ; elles permettent de préciser et même d'explorer la diversité d'un « archipel d'archipels », soit le titre de la troisième partie consacrée à la géohistoire.

Les méthodes et les résultats de l'étude la « fragmentologie et de la densimétrie » ne sont-elles que des curiosités statistiques ?

Peuvent-elles contribuer au renouvellement des problématiques des Etudes insulaires ?

Certes, ce qui précède suggère plus qu'il n'affirme car il ne peut donner réponse à toutes les interrogations dont certaines sont d'ordre théorique. Ainsi, le constat déjà fait avant nous que les fragments insulaires s'ajustent le plus souvent avec des lois puissance³³⁰ mais aussi parfois avec des fonction log, ne trouve pas à ce jour une explication physique satisfaisante, quels que soient l'échelle et le contexte. À défaut de réponse, ces analyses sérielles et quantitatives des espaces insulaires qui composent l'archipel monde ne peut que stimuler la réflexion tout en proposant de nouvelles pistes de recherche. Plus encore, nous restons convaincus que ces approches « mathématiques » assez élémentaires dans leur principe et leur mise en œuvre³³¹ devraient trouver place dans l'enseignement de la géographie de par leur intérêt pédagogique, et plus encore propédeutique.

³³⁰ Qu'elles soient apparentées ou non à des propriétés partiellement et putativement fractales.

³³¹ Il ne s'agit que de statistiques ! Pour les vrais mathématiciens, les statistiques sont aux mathématiques ce que la chanson de variété est à l'opéra, ce que l'astrologie est à l'astrophysique, etc.

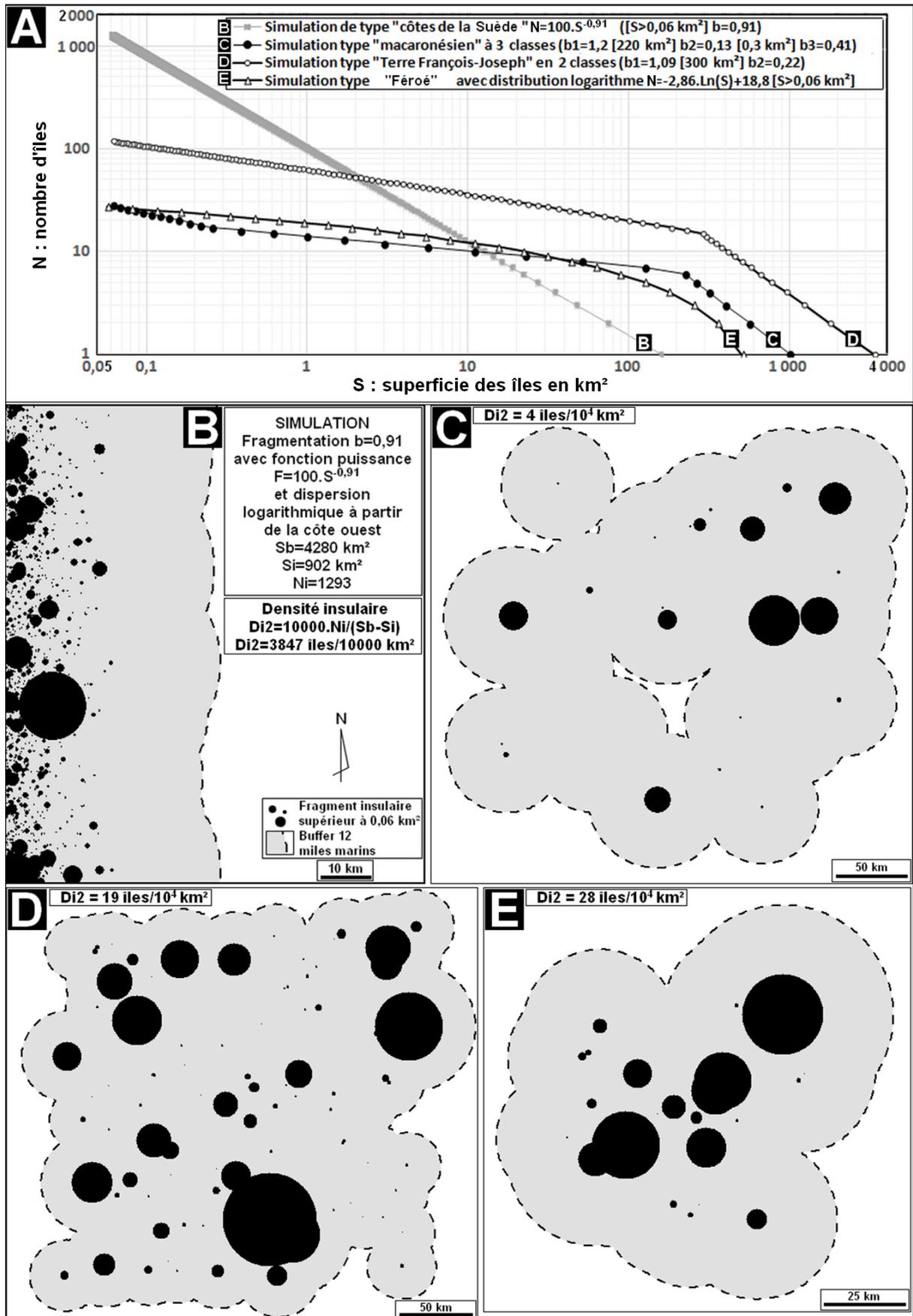


Figure 117 : Simulation d'espaces insulaires à partir de types de fragmentations observés. (A) Typologie des courbes NS. (B) Type « côtes de la Suède ». (C) Type « macaronésien ». (D) Type « Terre François-Joseph ». (E) Type « Féroé ».

« En définitive, la qualité du vert des îles varie à la fois en longitude comme en latitude. À l'échelle d'une île également, l'intensité du vert varie avec la géographie. Ce sont la distribution des pluies et l'intensité de l'anthropisation de l'île qui expliquent les variations observées. Au niveau de la mer, on oppose les rivages "au vent" qui, exposés à l'air océanique chargé d'humidité, présentent une végétation naturelle au vert intense et uniforme, aux côtes "sous le vent", beaucoup moins arrosées car passant sur le centre de l'île, l'air marin s'est asséché. »
(David, 2008, p. 125)

« Sur une île quasiment désertique de l'archipel de Setonaikai au sud-est du Japon, une famille travaille sans interruption pour faire pousser graminées et légumes. La difficulté de leur tâche vient essentiellement du manque d'eau, qu'il faut aller chercher sur l'île voisine au prix d'efforts ininterrompus. »
Résumé du film *L'île nue* de Kaneto Shindo (1961)³³²

2.20. Climats, ressources en eau et biomes insulaires :

Autrefois simple sujet de discussion entre quelques spécialistes, le changement climatique (CC) se trouve maintenant au cœur des débats aussi bien au niveau des forums internationaux que des discussions entre voisins du fait du caractère rapide et sensible qu'il prend actuellement. Historiquement, quelques pionniers travaillant sur la « variabilité des climats » n'ont pas eu la partie facile. Pour ne citer qu'un climatologue français, Jean Mascart publie en 1925 un ouvrage qui a peu marqué les esprits de ses contemporains. On y trouve l'interrogation suivante :

« Que ce soit brusquement ou d'une façon progressive, peut-être même à travers des oscillations périodiques, notre climat est-il en voie de modification ? » (Mascart, 1925, p. 10).

Presque un siècle plus tard, la question de la variabilité des climats n'en est plus une et s'avère présente dans tous les esprits et plus encore dans les discours. Le questionnement à l'origine tout scientifique a pris une tournure politique lorsqu'il est apparu qu'il pouvait y avoir un lien de cause à effet entre les activités humaines et la dérive climatique actuelle : Ainsi donc l'utilisation d'énergie fossile et de façon corrélative l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a suffi pour perturber le système TOA. En somme, l'humanité découvre qu'elle est devenue un facteur fondamental d'évolution de la géosphère et de ses hôtes³³³ : l'anthropocène est née.

Les milieux insulaires offrent-ils des conditions particulières par rapport au CC et aux ressources en eau ? Nous verrons que oui. La spécificité principale et commune aux climats insulaires tient à leur environnement océanique, qui se caractérise par une moindre variation des températures au cours de l'année et par des précipitations plus importantes par rapport aux terres continentales. Ces caractéristiques océaniques sont d'autant plus marquées que l'île est petite.

Les biomes se définissent comme de vastes ensembles écosystémiques homogènes

³³² Cf. <http://www.dvdclassik.com/critique/l-ile-nue-shindo>

³³³ Voir introduction de l'ouvrage sur le système TOA en interactions avec la biosphère.

couvrant de larges portions du globe : toundras, déserts, steppes, savanes, forêts denses ou tempérées, etc. Ils sont étroitement liés au climat auquel ils contribuent pour partie. Biomes et climats présentent une disposition zonale à l'échelle du globe avec des différences en fonction de leur position (par rapport aux continents) et de l'influence des grands courants océaniques, ce qui définit ce que les physiciens appellent le système Terre-Océan-Atmosphère (TOA). L'étude des bioclimats³³⁴ des îles à l'échelle de l'ensemble de l'archipel monde suppose l'utilisation de méthodes simples et génériques. Ainsi pour le climat, nous utiliserons principalement (mais sans exclusive) les températures (T) et précipitations (P) moyennes annuelles par île. La classification de Köppen ne sera pas mise à contribution car elle s'avère trop complexe à l'échelle de notre analyse. Pour les biomes la méthode de Holdridge (1947, 1976) et sa variante de Whittaker (1975) sont simples à mettre en œuvre car elles n'utilisent que les deux variables climatologiques T et P . Ce choix implique des limitations quant à la définition des bioclimats car il ne permet pas de tenir compte de la saisonnalité. De ce fait, certains bioclimats, comme ceux liés aux moussons, ou présentant de forts contrastes en cours d'année, comme les milieux méditerranéens, ne peuvent être déterminés. Cette méthode, malgré ses limitations a déjà été utilisée pour estimer le « glissement biomique »³³⁵, autrement dit le déplacement latitudinal et altitudinal des biomes à l'échelle mondiale y compris en zone boréale ((Jylhae, Tuomenvirta, & Ruosteenoja, 2004) (Yates, Kittel, & Cannon, 2000)). Des méthodes bioclimatiques plus élaborées seront cependant utilisées aux échelles régionales et locales afin d'illustrer comment se déclinent scalairement les variables climatiques. Quant aux données, elles proviennent de la base WORLDCLIM (Hijmans, 2005) fournissant une grille climatique de résolution kilométrique dont l'échelle est du même ordre que les données GSHHG utilisées pour inventorier les îles. Il va sans dire qu'on ne dispose pas d'informations climatiques pour la plupart des fragments insulaires de superficie inférieure à la résolution de WORLDCLIM. Aussi le jeu de données climatiques insulaires ne portera-t-il que sur 13 502 îles, la plupart ayant une superficie supérieure à 1 km². Les valeurs moyennes climatiques par îles font référence à l'ensemble des points de grille de WORLDCLIM inclus dans les polygones insulaires, que ce soit pour les températures ou pour les précipitations. Concernant les grandes îles, en particulier celles avec un relief important (Nouvelle-Guinée, Formose, Corse), leurs moyennes doivent être considérées comme une tendance insulaire bioclimatique générale, par définition non représentative des contrastes entre les milieux côtiers et ceux de haute montagne. Les données WORLDCLIM sont utilisées pour fournir des scénarios d'évolution du climat jusqu'en 2050 à partir de la moyenne de trois Modèles de circulation générale (MCG) et d'une hypothèse moyenne d'émission de gaz à effet de serre³³⁶.

La zonalité bioclimatique étant fondamentale, la Figure 118 présente l'évolution des températures et des précipitations par îles en fonction de la latitude pour tout l'échantillon considéré pendant la période 1950-2000, considérée comme point de référence par rapport aux évolutions futures. La moyenne mobile latitudinale de ces valeurs reflète la zonalité de l'ensemble des fragments insulaires alors que les points par îles indiquent la dispersion des observations autour du climat insulaire moyen. Bien que limité aux températures et précipitations annuelles, les deux courbes font ressortir la dominante océanique des climats insulaires de l'ensemble de la Terre. Dans la zone intertropicale, les températures restent de l'ordre de 17°C entre 15°S et 15°N sans différence notable entre les deux hémisphères. Les taux de décroissance moyens des températures dans les zones tempérées chaude, froide et

³³⁴ Climats et biomes.

³³⁵ Ou "biomic shift" (Depraetere, Depraetere, Kershaw, & Karssenberg, 2014) (Depraetere & Depraetere, 2015).

³³⁶ Ce scénario moyen correspond à l'hypothèse A2 utilisée dans les forçages climatiques des MCG des projections du GIEC.

polaire sont du même ordre pour les deux hémisphères : $-0,55^{\circ}\text{C}$ par degré de latitude au sud et $-0,5^{\circ}\text{C}$ au nord. La dissymétrie la plus nette concerne la variabilité des climats insulaires dans ce dernier hémisphère, l'écart le plus notable se situant vers $67,5^{\circ}\text{N}$ avec des températures variant dans la fourchette -16°C et 6°C . Cela s'explique par les contrastes climatiques et océaniques entre les côtés ouest et est des grandes masses continentales, le plus marqué étant celui de l'Atlantique nord entre les côtes de Norvège d'une part et le Labrador d'autre part. Comme attendu, car elles sont plus dépendantes de conditions locales, la zonalité et la variabilité des précipitations se révèlent bien plus complexes avec des contrastes plus marqués entre les deux hémisphères. Les pluies restent abondantes ($> 2\ 000$ mm) entre 11°S et 15°N alors qu'une tendance plus sèche ($\sim 1\ 000$ mm) est manifeste aux latitudes comprises entre 40° et $22,5^{\circ}$ dans les deux hémisphères. Dans les intertropiques, les maxima s'observent le long de la côte pacifique de la Colombie (Soldado, $7\ 218$ mm), au large de la Birmanie (Auk Bok, $5\ 684$ mm) et en Micronésie (Kosrae, $5\ 441$ mm). Aux plus hautes latitudes, le sud se distingue du nord par l'abondance des précipitations dont l'essentiel est dû aux côtes chiliennes situées dans la zone des quarantièmes rugissants au pied des Andes patagoniennes ($P > 6\ 000$ mm/an sur quelques îles, dont Tariton, $6\ 430$ mm). Aux latitudes tempérées froides de l'hémisphère nord, un modeste maximum pluviométrique de $1\ 750$ mm s'observe vers 52°N sans que les quelques cas extrêmes dépassent $4\ 000$ mm (Coronation en Alaska, $3\ 760$ mm).

Le scénario moyen 3M de changement climatique pour l'année 2050³³⁷ est caractérisé par une augmentation des températures à toutes les latitudes alors que celui des précipitations se révèle erratique, en particulier dans la zone équatoriale et la partie tropicale de l'hémisphère nord (Figure 119). Aux latitudes tempérées froides australes, l'accroissement des températures n'est que de $+1^{\circ}\text{C}$ démontrant ainsi l'inertie climatique des périphéries antarctiques. Les précipitations devraient augmenter de 50 mm/an, ce qui ne représente qu'une faible augmentation relative dans ces régions déjà très pluvieuses. Entre 45°S et le tropique nord, l'élévation des températures reste comprise entre $+1,5$ et $+2^{\circ}\text{C}$. Les pluies se caractérisent par une opposition de part et d'autre de l'équateur, le sud devenant plus arrosé alors que c'est l'inverse pour le nord. Entre le tropique nord et le cercle polaire arctique, l'accroissement thermique passe progressivement de $+2$ à $+3^{\circ}\text{C}$ alors que les précipitations enregistrent une augmentation de l'ordre de 50 mm/an au nord de 30°N . La zone arctique se singularise par un fort gradient d'augmentation des températures passant de $+3^{\circ}\text{C}$ au cercle polaire pour atteindre $+6^{\circ}\text{C}$ vers 83°N . Les précipitations, majoritairement sous forme de neige, présentent une augmentation de l'ordre de $+25$ mm/an, ce qui n'est pas négligeable compte tenu du faible total annuel des régions polaires en général.

³³⁷ Le scénario 3M (3 modèles) correspond à la moyenne des trois Modèles de circulation général (MCG) disponibles dans les données WORLDCLIM : CCCMA (canadien), CSIRO (Australie) et HADMC3 (Royaume-Uni).

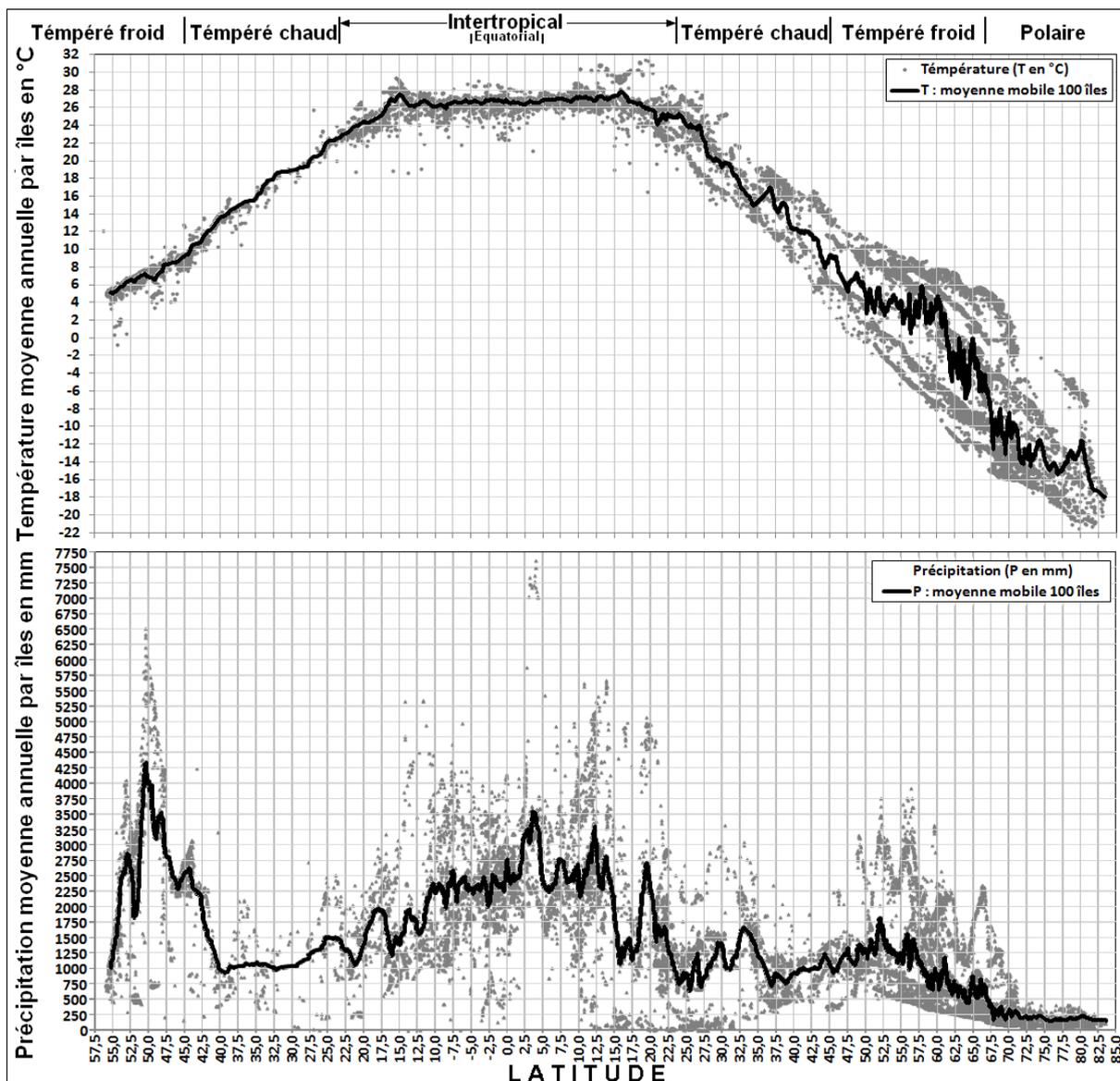


Figure 118: Températures (haut) et précipitations (bas) des moyennes interannuelles sur la période 1950-2000, chaque point représentant une île de plus de 0,05 km² (Depraetere, Depraetere, Kershaw, & Karssenber, 2014)(Depraetere & Depraetere, 2015)

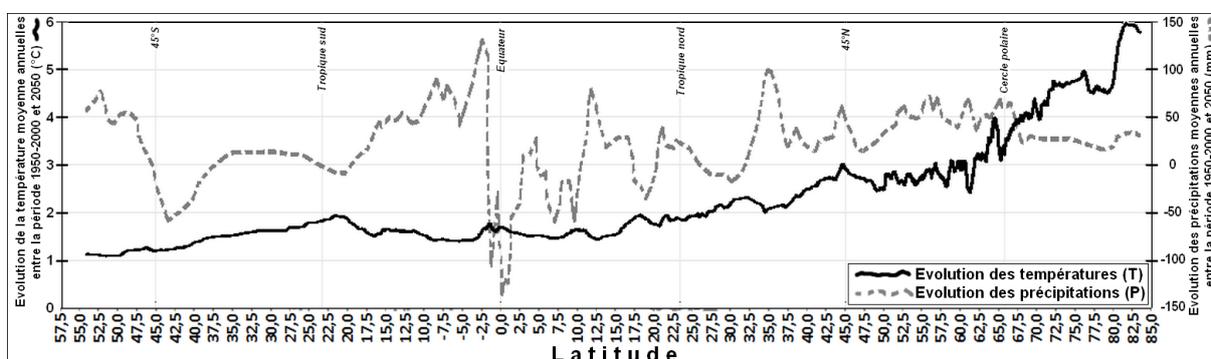


Figure 119 : Projections de l'évolution des températures et des précipitations moyennes annuelles des îles entre la période 1950-2000 et 2050 en fonction de leur latitude (source : idem Figure 118)

Le climat des domaines insulaires offre un large spectre de conditions bioclimatiques (Figure 120A) allant de l'hyperboréalité d'Ellesmere dans l'extrême nord canadien aux milieux arides de Socotra et de Bahreïn en passant par les domaines subpolaires (Sakhaline, Islande, Terre de Feu, Wellington et Kerguelen), les milieux tempérés froids (Gotland, Grande-Bretagne, Tasmanie, Ouessant), les îles méditerranéennes (Corse, Sicile, Rhodes, Djerba), tropicales (Formose, Nouvelle-Calédonie, Cuba) et équatoriales (Nouvelle-Guinée et Ko Lanta). L'originalité et l'intérêt de la classification de Holdridge pour figurer et interpréter les données climatiques tient au calcul d'une estimation du degré d'aridité ou au contraire d'humidité d'une région sous la forme d'un ratio entre les précipitations annuelles (P) et l'évapotranspiration potentielle (EP), selon l'hypothèse simplificatrice que l'ordre de grandeur de cette dernière est liée à la température moyenne T . Il ne s'agit que d'une estimation, le calcul de l' EP faisant intervenir d'autres variables que la température moyenne tout en étant établi généralement au pas de temps mensuel (Cf. Lecarpentier, 1975). La formulation de l' EP et du REP selon Holdridge est la suivante :

$$[16] \text{ Evaporation potentielle : } EP = 58,9.T \text{ avec } T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

$$[17] \text{ Ratio d'évapotranspiration potentielle : } REP = P/EP = P/(58,9.T) \text{ avec } P \text{ en mm}$$

Ce ratio fournit une gradation des « domaines ombrothermiques »³³⁸ allant de conditions hyperarides (Îles de la mer Rouge et du Golfe arabo-persique) à des milieux hyperhumides ou « saturés » (îles du sud du Chili, dont Wellington, côte orientale du Canada et *panhandle* de l'Alaska). On notera d'une part que les isovaleurs de REP sont indiquées sous la forme d'abaque dans la Figure 120A³³⁹ et qu'elles ne peuvent être calculées lorsque les températures moyennes annuelles (T) sont inférieures à 0°C. Il en résulte, en ce cas, que toutes les îles sont classées dans le domaine climatique polaire, ce qui ne va pas sans problèmes notamment parce qu'il s'agit de moyenne « par îles » de plusieurs bioclimats, dont certains plus favorables. Ainsi, l'île de Sakhaline est classée dans cette catégorie du fait de son allongement latitudinal alors que sa côte méridionale offre des conditions plus favorables, habitée par des populations importantes, au même titre qu'en Islande. Les îles à tendance aride ne représentent que 2,6 % de l'échantillonnage et sont principalement localisées à la périphérie de la péninsule arabique, en particulier dans le golfe arabo-persique (Bahreïn 0,045), en mer Rouge et en mer d'Oman (Socotra 0,06) mais également dans le nord-ouest de l'Australie, en Macaronésie (Canaries, Cap-Vert) et en Basse-Californie (Figure 120B). Les 15 % les plus humides ($REP > 4$, saturé) se situent aux latitudes péripolaires dans l'hémisphère sud (Wellington au Chili 11,4) et nord (Islande 16,7). En comparant les moyennes de grandes régions insulaires, il apparaît que le monde insulaire nusantarien (Indonésie, Philippines, Nouvelle-Guinée et Salomon) est bien plus humide (1,6) que les îles de la Caraïbe (0,89) et de la Méditerranée (0,69). Ces différences reflètent leur position latitudinale et leur géographie. La Nusantarie se situe principalement dans la zone équatoriale et est largement ouverte sur l'océan Indien et le Pacifique alors que la Méditerranée siituée à la limite entre les zones subtropicales et tempérée chaude est un golfe entouré de continents. La Caraïbe, en tant que golfe ouvert sur l'Atlantique dans la zone tropicale, constitue un cas intermédiaire à la fois climatiquement et géographiquement par rapport aux deux autres régions insulaires considérées. Alors que les ensembles nusantariens et caribéens sont assez homogènes régionalement, il n'en va pas de même en Méditerranée avec des contrastes marqués entre des îles perhumides (îles

³³⁸ « Humidity provinces » d'Holdridge. Voir plus loin Figure 121.

³³⁹ La présentation du diagramme dit de Robert Harding Whittaker (écologue et botaniste américain 1920-1980) de cette figure est équivalente au diagramme ternaire d'Holdridge tout en donnant une vision synoptique plus simple de la relation entre températures et précipitations.

ioniennes telle Corfou 1,22), humide (Rhodes 0,82), semi-humide (Malte 0,48 et Cyclades telle Milos 0,4), voire semi-aride (Kerkennah 0,2 et Djerba 0,18). Les îles classées comme polaire ($T < 0$) constituent près du tiers de l'échantillonnage. Dans l'hémisphère nord, on observe une dissymétrie classique entre les parties occidentales et orientales des continents, l'isotherme 0°C atteignant des latitudes proches du cercle polaire (66°N) pour les premières (i.e. en Norvège) alors qu'il ne dépasse pas 52°N pour les secondes. Dans ces régions polaires, une corrélation significative existe entre la température et les précipitations. Entre 0°C et -20°C , les valeurs décroissent régulièrement de 750 mm (Sakhaline) à 100 mm (Ellesmere). Il est cependant possible de distinguer des îles polaires plus humides que d'autres bien qu'ayant la même température moyenne annuelle comme c'est le cas pour Baffin ($T = -13^{\circ}, P = 278$ mm) et Wrangel ($-12,8^{\circ}\text{C}, 152\text{mm}$). La relation entre température et précipitations résulte de la diminution de la capacité hygrométrique en fonction de la température des masses d'air.

Outre la définition des régions ombrothermiques, la méthode de Holdridge fournit une approximation³⁴⁰ sur les biomes associés aux principaux types de climat. Partant des trois valeurs T , P et REP , la dernière étant liée aux deux premières, il est possible de représenter l'espace des variables sous la forme d'un diagramme ternaire (Figure 121A) en lieu et place du graphique précédent où les valeurs de REP sont données sous la forme d'un abaque (voir Figure 119A). Au lieu d'être mise en relation avec des domaines ombrithermiques (humides/arides), le graphique définit des hexagones correspondant chacun à un biome assimilable à une végétation climacique. Par exemple le biome de Rhodes est classé comme étant une forêt broussailleuse assimilable à un maquis méditerranéen. En le classant en fonction des magnitudes de T , P et REP , on obtient un code synthétique (TPREP) :

Code des biomes : TPREP = 100.Code T + 10.Code P + Code REP
soit pour Rhodes : TPREP = 100.7 + 10.3 + 5 = 735 pour forêt broussailleuse

³⁴⁰ "Approximation" en ce cas se réfère au terme "proxy", proxies au pluriel, qui signifie : "Une entité ou une variable utilisée pour modéliser, générer ou proximer des données suppose analogue avec une autre entité ou variable qui s'avère bien plus difficile à établir directement" (adapté du Free Dictionary). Le mot a donc un sens précis différent de celui plutôt négatif d'"approximation". Bien que largement utilisé dans les sciences expérimentales, il ne sera pas utilisé dans le document car il semble rejeté par les sciences qui le sont moins.

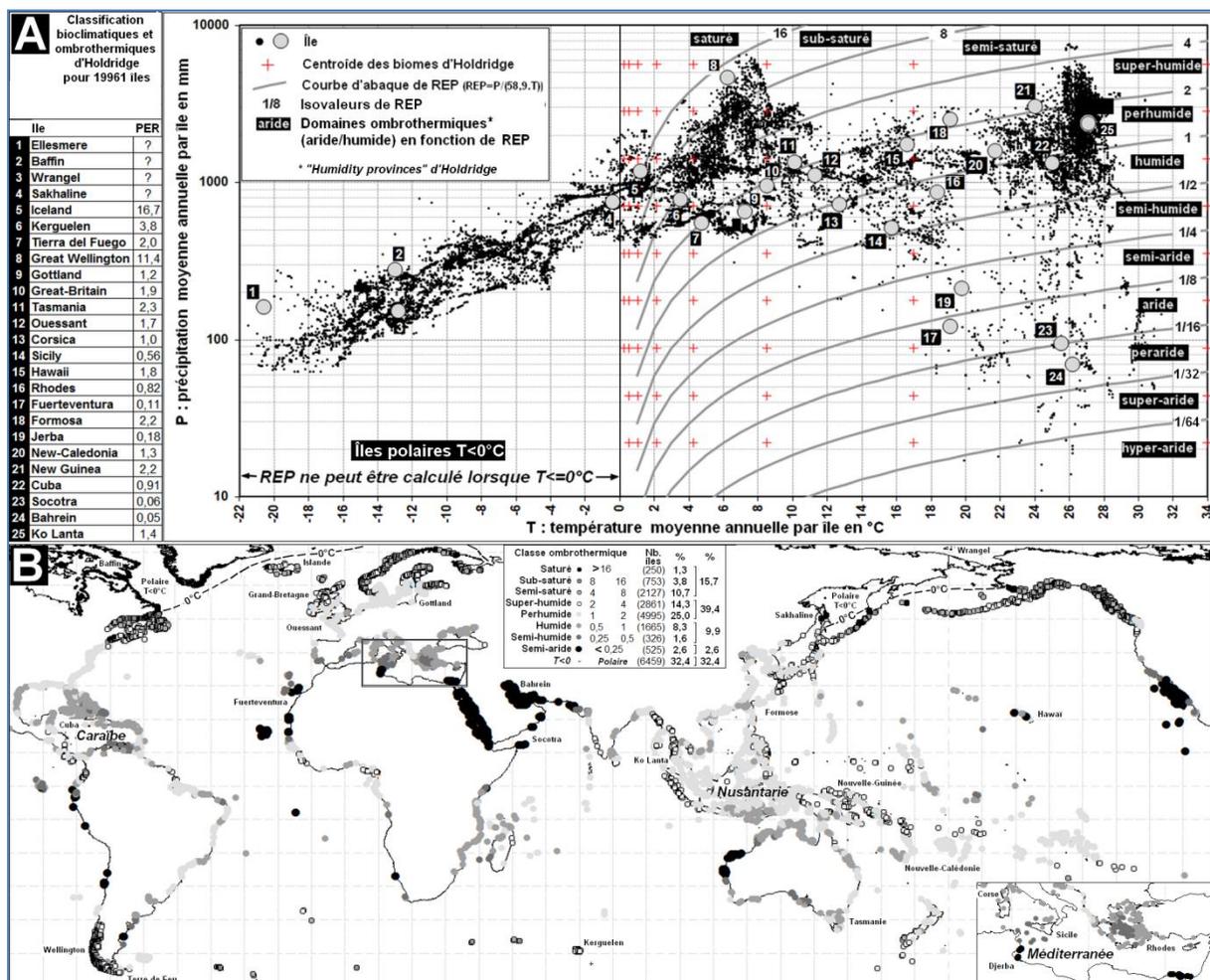


Figure 120 : Bioclimats des îles

(A) En fonction de la température (T), des précipitations (P) et du ratio annuel moyen d'évapotranspiration potentielle (REP) par île pour la période référence 1950-2000.

(B) Classification en fonction des courbes ombrothermiques.

L'évapotranspiration potentielle (EP) est obtenue à partir de T selon l'approximation $EP = 58,9.T$ utilisée dans la méthode de Holdridge. Le ratio REP est égal au rapport entre les précipitations P et l'évapotranspiration potentielle EP tel que $REP = P/EP = P/(58,9.T)$.

Ce code peut être complété en indiquant la position dans l'hexagone du biome qui est subdivisée en sept sous-ensembles codés de 0 à 6 (Figure 121B). Pour Rhodes, le « sous-biome » ou faciès de végétation est de 3 en 1950-2000 si bien que le code complet de cette île sera 735[3]. En procédant de même pour les données 2050 l'augmentation des températures, des précipitations et du ratio d'évapotranspiration se traduira par une aridification et une évolution corrélative du biome de Rhodes vers le faciès 4 (743[4]) indiquant une tendance du couvert végétal à évoluer vers une savane sèche.

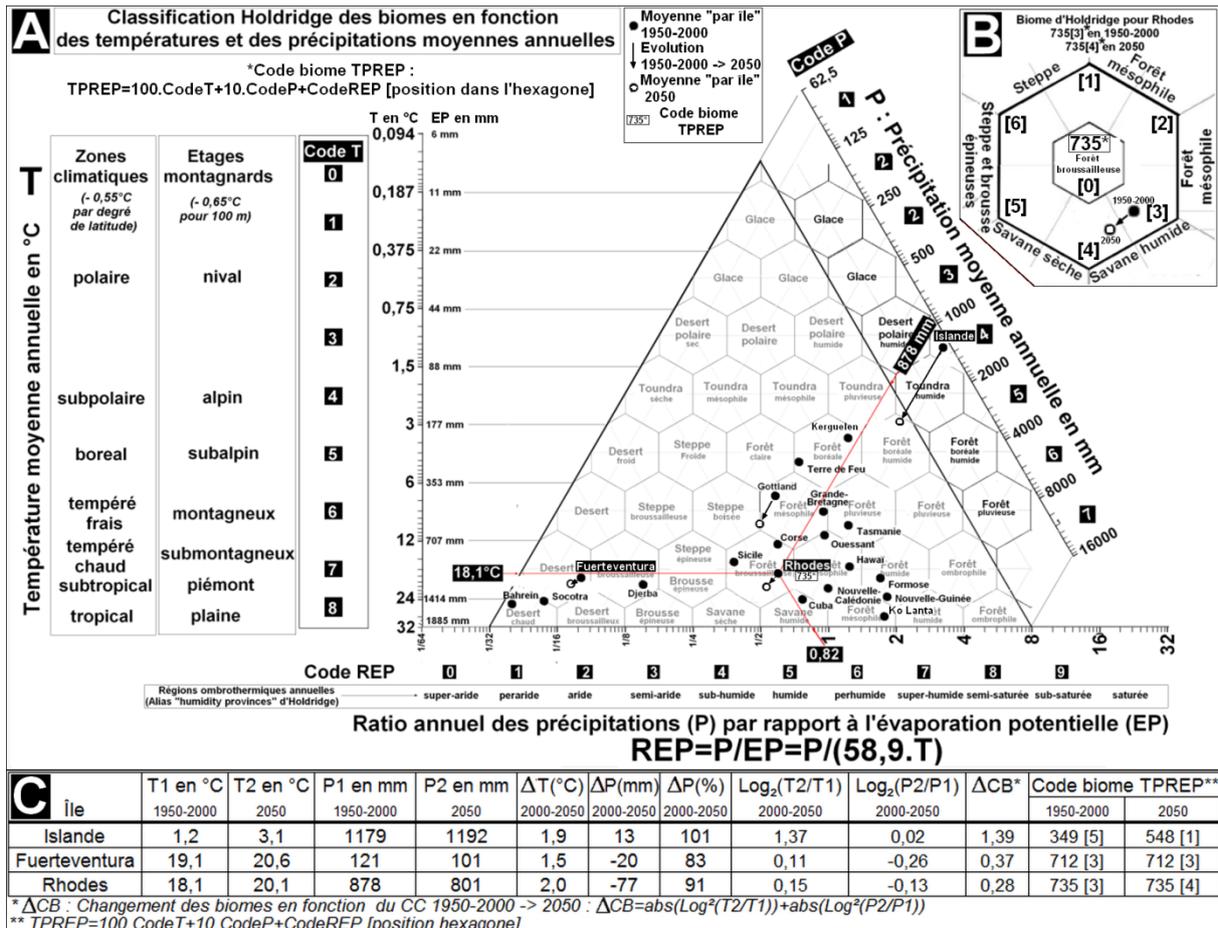


Figure 121 : Diagramme climatique ternaire de Holdridge et classification des biomes.
 (A) Biomes en fonction des températures (T), des précipitations (P) et des ratios d'évapotranspiration potentielle (REP) annuels moyens avec application à quelques îles (dont Rhodes avec 18,1°C, 878 mm et 0,82) pour 1950-2000.
 (B) Évolution du biome moyen de Rhodes (code 735[3]) et 2050 (code 735[4]).
 (C) Évolutions comparées des variables climatiques (T et P), de l'importance du changement climatique et de son impact sur les biomes pour l'Islande, Fuerteventura et Rhodes.

L'étude de cas démontre que la méthode de Holdridge ne se limite pas à fournir une typologie des faciès bioclimatiques mais qu'elle peut être mise à contribution pour établir une « métrique » de l'impact du changement climatique sur les grands écosystèmes. Le mode de représentation des données sous la forme ternaire définit donc implicitement un « espace » bioclimatique qui traduit les hypothèses sous-jacentes de ladite méthode. Les variables T , P et REP sont toutes trois figurées selon une échelle logarithmique en base 2 pour la simple raison que des changements de T (ΔT), de P (ΔP) et donc de REP (ΔREP) auront bien plus de conséquences sur l'évolution des biomes lorsque leurs valeurs sont faibles. Ce choix d'échelle procède du fait que l'activité enzymatique spécifique à la physiologie des plantes est chimiquement liée à la température par une relation de type logarithmique : très faible en dessous de 0°C, elle augmente rapidement pour atteindre un optimum de façon bien plus progressive. Une relation du même type existe entre la pluviométrie et la production de biomasse. Ainsi, les différences de température et de précipitations entre deux périodes d'observation doivent tenir compte de ces paramètres physiologiques et écologiques si elles sont utilisées pour en évaluer l'impact sur les formations végétales. La métrique d'échelle et l'espace des variables, tous deux logarithmiques, du diagramme ternaire reflète donc de façon plus exacte la dynamique des biomes face au changement climatique. Un exemple comparant

l'évolution bioclimatique entre 1950-2000 et 2050 de l'Islande en milieu péripolaire humide, de l'île méditerranéenne de Rhodes et de Fuerteventura de climat tropical semi-aride suffit pour le confirmer (Figure 121C). ces tendances varient entre 1,5 et 2°C pour les températures et - 77 à +13 mm pour les précipitations des trois îles. En utilisant le logarithme de base 2 des valeurs T et P on obtient une mesure du degré de changement des biomes (ΔCB) :

[18] T_1 et T_2 : températures annuelles moyennes en °C pour 1950-2000 et 2050
 P_1 et P_2 : précipitations annuelles moyennes en mm pour 1950-2000 et 2050
 Changement de biomes ΔCB : $\Delta CB = \text{abs}(\text{Log}_2(T_2/T_1)) + \text{abs}(\text{Log}_2(P_2/P_1))$
 Islande $T_1 = 1,2$, $T_2 = 3,1$, $P_1 = 1\ 192$ et $P_2 = 1\ 179$ d'où $\Delta CB = 1,39$
 Fuerteventura $T_1 = 19,1$, $T_2 = 20,6$, $P_1 = 121$ et $P_2 = 101$ d'où $\Delta CB = 0,37$
 Rhodes $T_1 = 18,1$, $T_2 = 20,1$, $P_1 = 878$ et $P_2 = 801$ d'où $\Delta CB = 0,28$

L'unité des indices de changement de biomes correspond à l'empan climatique des biomes définis par des hexagones dans le diagramme ternaire. Les estimations de l'importance de l'évolution des biomes sous l'effet du changement climatique montrent qu'elle est de grande ampleur pour l'Islande ($\Delta CB = 1,39$ soit plus d'un biome) qui passe du biome de désert polaire humide à celui de forêt boréale humide (Voir Figure 121). En revanche, les évolutions s'avèrent bien moindres pour Fuerteventura ($\Delta CB = 0,37$) et Rhodes ($\Delta CB = 0,28$), qui restent dans le même biome qu'auparavant. En termes de métrique générale des changements de biomes, la méthode rend compte de façon assez fidèle du degré d'évolution des écosystèmes sous l'effet du changement climatique. Son application à l'échelle régionale confirme que les évolutions biomiques sont plus marquées dans les hautes latitudes : Nusantarie en zone équatoriale ($\Delta CB = 0,14$), Caraïbe en zone tropicale (0,17), Méditerranée (0,33) et Baltique (0,83). La valeur étant proche de 1 pour la « Petite Méditerranée du Nord », le biome de ces îles devrait changer comme par exemple celui de Gotland passant de forêt mésophile à steppe boisée.

À ne considérer que les données annuelles à l'échelle de l'archipel monde, les modifications des bioclimats ne paraissent sensibles qu'aux hautes latitudes de l'hémisphère nord. Ainsi l'augmentation des températures prévue pour l'ensemble des îles de la Méditerranée se limiterait à + 2,4°C passant de 16 à 18,4°C tandis que le déficit pluviométrique serait de - 36 mm, évoluant de 624 à 588 mm, soit un déficit moyen de 6 %. Pourtant, cette évolution n'en a pas moins des conséquences sur la végétation et plus encore sur les ressources en eau qui sont un facteur limitant et déterminant pour les populations et l'économie des milieux insulaires méditerranéens. Tous les secteurs d'activité sont concernés : l'usage domestique et industriel, l'agriculture, mais aussi l'activité touristique qui y joue un rôle majeur notamment sur les grandes îles déjà depuis plusieurs décennies :

« Le tourisme est l'activité économique principale de Chypre, Malte, les îles Baléares et la Sicile. La Méditerranée est la plus importante destination touristique dans le monde avec 200 millions de visiteurs par an, 30% des arrivées internationales et le tiers des revenus du secteur. Actuellement, le tourisme est la principale source de devise de la région méditerranéenne et représente 7% du PIB dont 24% pour Malte et 22% pour Chypre. Environ 350 millions de personnes devraient s'y rendre en 2025. Un tel afflux touristique dont 80% pendant les sept mois les plus secs de l'année a un fort impact sur les ressources en eau des îles. » (Hopkins, 2002, p. 16)

À cette pression de la demande s'ajoutent des incertitudes sur l'évolution de la ressource qui se pose en des termes particuliers du fait de la difficulté et du coût de son externalisation:

« Les scénarii prospectifs pour les ressources en eau en région méditerranéenne suggèrent un déclin progressif du débit moyen déjà observable sur plusieurs rivières depuis les années 80, notamment une diminution de la fréquence et la magnitude des crues due à : 1) l'extension des forêts [déprise agricole] ; 2) la modification du régime des rivières principales, y compris une réduction précoce des hautes eaux provenant de la fonte des neiges au printemps, une intensification des étiages estivaux et une plus forte irrégularité des crues hivernales ; 3) la réduction des apports dans les réservoirs impliquant une diminution des adductions venant des retenues de barrage pour les besoins de l'irrigation et des milieux urbains. » (García-Ruiza & al., 2011)

Par analogie avec le fonctionnement de la végétation, il est possible de parler d'un « stress hydrique » estival pour les îles touristiques de la Méditerranée, d'autant que l'adéquation entre les ressources en eau et les besoins prend un tour particulier dans les régions insulaires. En cas de déficit structurel ou conjoncturel, l'adduction d'eau depuis les régions continentales, à condition qu'elles soient proches, entraîne un surcoût qui peut être catastrophique pour l'agriculture et pour le tourisme. Il en résulte que, plus qu'ailleurs, une île doit exploiter le mieux possible ses ressources propres, que celles-ci soient souterraines ou de surface. En cela, les îles méditerranéennes se révèlent être un défi et un laboratoire de la Gestion intégrée des ressources en eau³⁴¹ : importance des besoins pendant la saison estivale, limitations de la ressource elle-même à l'échelle de petits territoires et tendance à l'aridification sous l'effet du changement climatique, surcoût en cas « d'externalisation » de la ressource.

Bien que le domaine méditerranéen constitue une région bioclimatique homogène, des contrastes régionaux du changement climatique apparaissent entre ses rives nord et sud aussi bien qu'entre ses parties occidentale et orientale. L'évolution des températures reste comprise entre + 1,9°C en Méditerranée occidentale, +2,7°C sur l'île de Djerba et +2,8°C dans le nord de la mer Égée (Figure 122A) où un gradient du même ordre s'observe entre la partie nord (Thassos +2,8°C), les îles du sud, dont la Crète (+2,1°C) et Rhodes (+2°C). Un examen plus approfondi montrerait que plus une île se trouve éloignée des terres continentales, plus son évolution thermique sera modérée du fait de l'environnement marin, ce qui rappelle à l'échelle régionale ce qui avait déjà été noté à l'échelle des deux hémisphères terrestres. Pour la Méditerranée occidentale, y compris l'Adriatique, les pluies restent stables alors que dans le bassin oriental le déficit varie entre -48 et -77 mm/an, ce qui en valeur relative représente 5 à 10 % du total annuel (Figure 122B). La Sicile, Malte et Djerba présentent une décroissance intermédiaire entre les deux cas précédents avec respectivement -38, -36 et -18 mm/an. Pour l'île tunisienne de Djerba déjà semi-aride avec seulement 193 mm en interannuel, cette diminution de 10 % n'est pas sans conséquence même si son système karstique permet un meilleur stockage des rares averses dans les aquifères et une temporisation des écoulements des sources du fait de la circulation vadose. Cela s'applique aux karsts de Malte et de sa

³⁴¹ La GIRE devient de plus en plus pratiquée du fait des enjeux multiples autour de l'exploitation de la ressource (En Anglais, *Integrated Water Resource Management IWRM*).

voisine Gozo, qui bénéficie cependant d'une pluviométrie plus abondante avec 590 mm/an. S'agissant de bilan hydrique et hydrologique, il faut distinguer les îles méditerranéennes montagneuses comportant peu de formations calcaires impliquant des écoulements de surface importants de celles de moindre relief ayant un fonctionnement karstique dominant qui se traduit par une vidange lente des nappes des aquifères profonds. Ces deux types de fonctionnement hydrologique restent cependant impactés par le changement climatique et la montée du niveau marin selon des modalités spécifiques à ces deux milieux³⁴².

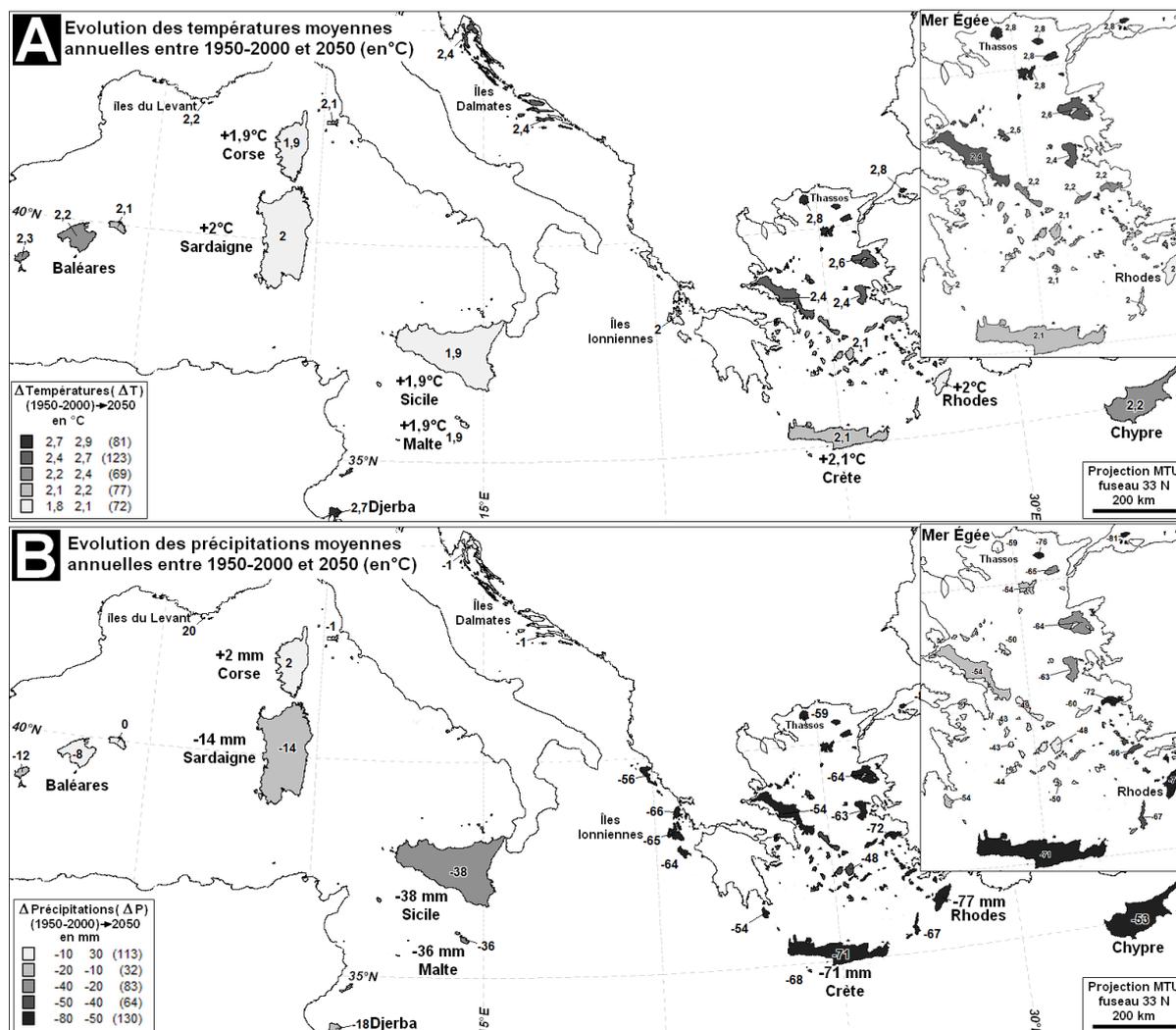


Figure 122: Évolution des températures et des précipitations moyennes annuelles des îles méditerranéennes entre la période 1950-2000 et 2050.

L'île de Rhodes au sud-est de la mer Égée peut être considérée comme représentative des milieux insulaires méditerranéens à la fois par sa superficie de 1 413 km² intermédiaire entre celles des grandes (~ 10 000 km²) et petites îles, et de par sa topographie ne dépassant guère 1000 mètres dominant des plateaux et des plaines collinaires (Figure 123A). Comme d'autres îles grecques, l'économie de Rhodes dépend du tourisme et accueille un million de

³⁴² Concernant les karsts méditerranéens, voir la vidéo de Michel Bakalowicz sur la Médiathèque de l'IRD. <https://www.youtube.com/watch?v=IFGntOVpJVl>

visiteurs par an pour une durée de séjour moyenne de 10 jours³⁴³. Sachant que la consommation d'eau est de 0,5 m³/jour/touriste³⁴⁴, les besoins s'élèvent donc à 5 Mm³/an pour l'essentiel pendant la saison estivale. À cela s'ajoute les besoins de la population de l'île estimés à 9 Mm³/an. Cette situation inquiète les spécialistes du secteur en raison de la pression sur les ressources en eau de l'île, qui sont à la limite de sa *carrying capacity*. (Kyriakou, Sourianos, & Vagiona, 2011). À cette situation précaire s'ajoute une tendance à l'aridification due à la baisse des précipitations ($\Delta P_{\%} = - 8,8 \%$, Figure 123C et F), l'augmentation des températures ($\Delta DT = + 2^{\circ}\text{C}$, Figure 123B et E) et de l'évapotranspiration potentielle ($\Delta EP = \Delta DT^* 58,9 \text{ mm}$). À ce tableau déjà inquiétant s'ajoute une déprise agricole amorcée dès le milieu du xx^e siècle qui se traduit progressivement par une reforestation des terres agricoles par la végétation climacique de type maquis (Figure 123D), laquelle implique un accroissement de l'évapotranspiration et un amortissement des crues.

Ces diverses tendances se traduisent par un net étagement des bioclimats et des biomes : les isothermes devraient s'élever de 400 mètres, les isohyètes s'abaissant de 800 mètres, de sorte que les biomes de forêts mésophiles spécifiques aux plus hautes montagnes de l'île seraient appelés à disparaître (Figure 124).

La tendance à l'aridification observée sur l'ensemble de Rhodes se retrouve sur le principal bassin versant de l'île, lequel alimente le seul lac de barrage, où la retenue de Fragmatos Gadoura joue un rôle déterminant dans l'approvisionnement en eau de la ville de Rhodes et de l'ensemble de la côte est où se trouvent la majorité des installations touristiques. Cette situation montre que les aménageurs et les pouvoirs publics ont pris la décision de dépendre des ressources en eau de surface alors que ce sont elles qui sont le plus sensibles au changement climatique. Ainsi, l'approvisionnement en eau est essentiellement basé sur les ressources provenant d'une retenue en amont d'un barrage construit sur le plus grand bassin versant de l'île appelé Gadoura. Ce choix implique une dépendance vis-à-vis des écoulements de surface qui sont non seulement sujets à une forte variabilité interannuelle mais aussi particulièrement sensibles à l'évolution du climat. Le lac de barrage de Fragmatos Gadoura a été construit en 2007 avec une capacité de 67,5 Mm³ pour une surface de 4,2 km². La surface du bassin en amont est de 151 km². L'estimation des experts table sur un apport hivernal de 90 Mm³, ce qui fait un rapport de 75 % entre les écoulements amont et la capacité de la retenue. L'analyse des modifications du bilan hydrique et hydrologique d'un bassin méditerranéen sous l'effet du changement climatique suppose une étude de l'évolution saisonnière et donc une méthode plus adaptée que celles de Holdridge et de Whittaker. Nous disposons pour cela des diagrammes ombrothermiques de Gaussen (1960), qui ont été spécifiquement conçus pour cette zone climatique en utilisant des données mensuelles.

³⁴³ Jean Scol, 2003 : « Développement touristique et dynamiques démographiques en Grèce : l'exemple du département insulaire du Dodécanèse ». *Espace, populations, sociétés*, numéro thématique : *Tourisme et dynamiques démographiques*, 2003, (2), pp. 277-290.

³⁴⁴ En page 16 du document EUROSTAT, 2016, dans MEDSTAT II: "étude pilote "eau et tourisme"", (Eurostat methodology and working paper, Edition 2009 EUROSTAT, Commission Européenne, 36 pages).

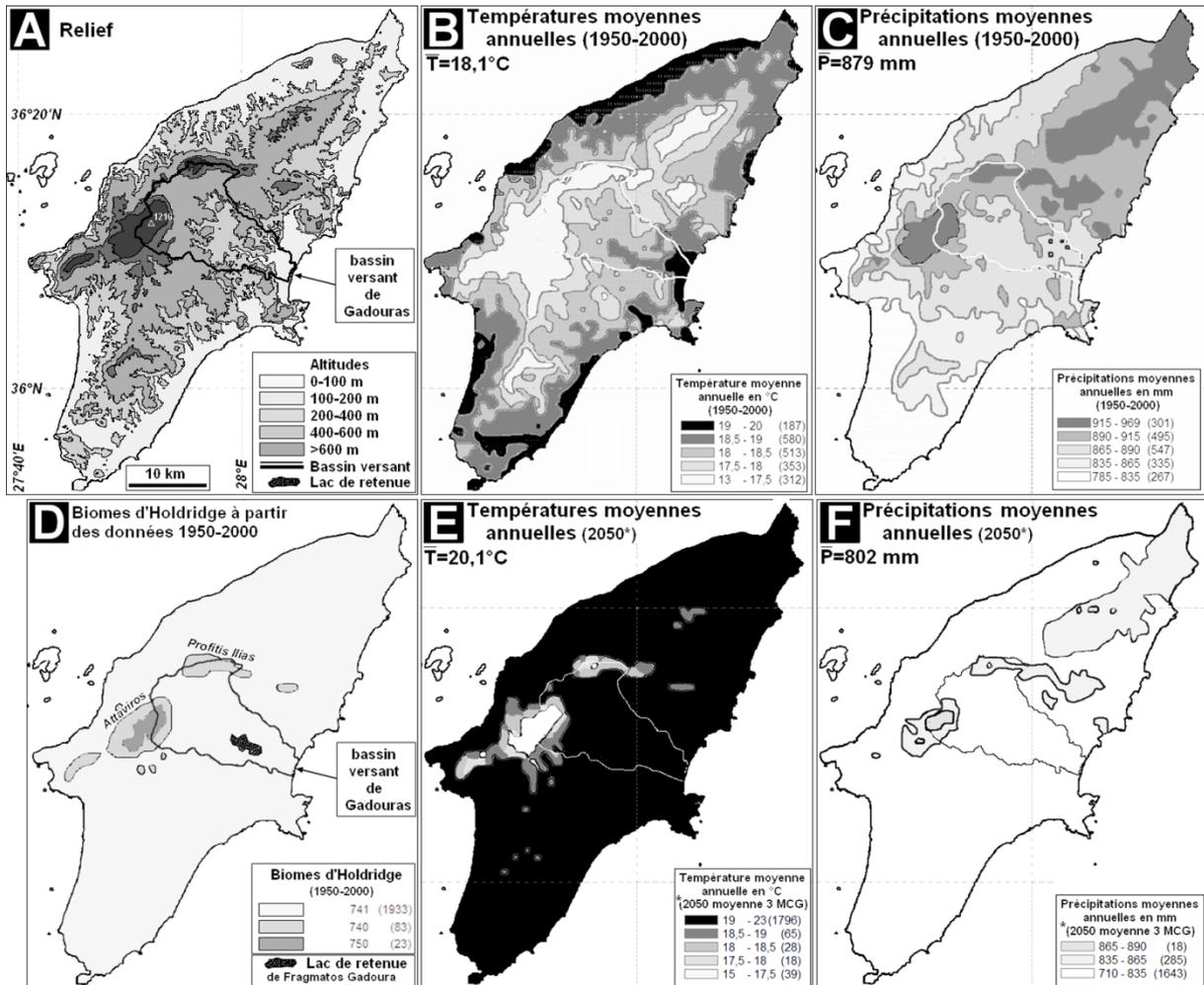


Figure 123 : Île de Rhodes (A) Relief et bassins versants. (B) Températures 1950-2000. (C) Précipitations 1950-2000. (D) Biomes de Holdridge 1950-2000. (E) Températures 2050. (F) Précipitations 2050.

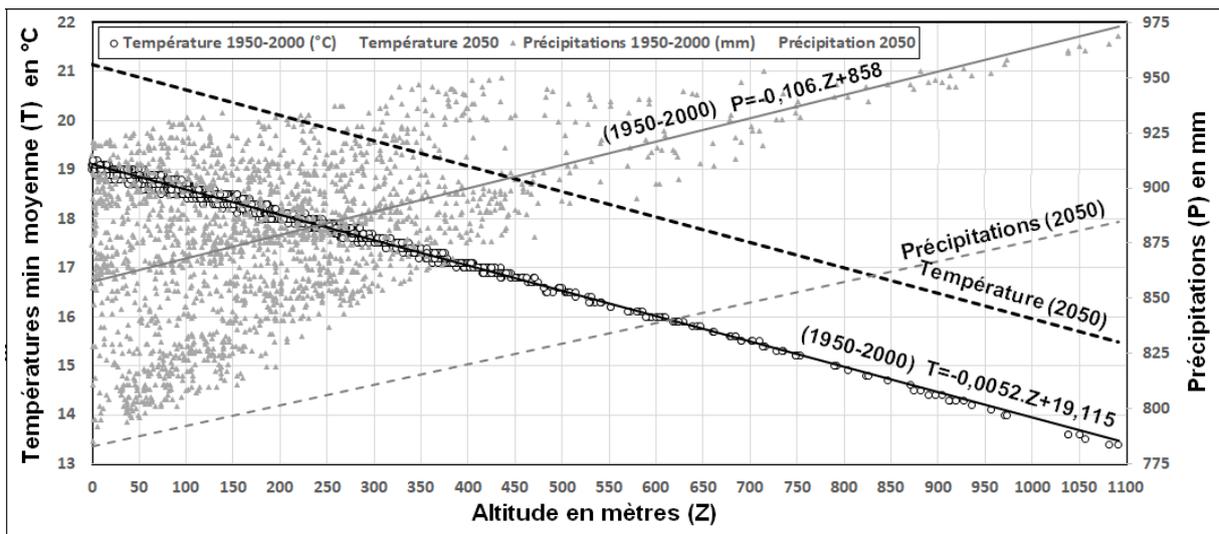


Figure 124 : Évolution des températures et des précipitations en fonction de l'altitude sur l'île de Rhodes entre les périodes 1950-2000 et 2050.

La Figure 125A, permet de comparer les diagrammes saisonniers du bassin de Gadoura entre la période référence 1950-2000 et le scénario moyen établi à partir de 3 MCG pour 2050 en utilisant les données mensuelles de WORLDCLIM. Sans détailler la méthode de Gaussen, son exploitation permet de dégager des tendances évolutives quant aux différentes composantes du fonctionnement hydrologique alimentant le lac de Fragmatos Gadoura :

- L'excédent pluviométrique hivernal (*pour $Pm_i > 2.Tm_i$, $Eh = \sum [Pm_i - 2.Tm_i]$ valeurs mensuelles des mois i) peut être assimilé à la lame d'eau contribuant à la recharge des nappes phréatiques et des aquifères par infiltration et aux écoulements de surface responsables du débit des rivières et du remplissage de la retenue du barrage. Il n'est pas possible de distinguer la part des recharges souterraines de la fraction écoulée. L'excédent hivernal passe de 664 mm à 574 mm entre 2000 et 2050 soit un déficit de 90 mm.*
- Le déficit estival (*pour $Pm_i < 2.Tm_i$, $De = \sum [2.Tm_i - Pm_i]$) rend compte de la réduction des écoulements de surface se traduisant par des étiages de plus en plus marqués au cours de l'été et par l'évaporation des nappes phréatiques et des eaux de surface notamment dans les lacs et les rivières. Le déficit estival évolue de - 191 à - 230 mm.*
- La durée de la saison estivale pendant laquelle $Pm_i < 2.Tm_i$ est de 167 jours en 2000 pour atteindre 176 jours en 2050.
- L'évapotranspiration potentielle annuelle est estimée selon l'hypothèse de Gaussen à partir des valeurs mensuelles ($EP = \sum EPm_i = \sum 2.Tm_i$). Cette valeur intègre l'évaporation physique à partir des sols et des nappes d'eau libres et l'évapotranspiration des plantes, qui peut ne pas être optimale (sécheresse, stress hydrique) pendant les périodes sèches. Du fait de l'augmentation des températures de 2,08°C, la valeur maximale d'évapotranspiration potentielle augmenterait de 50 mm. Avec 422 mm en 2000 et 472 mm en 2050, le ratio d'évapotranspiration potentielle (REP) s'accroît donc de plus de 10 %.

À titre de comparaison, l'estimation de Holdridge pour les données annuelles applicables à l'échelle mondiale est qu'un degré de température équivaut à 58,9 mm/an soit 4,9 mm/mois pour l'évapotranspiration potentielle (EP) alors que celle de Gaussen pour les données mensuelles de la zone méditerranéenne est de 2 mm/mois pour cette même valeur d'EP. Cette différence procède en partie du fait que la méthode de Holdridge se limite à des données annuelles pour définir tous les biomes terrestres alors que celle de Gaussen utilise des méthodes d'analyse des données mensuelles adaptées à la physiologie des plantes méditerranéennes et à la dynamique saisonnière de cette région (Gaussen, 1960). Dans les deux cas, il ne s'agit que d'hypothèses générales sur la relation entre la température atmosphérique et les processus évapotranspiratoires, qui dépendent de bien d'autres facteurs, géologiques, pédologiques, topographiques, écologiques et climatologiques. Elles ne sont qu'une approximation pratique d'une réalité hydrologique bien plus complexe.

Le bilan hydrique des courbes ombrothermiques du bassin de la retenue de Fragmatos Gadoura (Rhodes) indique un déficit de 80 mm (ΔP) pour les pluies et une augmentation de l'évapotranspiration de 50 mm (ΔEP). Le bilan hydrologique du bassin doit prendre en compte la combinaison des deux facteurs (- 150 mm) pour évaluer la diminution des écoulements en fonction du modèle pluies-débits calibré sur des bassins de même taille du bassin méditerranéen (Hreiche, Najem, & Bocquillon, 2007). Une telle évolution du bilan hydrologique entraînerait une réduction de 24 % des apports en eaux de la retenue (Figure 125B). Qui plus

est, il faut tenir compte de la variabilité interannuelle des pluies pouvant se traduire par plusieurs années déficitaires par rapport à la moyenne prévue. Sans insister sur les scénarios extrêmes et leurs conséquences sur le remplissage de la retenue, une étude prospective sur la couverture des besoins en eau de l'ensemble de l'île de Rhodes, estimés à 26,5 Mm³ en 2036, prévoit que 68 % seront assurés par la retenue de Fragmatos Gadoura (Figure 125C).

Ce chiffre paraît sous-estimé si l'on se rappelle que les besoins actuels pour l'utilisation domestique de la population locale et ceux du tourisme de masse estival sont de l'ordre de 14 Mm³/an. En tenant compte du facteur démographique, de l'augmentation possible et souhaitée de l'activité touristique y compris hors saison et d'une tendance à l'augmentation des consommations d'eau par les ménages, ce dernier chiffre ne peut être qu'une hypothèse basse. Il est probable pour ne pas dire certain que l'île de Rhodes, à l'instar de bien d'autres îles méditerranéennes, risque de se trouver à plus ou moins long terme en situation d'« alerte à pénurie d'eau » voire de « pénurie chronique d'eau » si des solutions alternatives économiquement et écologiquement réalistes ne sont pas intégrées dans le schéma directeur de gestion de la ressource (Engelman & Leroy, 1993). En dessous du premier seuil, les pénuries sont occasionnelles et locales alors qu'en dessous du second seuil, la pénurie est quasi générale et permanente (Brennan, 1997), ce qui ne peut que fragiliser encore davantage le modèle économique dont dépendent les îles méditerranéennes mais également celles de la Caraïbe. Toute autre option aurait un coût non seulement financier mais encore environnemental et même politique si, par exemple, un projet d'adduction d'eau depuis la côte turque était envisagé comme cela a déjà été réalisé depuis octobre 2015 entre l'Anatolie et la république de Chypre du Nord. Une autre alternative, satisfaisante écologiquement, serait le recyclage de l'eau ce qui serait envisageable à un coût raisonnable pour les agglomérations principale (la ville de Rhodes, Lindos) mais le serait moins pour les nombreuses stations touristiques situées sur la côte.

Le fonctionnement du barrage de Fragmatos Gadoura depuis sa construction en 2007 (Photo 5) peut être indicatif de l'effet de la variabilité interannuelle qui se combine avec les tendances liées au changement climatique. Après une longue période de pluie, la retenue a été remplie pour la première fois pendant l'hiver 2011³⁴⁵. Lors d'une visite de terrain faite en septembre 2015, il semble que le réservoir soit plein sans que l'on connaisse le volume prélevé pour l'adduction d'eau.

³⁴⁵ Communication personnelle de Maria Corsini-Foka, Hellenic Centre for Marine Research, Institute of Oceanography, Hydrobiological Station of Rhodes, Cos Street, GR 85100 Rhodes-Greece.

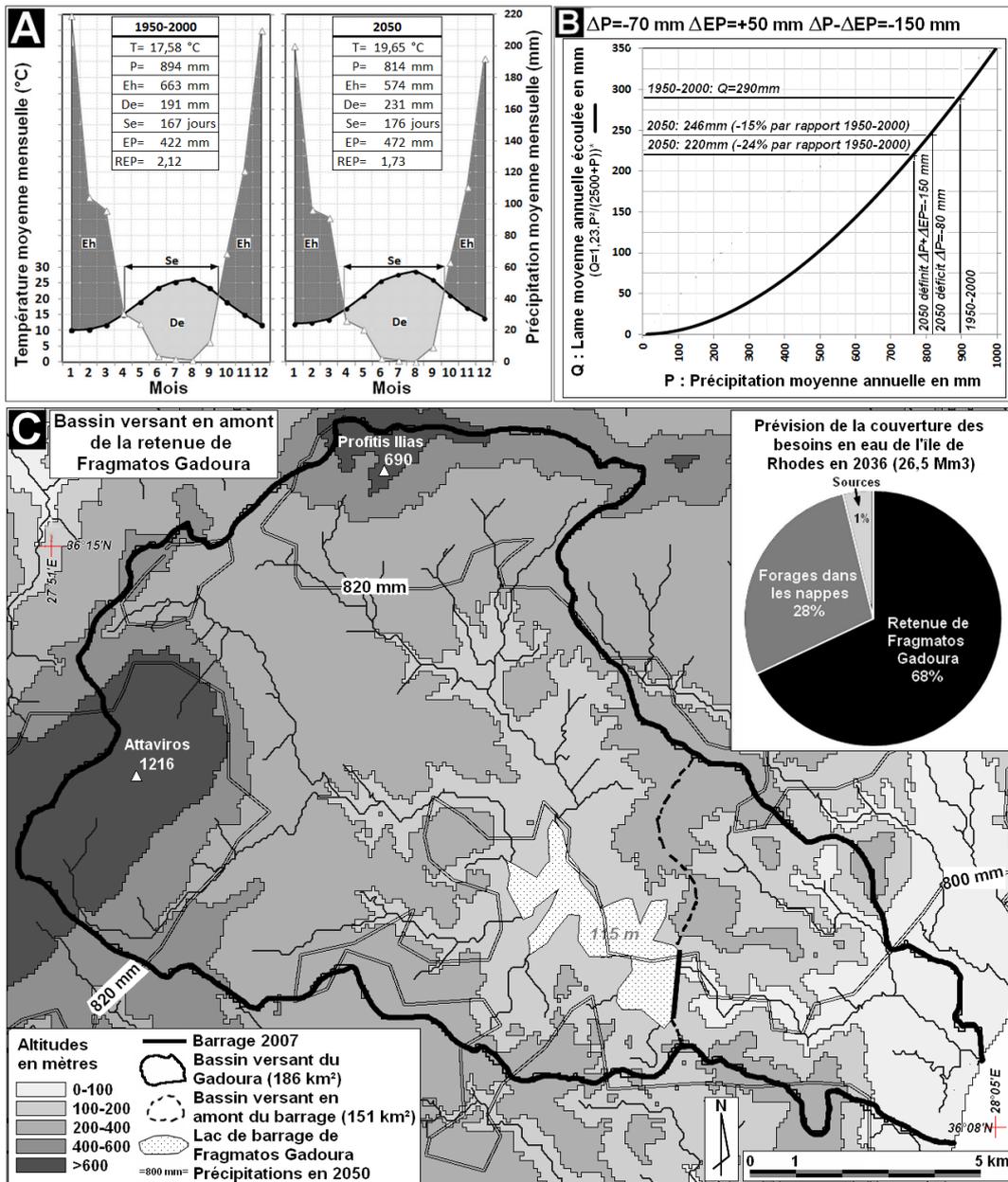


Figure 125 : Bassin versant de Gadoura en amont du barrage.

- (A) Courbes ombrothermiques et bilans hydriques pour les périodes 1950-2000 et 2050.
- (B) Bilan hydrologique des écoulements de surface en fonction du scénario d'évolution du climat entre 1950-2000 et 2050 basé sur le modèle pluies-débits MEDOR calibré sur des bassins méditerranéens (Hreiche, Najem, & Bocquillon, 2007).
- (C) Bassin du lac de barrage de Fragmatos Gadoura et prévision des besoins en eau de l'île de Rhodes en 2036, dont 68 % sont assurés par la retenue (Kyriakou, Sourianos, & Vagiona, 2011).



Photo 5 : nouvelle île suite au remplissage d'un lac de barrage

Concernant l'évolution des précipitations sur la période de référence 1955-2020, trois éléments sont à retenir à partir des observations à la station météorologique de l'aéroport de Rhodes (Figure 126) :

- La variabilité interannuelle des pluies varie entre 294 mm (2016) et 1112 mm (1984) autour d'une moyenne de 670 mm/an ;
- Une tendance générale à la diminution des précipitations qui passent de 750 mm en 1955 à 600 mm en 2020 ;
- Une oscillation des pluies moyennes décennales avec une amplitude de l'ordre de 100 mm.

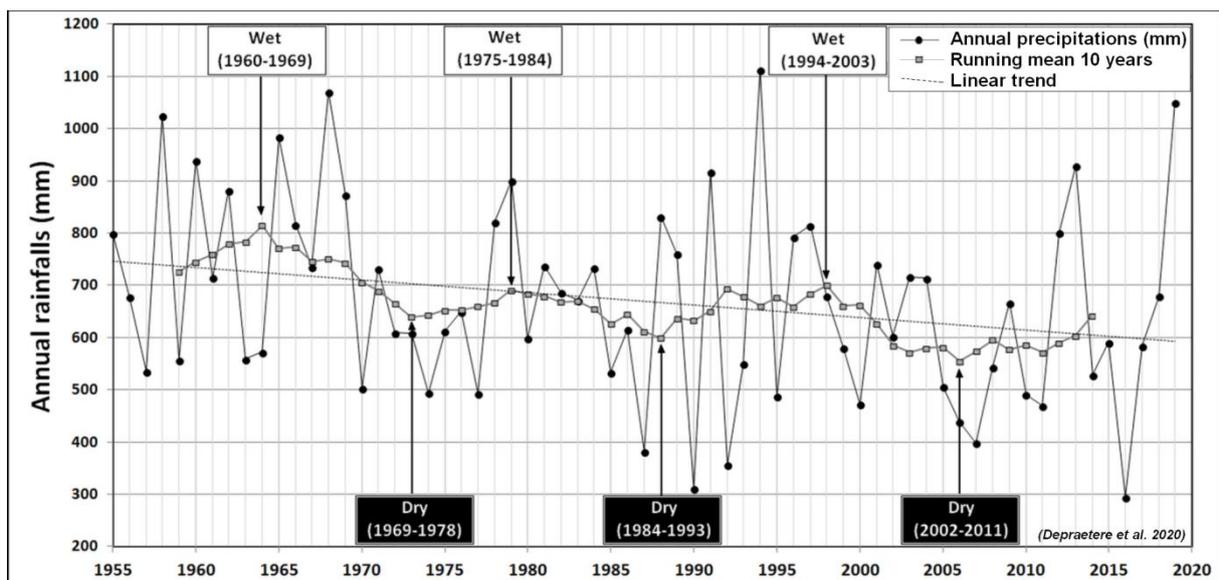


Figure 126 : Variabilité interannuelle des précipitations à la station de l'aéroport de Rhodes. (Depraetere C. , Soulis, Tsesmelis, Avgoustidis, & Spilanis, 2020).

En utilisant le modèle hydrologique de la Figure 125B et en faisant l'hypothèse qu'une variabilité du même ordre s'applique au bassin de Gadoura, les années déficitaires se traduiraient par une baisse considérable de la lame écoulée, qui ne serait plus que de 70 mm au lieu de la moyenne de 290 mm. Cela signifie que les apports dans la retenue, de 10 Mm³, deviendraient bien inférieurs aux 40,5 Mm³ estimés selon les moyennes interannuelles 1950-2000, et supérieurs aux 18 Mm³ prévus du prélèvement pour l'adduction d'eau dans les villes et les stations touristiques. De plus, les années déficitaires sont souvent associées à des températures plus élevées se traduisant par une augmentation de l'évapotranspiration potentielle. En tenant compte de tous les éléments du bilan hydrologique, la valeur de 10 Mm³ est sans doute surestimée. Les conséquences d'un tel scénario, s'il ne se produit que pendant une seule année, peuvent être amorties si les années précédentes ont été conformes à la moyenne ou excédentaires. En revanche, une succession d'années sèches, comme en 2006 et 2007, ne pourrait que conduire à une pénurie d'eau avec des conséquences sensibles sur la saison touristique estivale. L'exemple de Rhodes et ne se limite pas à cette île mais à l'ensemble du domaine insulaire méditerranéen, voire à d'autres régions comme la Caraïbe, connaissant une forte pression sur les ressources en eau, entre autres du fait d'un tourisme de masse.

Les effets du changement climatique combinés à la fluctuation interannuelle naturelle des variables climatiques se traduit en des termes spécifiques aux îles du fait de la difficulté à y externaliser l'approvisionnement dans certains secteurs clés de l'économie comme les ressources en eau, mais aussi dans le domaine de l'énergie notamment électrique. Les milieux insulaires subissent donc des contraintes fortes, à la fois géographiques et environnementales, qui nécessitent une gestion rigoureuse des besoins et des approvisionnements. En cela, les îles sont conformes à leurs vocations reconnues de « laboratoire » des enjeux actuels mais aussi de « modèles réduits » permettant de tester des relations entre l'homme et son milieu visant à mieux gérer les ressources, optimiser les usages et favoriser une consommation locale.

Pour être complet, cet aperçu sur les spécificités du changement climatique et ses implications en régions insulaires suppose que soit traité le sujet des conséquences de la montée du niveau marin. Les effets peuvent être dramatiques sur les ressources en eau du simple fait de la réduction des surfaces insulaires et de l'ennuiement des plaines côtières agricoles. L'importance des grandes rivières dépend du compartimentage de la surface en bassins versants. Dans le cas de Socotra, le plus grand bassin du Zahr représente le tiers de l'île (Voir Figure 53A), alors que la vallée d'Everghétoulas ne représente que 6 % de la surface totale de l'île de Lesbos (Voir Figure 54C). Quant au Gadoura (Rhodes), il collecte 10 % des précipitations (Voir Figure 123 et Figure 125). Plus les îles sont petites, plus les écoulements de leurs bassins sont faibles et irréguliers voire inexistantes, du fait de la faiblesse des réserves en eau des sols et de quelques nappes phréatiques peu étendues. Le cas de l'îlot de 25 hectares de Bandrélé (Voir Figure 33C) fait figure d'exception puisqu'on y observe un bassin versant bien délimité mais qui provient davantage de l'effondrement partiel de sa caldeira que du creusement d'une vallée par les ruissellements sur un bassin de moins de 10 hectares. Dans les îles basses, les écoulements de surface peuvent être inexistantes, les ressources se réduisant à quelques étangs associés à la nappe souterraine ou perchés sur la couche argileuse d'un bas-fond. Tel est le cas des îles de Ré et d'Oléron dont une large partie est formée de marais saumâtres utilisés pour l'ostréiculture. Sous le couvert de nombreuses alluvions frandriennes, leur socle se compose de formations marno-calcaires et argileuses légèrement plissées ne permettant pas l'existence d'importantes réserves d'eau et expliquant les puits creusés au niveau de quelques nappes locales. À ce jour, l'intégralité des besoins

sont assurés par des aqueducs venant du continent, comme c'était le cas pour la péninsule des Tigres jusqu'en 1854 (Voir Figure 91).

Considérons l'effet de la transgression flandrienne sur l'île d'Oléron telle que décrite dans la notice de sa carte géologique :

"La submersion des côtes les plus basses [due à la transgression flandrienne] a transformé le promontoire d'Oléron en île et a entraîné la création d'un rivage très découpé : les caps correspondent aux anciens points hauts et les golfes, aux vallées et dépressions naturelles. L'action conjuguée des courants marins côtiers et des rivières est responsable du colmatage rapide des golfes par des argiles, limons et sables fins. Depuis environ 2000 ans, un équilibre relatif entre les mouvements verticaux terrestres et marins semble atteint, mais le comblement des anses et l'érosion des caps se poursuivent activement." (BRGM, 1993)

Les impacts côtiers d'une transgression marine future sur ses littoraux ainsi que ceux de l'île de Ré (Figure 127A) et de la côte languedocienne au droit de l'étang de Thau (Figure 128A) ; pour ce faire, un MNT lidar haute résolution sera mis à contribution³⁴⁶ et selon une hypothèse de montée du Niveau moyen des mer de 8 mètres du fait de la fonte de l'inlandsis groenlandais et de la dilatation des eaux océaniques devenues plus chaudes. Sur le littoral charentais déjà affecté par une érosion en cours de la côte, la transgression provoquerait un ennoisement des plaines côtières et l'apparition de nombreux îlots issus de la fragmentation de l'île d'Oléron (Figure 127B) alors que l'île de Ré verrait sa superficie passer de 84 à 25 km² (Figure 127C). Une des conséquences serait la disparition de tous les marais propices à l'ostréiculture. En supposant que des populations continuent d'occuper ces terres ennoyées, l'adduction d'eau depuis le continent deviendrait plus difficile et coûteuse.

Le cordon dunaire séparant le golfe du Lion de l'étang de Thau entre les deux hautes collines des monts Saint-Loup et Saint-Clair se trouve à fleur d'eau. Une montée ne serait-ce que de deux mètres du niveau marin suffirait à les submerger (Figure 128). À plus forte, une transgression marine de huit mètres bouleverserait totalement le trait de côte et se traduirait par l'apparition d'une baie en lieu et place de l'étang de Thau en faisant disparaître les activités conchylicoles et apparaître de deux îles correspondant aux monts Saint-Clair et Saint-Loup. Ces deux néo-îles retrouveraient ainsi l'état insulaire qu'elles devaient avoir à la fin de la transgression flandrienne vers 7000 BP avant que le colmatage des alluvionnements fluvio-marins provenant du Rhône et de l'Hérault ne vienne combler les isthmes et les baies qui les séparaient du mainland languedocien. Toutefois la formation du « lido » (cordon alluvial) entre les deux montagnettes a dû être assez rapide puisque pendant la période historique l'étang de Thau ne communiquait déjà plus avec la mer que par quelques graus et pertuis (Audouin, 1962, p. 9). Alors que les autres lagunes ont été largement comblées, la persistance et la profondeur moyenne assez importante de dix mètres du vaste étang de Thau résulte de sa position synclinale, dont le pendant anticlinal est constitué par la montagne de la Gardiole. En envisageant le scénario catastrophe d'une fonte totale de la cryosphère terrestre et d'une transgression de soixante-dix mètres environ, l'ensemble des îles charentaises ne seraient plus que des hauts-fonds sous-marins, alors que les deux petits reliefs de Saint-Loup et de Saint-Clair se maintiendraient sous forme d'îlots très distants de la côte du mainland.

³⁴⁶ Le MNT Litto3D de l'IGN et du SHOM est disponible gratuitement sur toutes les côtes françaises. Sa résolution spatiale est de 1 mètre avec des latitudes exprimées en cm.

Quelques mots s'imposent sur la situation critique dans laquelle se trouvent les îles à peine émergentes, notamment les atolls pour ce qui est de leurs ressources en eau. Plusieurs facteurs concourent à les précariser :

- Modification du bilan hydrique avec baisse des précipitations et augmentation de l'évapotranspiration sous l'effet du réchauffement climatique ;
- Surexploitation de la ressource souterraine du fait de l'absence d'eau de surface ;
- Pollution venant de l'indigence des mesures d'assainissement, souvent jugées non prioritaires par rapport à l'urgence des besoins et à leur coût au moins équivalent à ceux de l'adduction ;
- Risque d'intrusions de biseaux salés dues à la pression des eaux marines sur la lentille d'eau flottant sur elles (Depraetere & Morell, 2009, p. 421) ;
- Quand bien même une politique de gestion intégrée des ressources en eau serait instituée, la montée du NMM ne peut que réduire voire faire totalement disparaître les lentilles d'eau douce.

Reste la solution de l'aqueduc, pour peu que le continent soit proche comme c'est le cas pour Oléron. Les autres solutions, telles que le transport par barge ou la désalinisation de l'eau de mer, sont non seulement d'un coût souvent hors de portée des micro-États et du revenu modeste des populations locales mais elles auraient aussi un impact carbone important. Or, la ressource est primordiale pour les besoins domestiques, fussent-ils modestes par rapport aux standards occidentaux, mais aussi pour des secteurs clés de l'économie comme le tourisme³⁴⁷. Cette situation à la limite de la « crise à pénurie d'eau »³⁴⁸ se rencontre à l'échelle de micro-États (Kiribati, Tuvalu, Maldives) ou territoires (Touamotou) mais concerne aussi certains pays continentaux dont le Bangladesh et les Pays-Bas. Du fait de son caractère emblématique, l'Île de Pâques doit être évoquée pour ce qui est de son hydrologie car elle ne comporte pas de rivières, seulement quelques étangs et résurgences, la plupart près de la côte. De récentes publications mettent en avant que le regard des Moaï dans leur position actuel est tourné vers la terre bien généralement situés le long du littoral ; ils sont majoritairement érigés à proximité de sources ((Sherwood, & et al., 2019) (DiNapoli, et al., 2019), (Depraetere & Dierksmeier, 2023)). En cas de sécheresse, seuls les lieux proches des résurgences permettaient l'irrigation et donc la survie. Les sacrifier n'a rien de surprenant.

³⁴⁷ Les îles méditerranéennes basant leur économie sur le tourisme de masse estival sont confrontées à une gestion tendue de leurs ressources en eau (Depraetere C. , Soulis, Tsismelis, Avgoustidis, & Spilanis, 2020).

³⁴⁸ Sur les critères définissant les « crises à pénurie d'eau » voir (Engelman & Leroy, 1993) et (Azonsi & Depraetere, 2002).

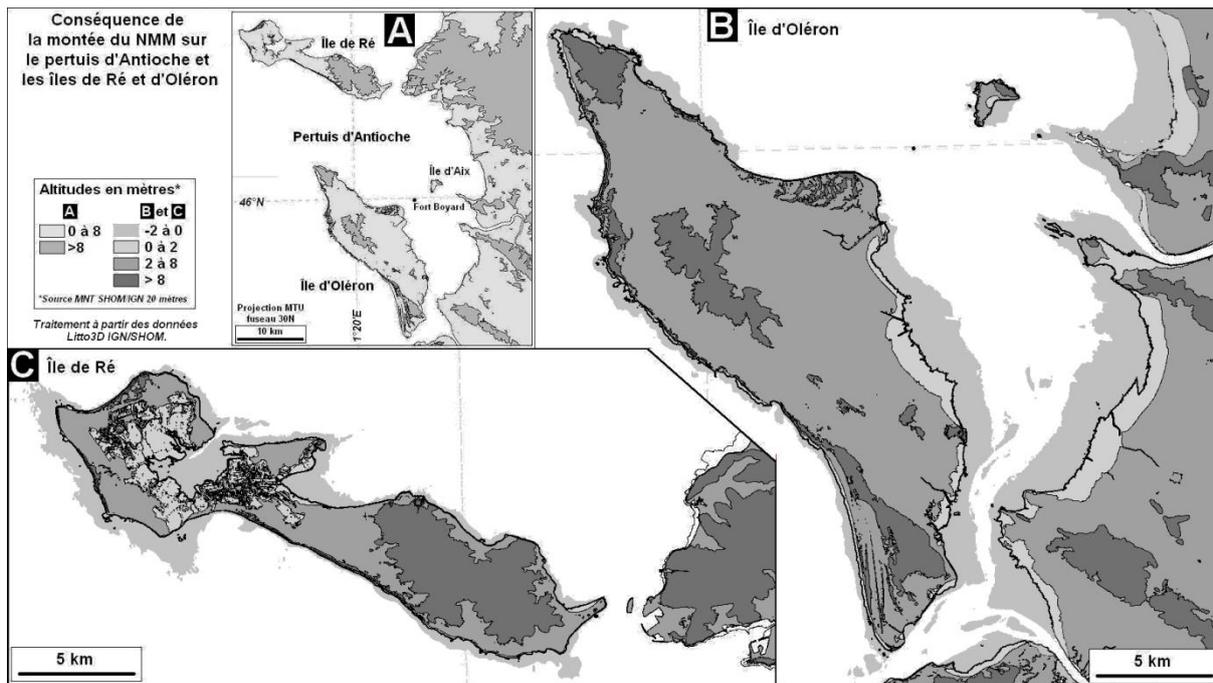


Figure 127 : la montée du NMM sur la côte et les îles du Pertuis d'Antioche
(A) Montée de 8 mètres. B. (C) Montée de 2 et 8 mètres sur les îles d'Oléron et de Ré.

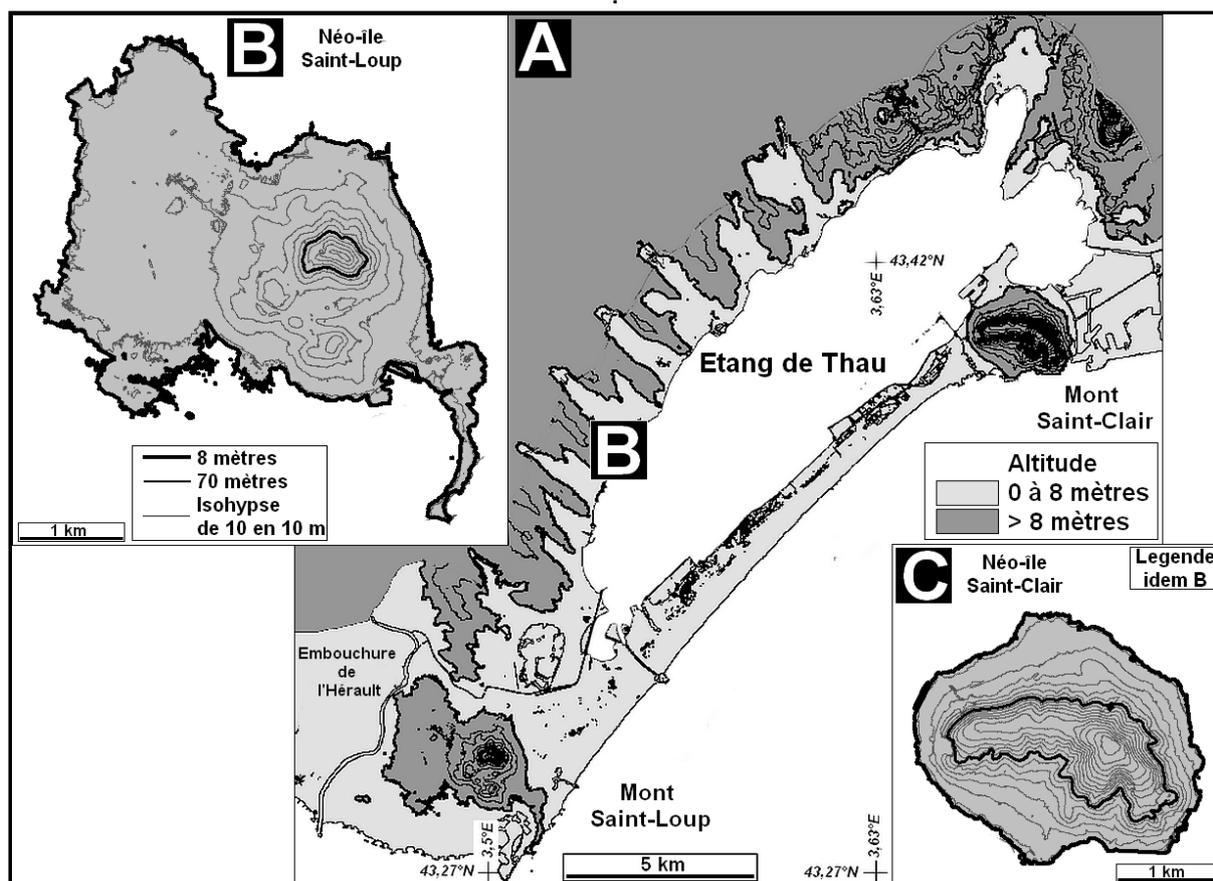


Figure 128 : effet de la montée du NMM entre Agde et Sète
(A) Ennoiement de l'étang de Thau.
(B) Néo-île du mont Saint-Loup. (C) Néo-île du mont Saint-Clair.

Îles à Guano				
Île à Guano	Surface de l'île km ²	Réserve en 10 ³ tonnes	Durée d'exploitation	Épaisseur en m
Nauru	22,7	70 000	1906-2002	3,5
Henderson	31	0,2	aucune	?
Clipperton	1,7	12	1906-1930?	?
Navassa	5,2	1000	1885-?	0,3 à 2



Scénario 2050 et Modèles de circulation générale (MCG)

Cet aperçu démontre l'opposition fonctionnelle des zones climatiques entre les deux hémisphères. La moitié australe dispose d'une forte inertie de par son environnement océanique dominant tandis que la moitié septentrionale se montre bien plus sensible aux évolutions climatiques de par sa composition géographique bien plus continentalisée.

Certains points méritent quelques commentaires, en particulier le contraste évolutif des pluies à proximité de l'Equateur entre le sud (+130 mm/an vers 3°S) et le nord (-130mm/an vers 1°N). En premier lieu, il convient de rappeler que la moyenne des précipitations y est de 2 250 mm/an, si bien qu'une variation absolue de 130 mm ne représente que 5% en valeur relative. Ce résultat semble étonnant puisque ces latitudes correspondent aux régions de brassage et de balancement saisonnier de la Zone de convergence intertropicale (ZCIT) avec son cortège de pluies abondantes liées à l'ascendance des masses d'air humide au contact des deux cellules de Hadley ce qui devrait amoindrir les contrastes latitudinaux.

Un des intérêts de disposer de plusieurs MCG pour les scénarios 2050 tient à ce qu'il permet de tester leurs fiabilités d'ensemble. Les scénarios thermiques sont peu différents, signalant ainsi une tendance forte et significative du système climatique. En revanche, les résultats pluviométriques des 3 MCG présentent de nettes différences, et même des oppositions de tendance à l'augmentation ou à la décroissance des précipitations ; ce constat suggère que leur exploitation demeure davantage sujette à caution. Il n'y a pas lieu de débattre ici sur les raisons de cette moindre robustesse des MCG en matière de simulations des processus pluvio-gènes. Pour aller à l'essentiel, elle s'explique en partie par l'influence majeure de facteurs locaux plus difficiles à paramétrer, tout comme le sont la transposition d'échelle « *upscaling-downscaling* » des processus en cause en particulier à l'échelle des données kilométriques de WORLDCLIM. Cette réserve étant posée pour les scénarios de précipitations fournis par les MCG, le scénario moyen 3M sera néanmoins considéré comme un indicateur de tendance aux échelles régionales et locales par la suite.

“Island biogeography is no longer an offshore enterprise. It has come to the mainlands. It's everywhere. The problem of habitat fragmentation and of the animal and plant populations left marooned within the various fragments under circumstances that are untenable for the long term, has begun showing up all over the land surface of the planet. The familiar question recurs. How large? How many? How long can they survive?” (Quammen, 1997, p. 54)

2.21. La vie sur terres... émergées

Les prémisses de la vie sur terre³⁴⁹ se sont d'abord développées dans l'océan, peut-être dans des contextes physico-chimiques de fumerolles d'eaux chaudes chargées en soufre des abysses. Les terres émergées continentales ne se sont mises en place que progressivement avec des phases de fragmentation et de regroupement qui n'avaient pas d'effet sur la biodiversité terrestre pour la bonne et simple raison qu'il n'y en avait pas ou qu'elle se limitait à quelques bactéries. En revanche, la disposition de ces fragments émergés en fonction de leur taille et de leur position latitudinale pouvait avoir des conséquences sur la courantologie océanique, les circulations thermo-halines et l'évolution climatique à l'échelle du globe impactant la biodiversité marine. Traitant de la fragmentation des terres émergées et de ses conséquences sur les processus de dispersion, de spéciation et d'évolution, il va de soi que l'étude portera que sur la période où les fragments exposés à l'atmosphère ont cessé d'être azoïques. Encore récemment, les stromatolithes étaient considérées comme les premières bactéries partiellement aérobies apparues vers 3,45 Ga³⁵⁰ sur le craton de Pilbara en Australie³⁵¹. Suite à une découverte en Afrique du Sud, il apparaît que la vie serait également apparue sur les terres émergées vers 3,2 Ga sous la forme de « lasagnes » microbiennes alternant avec des strates minérales dans un milieu mi-aquatique mi-terrestre du plateau continental³⁵² (Figure 129A). Toutefois, la terrestrialisation de la vie s'est longtemps limitée à des micro-organismes et ce n'est que vers 450 Ma³⁵³ qu'apparaissent les premières plantes vasculaires terrestres³⁵⁴ (Figure 129B).

C'est à partir du Paléozoïque que la fragmentation des terres émergées va devenir un facteur majeur de l'évolution. Incidemment, on notera que des alignements d'îles sont indiqués sur la carte de la Figure 129B. Ils correspondent à une zone de collision de deux plaques, tout ou partie océaniques. Ces îles sont appelées à disparaître sous l'effet de la subduction et il ne peut en rester de trace à l'époque actuelle. Elles îles sont donc représentées sur la figure pour suggérer qu'il existait des îles de ce type sans qu'on puisse en apporter la preuve.

³⁴⁹ Ce chapitre consacré uniquement aux formes de vie terrestre s'inspire en partie du *Guide de l'évolution* rédigé sous la direction de Guillaume Lecointre (2009). L'ouvrage présente l'avantage d'être didactique et de couvrir l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition et à la diversification du vivant.

³⁵⁰ Milliards d'années.

³⁵¹ Voir (Allwood & et al. , 2018). Des traces fossiles de stromatolithes plus anciennes datant de 3,7 Ga ont été trouvés sur le site d'Isua sur la côte sud-ouest du Groenland (Nutman & et al. , 2016) mais font encore actuellement l'objet d'une controverse.

³⁵² Voir site de Barberton Greenstone Belt en Afrique du Sud (Homann, et al., 2018).

³⁵³ Millions d'années.

³⁵⁴ Voir site de Qusaiba en Arabie saoudite (Steevens, et al., 2009).

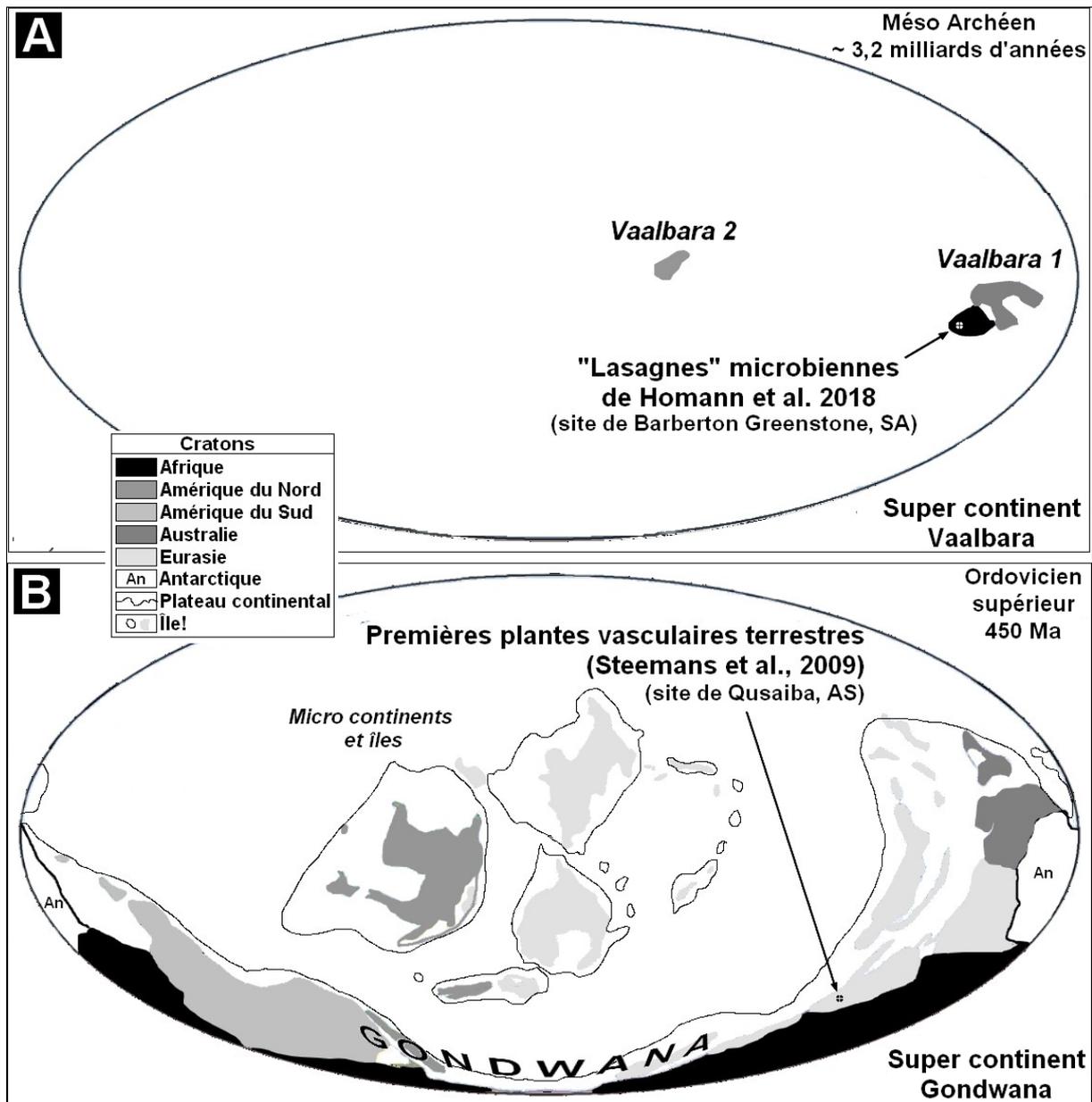


Figure 129 : Sites de première apparition de micro-organismes terrestres vers 3,2 milliards d'années (A) et de plantes vasculaires vers 450 millions d'année (B) (Source projet PALEOMAP, J. R. Scotese, 2019)

Quel a été le poids des îles dans l'évolution du vivant sur les terres émergées ?

Que nous apprend la biogéographie ? Cette discipline présente un intérêt marqué pour le milieu insulaire. La théorie des îles biogéographiques de MacArthur et Wilson (1967) part de l'observation très générale que les grandes îles abritent plus d'espèces que les petites. En appliquant ces données sur un graphique Log-Log, les points s'alignent plus ou moins selon une droite suggérant une relation de type fonction puissance (Cf. Arrhenius, 1920) $Y = a.X^p$ qui n'est pas sans rappeler celle de Korčák. En posant N_e nombre d'espèces et S superficie du fragment émergé, nous obtenons la relation espèces-superficie :

$$[19] \text{Log}(N_e) = \text{Log}(D_p) + P_{me} \cdot \text{Log}(S) \rightarrow N_e = D_p \cdot S^{P_{me}}$$

L'interprétation algébrique et biologique des paramètres D_p et P_{me} serait telle que :

- Dp est une constante dépendant du taxon et de la région biogéographique mais plus certainement de la densité des populations. En effet lorsque S est égal à 1, Dp indique le nombre d'espèces pour une unité de surface en km^2 .
- Pme est un paramètre représentant la pente de la droite $\text{Log}Ne/\text{Log}S$. Il varie peu dans un taxon même à l'échelle du monde mais est corrélé au relief et à la proximité du mainland local. L'effet propre à la fragmentation des terres s'avère inversement proportionnel à ce paramètre. Lorsque Pme tend vers 1, le nombre d'espèces devient linéairement proportionnel à la surface S .

Une application à plusieurs taxons sur des cas observés montre que le Pme varie entre 0,2 et 1. En considérant les exemples listés dans la Figure 130, il apparaît que le taxon des papillons présente la plus forte densité ($Dp=47//\text{km}^2$). Cela va de pair avec une diversification importante en fonction de la superficie ($Pme = 0,86$ proche de 1). À l'inverse, les mammifères terrestres connaissent une bien moindre densité ($Dp=10/\text{km}^2$) et un plus faible accroissement de leur diversité spécifique lorsque la superficie des îles (ou continents) augmente ($Pme=0,48$).

	Taxons	Relation espèces-superficie ($Ne-S$) $Ne=Dp.S^{Pme}$	
		Dp	Pme
1	Angiospermes	43,8	0,512
2	Papillons	47,0	0,864
3	Oiseaux terrestres	8,1	0,595
4	Mammifères terrestres*	10,5	0,478
	1+2+3+4	Total=109,4 espèces/ km^2	Moyenne=0,61
	* Chiroptères non compris		

Figure 130 : Paramètres des courbes espèces-superficie pour quelques taxons à l'échelle des continents et des grandes îles (Wright, 1987, p. 295).

Partant des valeurs du tableau précédent, on supposera que l'on souhaite établir la richesse en espèces de tous les fragments émergés pour les quatre taxons considérés en posant que $Dp=100$ et $Pme=0,5$. Ce modèle empirique applicable à tous les fragments quelle que soit leur superficie sera appliqué en premier lieu aux continents de l'archipel monde (Figure 131A et B). Par commodité, le nombre d'espèces sera assimilé à un indicateur de biodiversité spécifique (I_b-Ne), qui n'est qu'une approximation puisque certaines espèces peu nombreuses peuvent se trouver sur plusieurs continents. Le point fondamental est de comparer la biodiversité cumulée de tous les continents avec celle obtenue en supposant l'existence d'un seul mégacontinent de type Pangée ayant la même superficie que l'ensemble des précédents. De là que :

- Le nombre d'espèces total pour tous les continents est de $\sum_{i=1 \text{ à } 5} Ne_i = 2,38$ millions.
- Ce chiffre pour un archipel monde limité à un seul continent sera $Ne_1 = 1,11$ million.

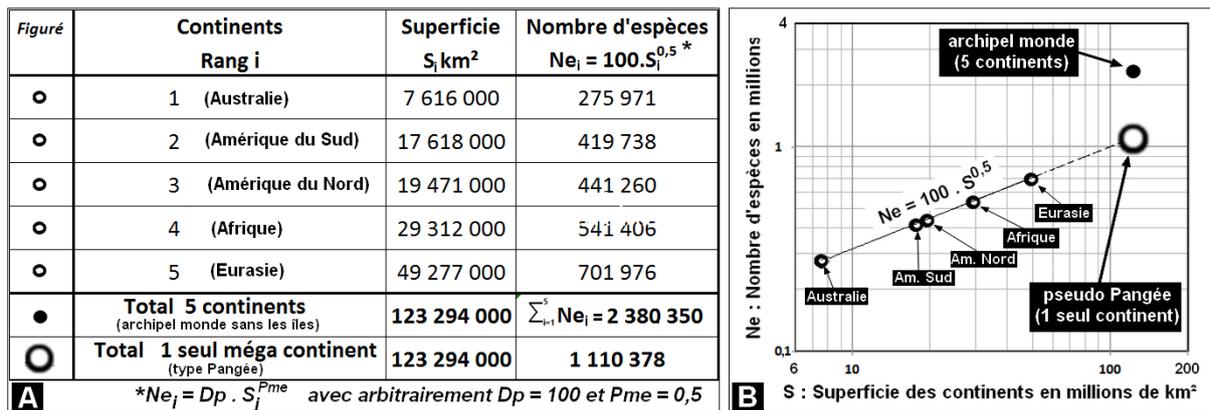


Figure 131 : Conséquence de la fragmentation des continents sur le nombre théorique d'espèces Ne tel que $Ne = 100 \cdot S_{km^2}^{0,5}$ avec $I_b \approx Ne$ indice de biodiversité potentielle.
 (A) Biodiversité comparée entre un archipel monde fragmenté et un seul mégacontinent.
 (B) Courbe espèces-superficie théorique $I_b \approx Ne = 100 \cdot S_{km^2}^{0,5}$ pour les fragments continentaux.

Le même type d'analyse peut être appliqué aux îles telles que nous les avons définies sur un échantillon comportant 116 195 fragments compris entre 0,06 et 1 000 000 km² (Figure 132A). En comparant la biodiversité cumulée de ces fragments avec celle estimée sur une pseudo-mégaîle de même surface cumulée, on obtient respectivement les valeurs de 13,8 et de 0,28, soit un rapport de 50 à 1 ! Il faut noter que la biodiversité de cette « pseudo-Pangée insulaire » a presque la même superficie et donc la même biodiversité que le mainland australien (Figure 132B).

En ne se basant que sur ces résultats théoriques, il serait possible de conclure que la biodiversité du cortège insulaire de l'archipel monde ($13,8 \cdot 10^6$ espèces !) recèle bien plus de biodiversité que les continents eux-mêmes ($2,4 \cdot 10^6$ espèces). Il va de soi qu'il ne peut en être ainsi, du moins pas dans de telles proportions³⁵⁵. Implicitement, la démarche suppose une extrapolation à l'échelle de fragments insulaires de fonctions calibrées à l'échelle continentale. Ce point n'est cependant pas en contradiction avec la théorie des îles biogéographiques dans sa version première, qui ne définit pas de gamme d'échelle restrictive pour l'application de la relation espèces-superficie. En ne tenant pas compte des îles océaniques (IO) qui se caractérisent par un faible nombre d'espèces mais une forte endémicité, la plupart des îles péricontinentales (IP) partagent de nombreuses espèces communes avec leur continent le plus proche et les mêmes espèces tendant à se trouver sur les îles proches entre elles. Sachant que les îles océaniques (IO) sont peu nombreuses comparées à leurs pendants péricontinentales, la conclusion s'impose que la biodiversité insulaire cumulée telle qu'estimée précédemment ne peut être que surestimée si est prise en compte la fragilité intrinsèque des terres menues. Nous verrons également que d'autres observations faites à l'échelle d'archipels montrent que la formulation générale de la relation espèces-superficie n'est pas constante sur l'ensemble du spectre des superficies émergées.

³⁵⁵ Le nombre d'espèces connues actuellement ne recense qu'une partie de la biodiversité réelle qui doit être bien plus importante, en particulier pour les insectes et les micro-organismes.

Figuré	île rang i	Nom de l'île [pays] (0,06<S<1000000 km ²) classée par ordre croissant de superficie S	Superficie S km ²	Nombre d'espèces Ne = 100.S ^{0,5} *
•	1	Ar Gouelvan [France]	0,06	24
•	92 190	Molène [France]	0,87	93
•	112 000	Ouessant [France]	16,7	409
•	115 035	Moorea [France]	136	1 164
•	116 148	Grande-Terre (Nouvelle-Calédonie) [France]	16 469	12 833
•	116 188	Grande-Bretagne [Royaume-Uni]	218 571	46 752
•	116 189	Victoria [Canada]	219 135	46 812
•	116 190	Honshu [Japon]	227 899	47 739
•	116 191	Sumatra [Indonésie]	430 802	65 636
•	116 192	Terre de Baffin [Canada]	511 856	71 544
•	116 193	Madagascar	592 495	76 974
•	116 194	Borneo [Indonésie, Malaisie, Brunei]	735 853	85 782
•	116 195	Nouvelle-Guinée [Indonésie, Papouasie Nouvelle-Guinée]	783 408	88 510
●		Total archipel de toutes les îles (0,06<S<1000000)	7 735 114	13 837 304
○		Total une seule île	7 735 114	278 121
+		Australie	7 616 000	275 971

A * $Ne_i = Dp \cdot S_i^{Pme}$ avec arbitrairement $Dp = 100$ et $Pme = 0,5$

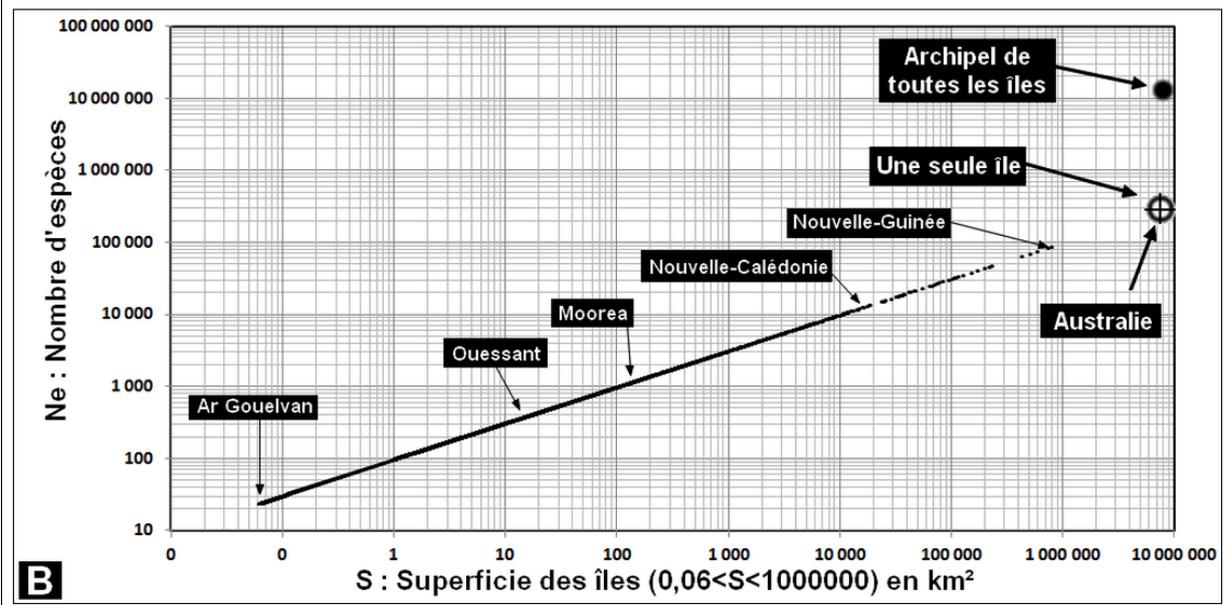


Figure 132 : Conséquence de la fragmentation des îles sur le nombre théorique d'espèces Ne tel que $Ne = 100 \cdot S_{km^2}^{0,5}$ avec $l_b \approx Ne$ indice de biodiversité potentielle.

- (A) Biodiversité cumulée de tous les fragments insulaires (0,06<S<1 000 000 km²) l_b comparée à ce qu'elle serait s'ils étaient tous réunis en une seule terre émergée.
 (B) Courbe espèces-superficie théorique $l_b \sim Ne = 100 \cdot S_{km^2}^{0,5}$ pour les fragments insulaires.

Avant cela, il est utile de revenir sur des observations faites strictement à l'échelle des continents en prenant pour exemple le nombre de mammifères³⁵⁶. Comme dans le cas théorique précédent, la fonction d'ajustement $Ne = 0,0145 \cdot S^{-0,636}$ calibrée sur les cinq mainlands continentaux permet d'estimer le nombre de mammifères si tous les continents

³⁵⁶ Dont les marsupiaux et les monotrèmes mais sans les chiroptères. Les paramètres Dp et Pme établis par Vitousek et al. (1997) se limitent aux cinq grands continents et sont différents de ceux de Wright (1986), ce dernier n'ayant pris en compte que quelques grandes îles pour calibrer la fonction.

étaient réunis sur une seule pseudo-Pangée, soit 2 029 espèces, alors qu'en faisant la somme des valeurs par continent on obtient 3 507 espèces (Figure 133). Ainsi la fragmentation des continents permet-elle de presque doubler la biodiversité spécifique du taxon des mammifères.

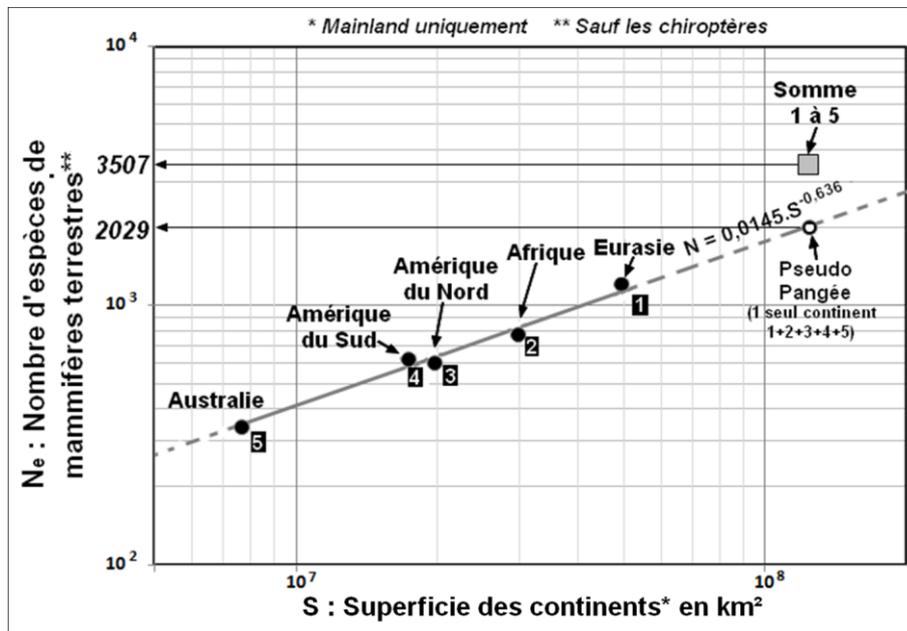


Figure 133 : Courbe espèces-superficie des mammifères (Vitousek & al., 1997, p. 10).

Encore faut-il connaître les cooccurrences d'espèces entre les grands fragments émergés, ce qui est le cas pour le taxon des mammifères y compris les chiroptères (Figure 134A). À l'échelle continentale, le fait majeur assez prévisible est celui de la spécificité de la faune américaine par rapport à l'Ancien Monde avec des taux de similarité de seulement 48 % entre l'Amérique du nord et l'Eurasie et de seulement 25 % entre l'Amérique du Sud et l'Afrique alors qu'elle est de 80 % entre l'Afrique et l'Eurasie. Notre intérêt se portera plus particulièrement sur les terres plus petites et sur leurs cooccurrences par rapport aux terres qui leur sont proches géographiquement.

Madagascar a des espèces de mammifères plus proches de celles de l'Eurasie (69 %) que de l'Afrique (65 %) pourtant moins éloignée, ce fait s'expliquant par l'historique de l'évolution des plaques tectoniques de la grande île et de celle du Deccan devenue le sous-continent indien. Le cas de la Nouvelle-Zélande est facilement réglé puisqu'elle ne comporte pas de mammifères à l'exception des chauves-souris. La configuration la plus intéressante se trouve entre l'Australie et l'Eurasie via le monde insulaire de la Nusantarie (Figure 134B). Entre les deux paléocontinents que sont l'Eurasie et la péninsule de la Sonde et Sahul³⁵⁷, le « sas insulaire » biogéographique des îles de la Wallacie³⁵⁸ a filtré les flux d'espèces et de gènes. La valeur des cooccurrences d'espèces permet de quantifier l'effet de barrière de la ligne de Wallace à l'ouest (92 % et 96 %) et celle de Lydekker à l'est (79 %). De fait, les chenaux interinsulaires sont plus larges entre l'ensemble sulawésien et la Nouvelle-Guinée qu'entre les Philippines et Sulawesi d'une part, et les grandes îles de la Sonde longtemps rattachées au continent eurasiatique, d'autre part³⁵⁹.

³⁵⁷ Nouvelle-Guinée, Australie, Tasmanie.

³⁵⁸ Principalement les Philippines, Sulawesi/Célebes et les petites îles de la Sonde à l'est de Bali et le profond chenal la séparant de Lombok.

³⁵⁹ Présence de grands mammifères de type éléphants, rhinocéros et tigres sur Sumatra, Bornéo, Java et Bali.

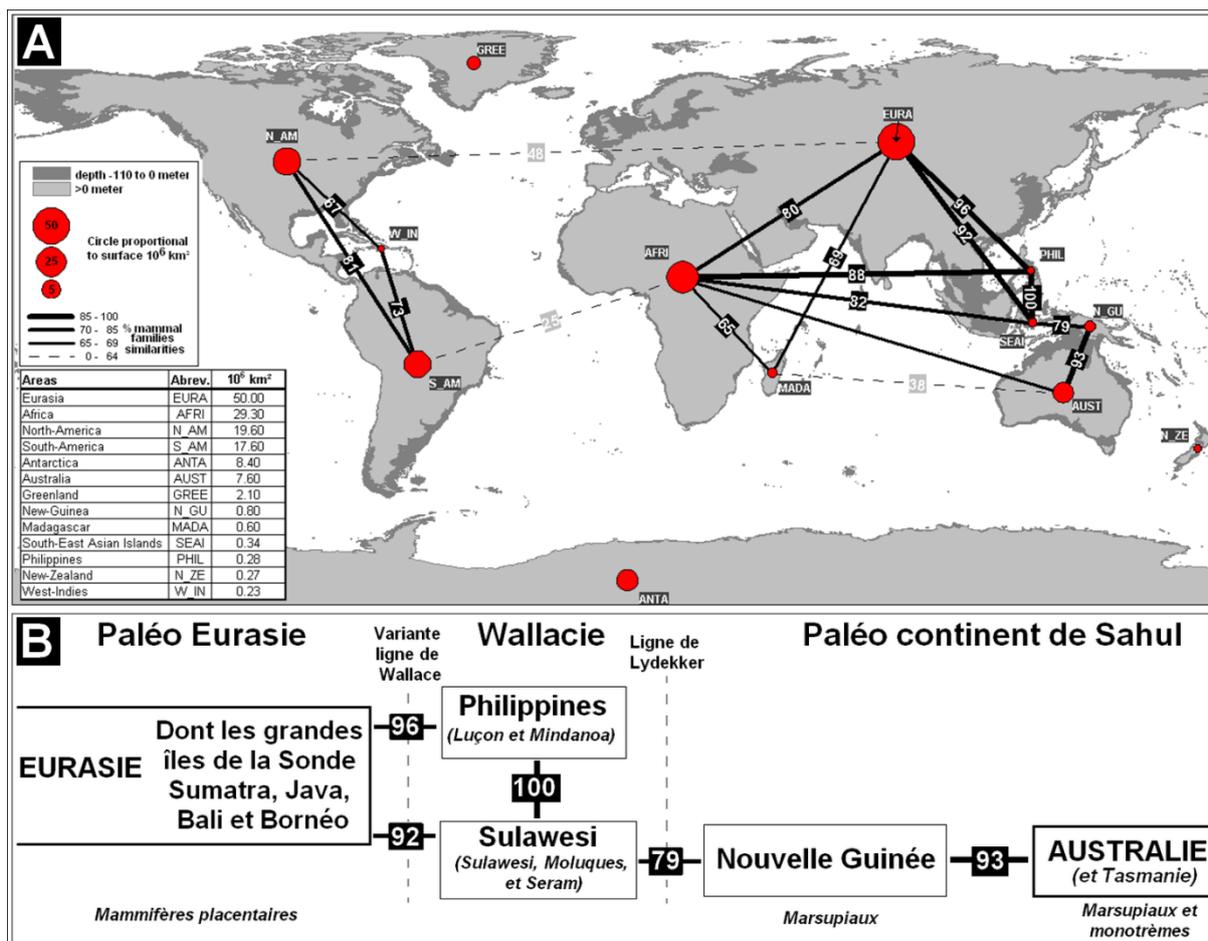


Figure 134 : Similitudes entre les espèces de mammifères sur les grandes terres.
 (A) Paléogéographie des espèces de mammifères sur les continents
 (B) Cooccurrence d'espèces entre la paléo-Eurasie et Sahul via le sas la Wallacie

Une conclusion : la fragmentation favorise la biodiversité. Il faut cependant nuancer cette appréciation d'ensemble, et notamment celle, toute théorique, d'une relation espèces-surface simple et universelle doit être nuancée en prenant en compte les différents facteurs contrôlant la biodiversité :

- La biodiversité s'organise selon des zones climatiques. Elle tend à augmenter depuis les pôles jusqu'à l'équateur. Les continents et les îles polaires et subpolaires³⁶⁰ ont une plus faible diversité d'espèces végétales et animales que ceux de la zone intertropicale³⁶¹ ou même de la zone tempérée³⁶². Toutes choses égales par ailleurs, les continents, de par leur extension latitudinale, peuvent inclure plusieurs biomes, ce qui est un facteur majeur de biodiversité.
- Dans la morphologie des îles, les insularistes s'accordent pour distinguer les îles basses offrant peu de niches écologiques différentes³⁶³ et les îles hautes s'organisant en étages bioclimatiques depuis les côtes jusqu'aux plus hauts sommets³⁶⁴. Les premières ont donc une biodiversité potentielle plus faible que

³⁶⁰ Terre de Baffin, Nouvelle-Zemble, Kerguelen, Terre de Feu.

³⁶¹ Nouvelle-Guinée, Madagascar, Cuba, Nouvelle-Calédonie.

³⁶² Japon, îles de la Méditerranée, Terre-Neuve.

³⁶³ Touamotous, Bahamas, arc externe des Petites Antilles, Bahamas.

³⁶⁴ Îles de la Société, arc interne des Petites Antilles, Formose, Big Island à Hawaï.

les secondes. Il faut noter que le paramètre Pme reflète en partie cette diversité induite par le relief.

- Indépendamment du facteur zonal qui ne joue vraiment que pour les fragments continentaux, la taille des îles, leur isolement par rapport aux mainlands et les divers effets du relief³⁶⁵ influent sur le paramètre Pme .

La théorie des îles biogéographiques a fait l'objet de nombreuses recherches depuis 1967, ce qui a permis d'en préciser les limites, en particulier pour les « petites îles » dont le modèle théorique d'Allen et White (2003) rend compte de façon synthétique (Figure 135A). Les auteurs indiquent un seuil de superficie Sr au-dessus duquel le paramètre Pme tend vers 1 qui converge vers la courbe correspondant au maximum théorique d'espèces. En deçà de cette valeur, le coefficient Pme devient sensiblement inférieur à 1 et reste assez constant, indiquant une distribution pseudo-fractale des espèces dans une classe de taille d'îles données dont la limite inférieure correspond à des surfaces très petites par rapport au seuil Sr ($S_p \ll S_r$). Pour ces valeurs très petites, le nombre décroît rapidement et s'écarte fortement du modèle théorique du maximum d'espèces. Les données d'observation amène à conclure que la loi espèces-superficie n'est pas transcalaire mais multiscalaire au sens qu'elle doit être ajustée par morceaux en fonction de la taille des fragments insulaires³⁶⁶.

Pour les surfaces les plus petites, il existe un effet local se caractérisant par le fait qu'un fragment insulaire peut présenter une forte biodiversité alors que ses voisins de même taille voire plus grands en auront fort peu. C'est manifeste à Guana, petite île de 4 km², dans les îles Vierges britanniques (Lazell, 2005). Le caractère erratique de la biodiversité micro-insulaire procède de la fragilité même de ces petites terres plus susceptibles que d'autres d'être totalement ravagées par un cataclysme naturel (éruption volcanique, tsunami, incendie) ou une exploitation humaine intensive (plantation, exploitation minière ou forestière, introduction volontaire ou non d'espèces invasives, chasse). Du fait à la fois du faible nombre d'espèces mais aussi du nombre d'individus par espèce, elles sont plus vulnérables et moins résilientes à toutes les perturbations venant de l'extérieur. Vouloir modéliser l'erratisme de la biodiversité micro insulaire suppose une approche stochastique des divers phénomènes évoqués pouvant provoqués un « collapse » local des milieux naturels dans le temps long de l'histoire de chaque fragment émergée y compris le facteur humain. D'une façon plus générale, les îles, et pas seulement les plus petites, se signalent par l'absence complète de certains taxons (Nouvelle-Zélande, Madagascar...) ou, à l'inverse, par la préservation de taxons entièrement disparus ailleurs depuis fort longtemps. Le cas le plus emblématique est celui des deux espèces de sphénodons qu'on ne trouve que sur quelques îlots au large des mainlands néo-zélandais et que nous considérerons plus loin.

La Figure 135B de Lomolino complète le modèle d'Allen et White sur le cas des très petites îles. Le modèle conceptuel de Lomolino se garde bien de donner des seuils précis mais reprend approximativement la même courbe espèces-superficie.

³⁶⁵ Versant au vent et sous le vent notamment dans les îles tropicales. Voir chorème de la Figure 12.

³⁶⁶ Ce constat n'est pas sans rappeler ce qui a été observé pour la loi superficies-nombre pour les îles elles-mêmes.

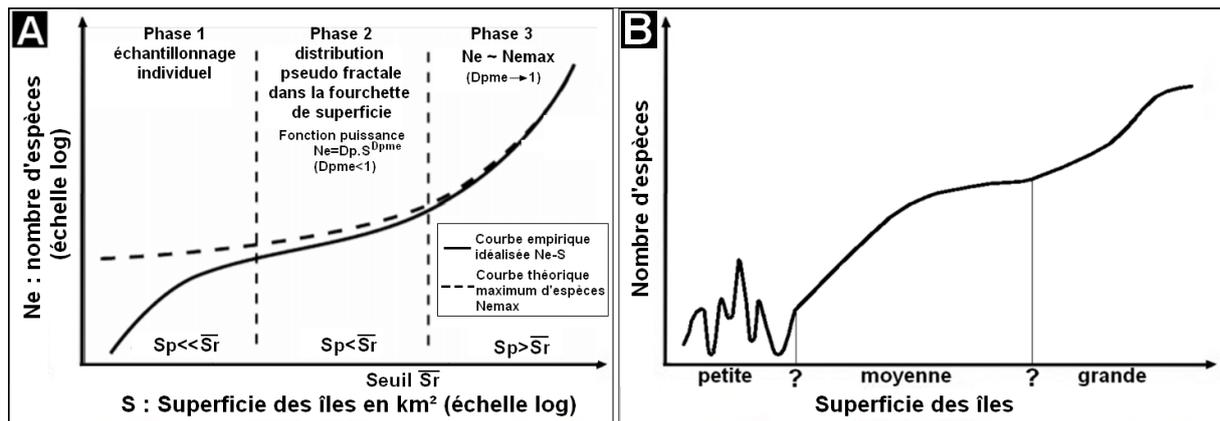


Figure 135 : Relation espèces-superficie.

(A) Modèle conceptuel de (Allen & White, 2003) dérivé de (Wright, 1987).

(B) Modèle conceptuel de Lomolino (Adapté de (Spiller & Schoener, 2009, p. 857))

L'élément principal de la courbe de Lomolino est l'erratisme de la biodiversité des « petites » îles alors qu'il est moindre sur les îles « moyennes et grandes » :

"Les conclusions de Lomolino et de son modèle combiné en 2001³⁶⁷ propose un modèle général de la relation espèces-superficie intégrant les dynamiques de perturbations et d'équilibre avec la spéciation sur les îles. Dans ce modèle, la relation espèces-superficie présente trois régions : sur les petites îles, les effets stochastiques des perturbations prédominent, faisant que la relation entre le nombre d'espèces et la superficie de l'île est variable et imprévisible. Sur les îles de taille moyenne ou grande, l'effet déterminant de la superficie sur les processus d'extinction/immigration et la diversité des habitats prédomine, et le nombre d'espèces augmente à un taux décroissant lorsque le nombre d'espèces dans le pool source est presque atteint. Les plus grandes îles présentent des barrières isolant les populations d'espèces ce qui conduit à une spéciation allopatrique³⁶⁸." Traduction libre de (Spiller & Schoener, 2009)

Qu'en est-il des faits observés au regard de la théorie ? Considérons le cas du nombre d'espèces de plantes (taxon large) pour les principales îles des Galapagos, qui illustreront le propos à une échelle d'archipel bien plus petite que sur l'exemple des mammifères sur l'archipel monde (Figure 136). Les grandes îles comme Isabela ou Santa Cruz sont proches du modèle statistique de l'archipel alors que certains îlots de quelques km² s'en distinguent nettement soit par une faible diversité pour Wenman (3,04 km²) et Culpepper (alias île Darwin, de 2,67 km²) qui sont isolés à l'extrême nord de l'archipel, soit au contraire par une surprenante variété de plantes comme sur El Jardinero (0,81 km²) ou Seymour Norte (2,12 km²), proches d'îles bien plus grandes dans le sud ou le centre. Sur cet archipel et ce taxon, le seuil entre les « petites îles » à la biodiversité erratique et les « îles moyennes » ayant une variété d'espèces conforme au modèle régional³⁶⁹ se situerait vers 1000 km².

³⁶⁷ Voir (Lomolino & Weisen, 2001)

³⁶⁸ Dans le cadre de la Théorie de l'évolution, le terme allopatrique s'applique à un mode de spéciation faisant qu'un groupe d'espèces dérivant d'un même ancêtre commun se différencie du fait de l'isolement de populations dû à des obstacles géographiques (mer, fleuve, chaîne de montagne, désert, ...).

³⁶⁹ En l'occurrence un archipel océanique équatorial

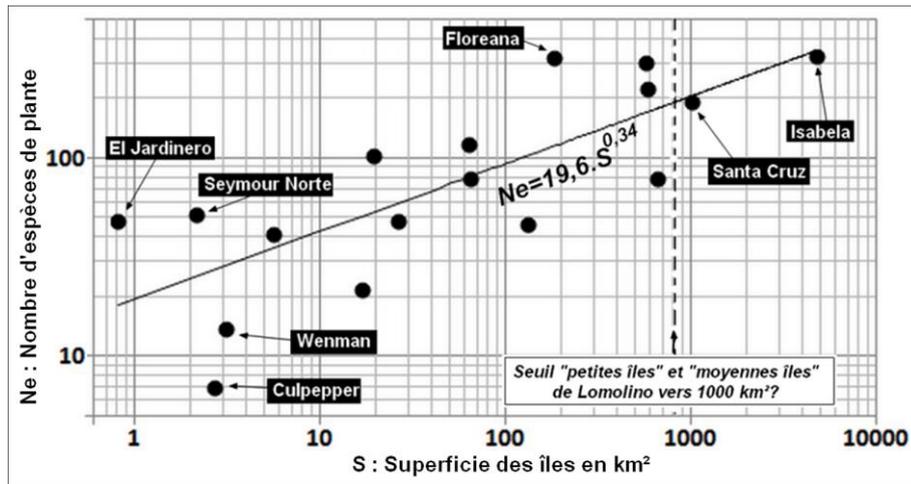


Figure 136 : nombre d'espèces de plantes aux Galapagos (Adapté de (Spiller & Schoener, 2009, p. 859).

On notera que les paramètres des fonctions de fréquence d'espèces sont fort différents. Le paramètre Dp s'avère sensible à l'échelle géographique avec respectivement une valeur passant de 0,0145 pour les mammifères à l'échelle des continents à 19,6 pour les plantes aux Galapagos, tandis que le paramètre Pme est de 0,64 pour les premiers et de 0,34 pour les secondes, suggérant que la fragmentation joue un rôle plus important à l'échelle d'un petit archipel qu'à celle de l'archipel monde. Il faut cependant rappeler que ces deux analyses se réfèrent à des taxons différents, de sorte que la différence peut aussi être liée à leur spécificité en termes de dispersion et de spéciation. En ne comparant que le paramètre Dp , la densité spécifique serait d'un mammifère pour 100 km² à l'échelle du monde et de 20 plantes par km² pour les Galapagos. Ces valeurs ne font pas référence au nombre d'individus d'une espèce par unité de surface mais à la présence d'une espèce, ce qui suppose une population suffisamment importante pour qu'elle soit génétiquement viable. Une différence fondamentale et évidente entre les animaux et les plantes tient au mode de diffusion des gènes, qui, dans le cas des premiers, suppose un déplacement et une rencontre des géniteurs avec des comportements reproducteurs spécifiques³⁷⁰, alors que pour les secondes la dispersion se fait de façon passive, entre autres par le vent mais pas seulement. Pour le triptyque Dispersion-diffusion-migration (DDM), il s'agit de flux propres au monde du vivant sous la forme de migrations d'individus, de dispersion de gamètes et de graines ou de diffusion de gènes. Sur un espace fragmenté formé de « *patches* »³⁷¹ de vie (favorable à l'espèce) et de non-vie (la mer, pour les plantes et animaux terrestres), la survie d'une espèce sur un petit fragment dépend de la capacité des gamètes ou des individus à traverser les zones de non-vie soit de façon passive pour les plantes soit de manière plus ou moins active pour les animaux.

Un autre concept peu connu si ce n'est par les biologistes, celui de « métapopulation », qui est intimement lié à la notion de fragmentations des paysages si chère aux biogéographes. En 1998, dans la revue *Nature*, Ilkka Hanski³⁷² co-publie avec Michael Gilpin, un article intitulé « Metapopulations dynamics » (1998) qui contribue au renouvellement des méthodes d'analyse des « populations de populations » telles qu'envisagées dans les travaux pionniers de Richard Levins (1969). Une métapopulation se définit comme une population d'individus

³⁷⁰Nous verrons que pour une espèce de papillon sur les îles Aaland, ce comportement est indispensable à la survie de l'espèce par le brassage génétique mais il représente un risque pour les reproducteurs considérés individuellement. La logique de l'espèce prime sur celle de l'individu.

³⁷¹ Le mot *patch* souvent utilisé par les écologues du paysage est équivalent à celui de « fragment ».

³⁷² Nous l'avons contacté pour précision sur son choix des Aaland avant qu'il ne décède en 2016.

dispersés sous forme de sous-populations. Il y a donc à la fois séparation géographique et interaction génétique par dispersion-migration ce qui implique de flux d'individus reproducteur entre les fragments géographiques. Cette question de la connectivité génétique dans des espaces naturels fragmentés fait écho à toute la problématique des corridors écologiques étudiés par les biologistes de la conservation. Ces corridors sont un moyen de rétablir un continuum des flux indispensable au maintien de la richesse faunistique des *patches*.

Par analogie avec le modèle géographique proposé par Pierre-Gilles de Gennes dans sa théorie de la percolation, il est juste de parler d'un « ennoiement » des milieux naturels par les activités humaines provoquant *de facto* leur « patchisation ». Ce processus ne peut que précariser les métapopulations autrefois viables sur les fragments restants³⁷³. Deux conditions sont nécessaires à l'apparition de métapopulations. Il faut que la fonction de dispersion des gamètes ou des individus reproducteurs soit supérieure à la distance entre les fragments, celle-ci variant d'une espèce à l'autre. Cela suppose aussi que les comportements reproducteurs incitent les individus d'une espèce à chercher un partenaire dans une autre sous-population. La fragmentation croissante des espaces naturels qui résultent de l'extension des domaines anthropisés³⁷⁴ explique l'engouement actuel pour les modèles dynamiques de métapopulation.

Notre propos se limitera à ne considérer que le contexte géographique bien particulier dans lequel Hanski a mené ses recherches. Il s'agit des îles Aaland³⁷⁵, dont nous avons montré qu'elles constituent l'archipel péricontinental qui possèdent les plus fortes densités insulaires au monde (Figure 137A). À leur hyperfragmentation s'ajoute la fragmentation des lacs et des étangs dans chaque îlot. Sur ces petites « îles d'eau » au milieu de petites « îles de terre » vivent des populations de papillon *Melitaea cinxia*³⁷⁶ dont Hanski étudia les populations élémentaires dans deux mille prairies situées au bord d'étangs où les papillons vont déposer leurs larves (Figure 137B). Aucun site ne compte assez d'individus pour que la population soit génétiquement viable. Nécessité faisant loi, l'examen des populations montre qu'il existe des flux entre les lacs et les îles, constituant de la sorte une métapopulation pourvue d'une forte diversité de génomes apportés par des migrations de papillons qui doivent traverser des zones moins favorables, et même dangereuses comme celles des chenaux marins. Cela fait écho à la notion de migration reproductrice supposant la traversée de zones de non-survie. Ce comportement à risque pour l'individu apparaît en revanche comme une condition *sine qua non* de survie de l'espèce.

³⁷³ L'ennoiement et la « patchisation » actuels des espaces naturels par les activités humaines ressemble s'apparente à la « transition de phase » de Pierre-Gilles de Gennes (1976). Voir Figure 16.

³⁷⁴ Outre l'extension des zones cultivées ou urbanisées, notamment dans les pays à forte croissance démographique, la construction de routes ou d'autres lignes de transport contribue fortement au phénomène de morcellement des habitats. En termes de modélisation, les espaces agricoles peuvent être assez facilement traversés bien que fort étendus. À l'inverse, les rubans routiers sont peu larges mais représentent un réel danger.

³⁷⁵ L'orthographe exacte est Åland. Comme précisé ultérieurement, les îles composant cet archipel localisé entre la Finlande et la Suède présentent la plus forte densité insulaire au monde. Cet émiettement insulaire s'explique par un effet de Rebond isostatique post glaciaire (RIPG de +1 cm/an) provoquant l'émergence des formations morainiques du fond de la Baltique.

³⁷⁶ *Glanville Fritillary* en Français Méliée du plantain.

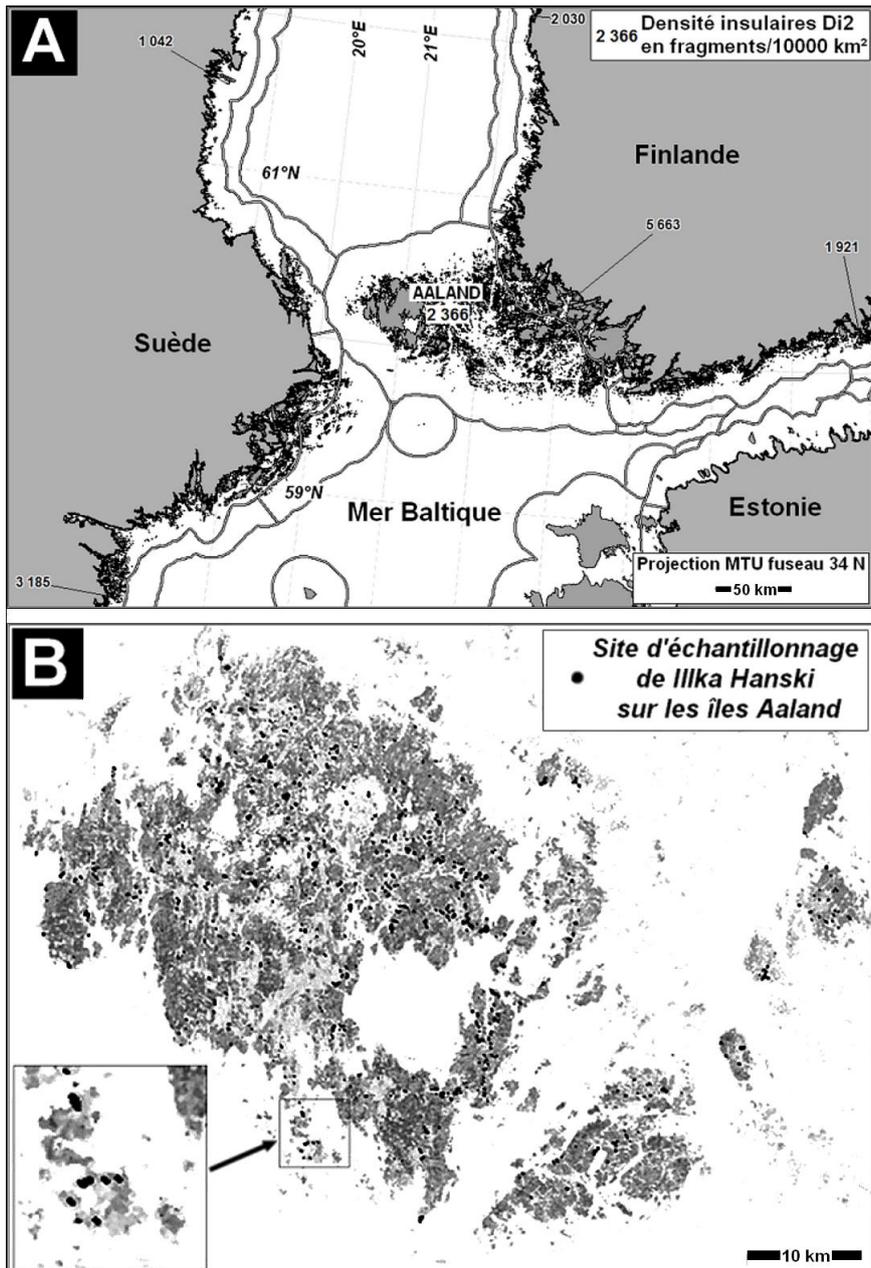
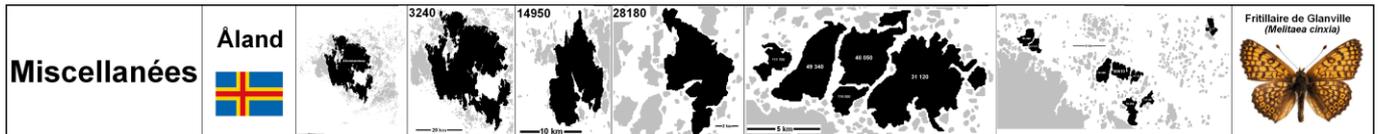


Figure 137 : Contexte expérimental hyperinsulaire des îles Aaland qui a servi pour les travaux d'écologie du paysage et de génétique des métapopulations d'*Ilkka Hanski*.



Des papillons d'Ilkka Hanski sur les îles Åland (Åland) à la géohistoire de l'Œcumène sur l'archipel monde

Pour ou contre une approche fonctionnaliste du phénomène humain ? N'y-a-t-il pas quelques rapports entre la règle d'exogamie des populations humaines dont l'interdit de l'inceste universellement partagé et l'avenir de l'espèce considérée ? Le bref aperçu précédent sur les travaux d'un entomologiste sur un petit archipel finlandais, les bases de l'anthropologie et l'historiographie à l'échelle de l'œcumène souligne qu'il existe des processus profonds qui transcendent des supposées ou réelles différences "de nature" entre l'homme et le reste du monde animal. Sous leurs enveloppes de règles comportementales, morales et législatives, les sociétés humaines ont dû intégrer les lois fondamentales régissant le vivant à la fois pour la survie de l'espèce mais aussi dans le but de pérenniser dans la durée leur culture par-delà l'horizon des existences individuelles : le domaine profane du vivant hors humain est-il par nature sans rapport avec l'examen des processus propres à l'Homme, créature douée de conscience, qui relèverait peu ou prou du caractère sacré d'un humanisme universel ? Nous scientifiques, sommes-nous "totems et tabous" ? Le parallèle qui est fait entre deux domaines ne se limite pas à des analogies fonctionnelles mais de l'examen des *ultima ratio* des processus fondamentaux régissant la biosphère, *Homo sapiens* compris. En somme, le phénomène humain échappe-t-il aux contraintes s'appliquant au monde vivant au nom d'une différence "d'essence" qui pourrait être "divine" si l'on suit ce qu'en disent les religions du Livre ?

Par-delà les dogmes sur la conscience et la morale spécifique à chaque culture, la perspective fonctionnaliste de certains anthropologues voire d'historiens impose une quête des processus profonds animant l'évolution ou au contraire la stagnation de la dynamique des sociétés et des individus qui les composent tout autant que celles des peuples, des nations et des pays. Tenter ainsi de dépasser les apparences pour s'intéresser aux tréfonds de ce qui fait la spécificité du phénomène humain est ambivalente : elle peut tout aussi bien conduire à renaturer l'animal dénaturé que nous sommes selon certains philosophes qu'à une simplification dangereuse de concepts biologiques, ayant mené avant nous à un darwinisme social et même politique de triste mémoire ; à trop vouloir surmoraliser ou au contraire amoraliser l'écheveau des faits humains, ne risque-t-on pas d'immoraliser la pratique scientifique notamment dans les sciences sociales avec son cortège de réécriture de l'histoire avec son cortège de révisionnismes plus ou moins délibérés ?

Îles, îlots et islets déclinés à toutes les échelles : un tourisme de « micro-insulaire »

Avec 1229 îles de plus de 0,5 km² (et probablement 530 000 îlots de plus de 100 m²), l'archipel des Åland peut pleinement jouer la carte du rêve micro insulaire pour les touristes (Voir ci-contre). Cette argument se retrouve sur une carte postale du ministère du Tourisme de Finlande montrant un îlot de 100 m² juste suffisant pour y planter sa tente. Tranquilité garantie !



2.22. Géogénétique et flux culturels

Commençons par la Nouvelle-Guinée, la plus grande île de l'archipel monde où, comme partout ailleurs, le brassage génétique est assuré par la pratique du mariage exogamique patri ou matrilocal³⁷⁷ sans que cela se soit traduit dans le processus de diffusion linguistique. Pour cette grande île, en effet, les flux de gènes existent, alors que l'expansion d'une ou plusieurs langues semble quasi inexistante pour les peuples mélanésiens de la côte et de la plaine, et plus encore pour les communautés papoues des vallées de l'arrière-pays montagneux. Les linguistes ayant travaillé sur le mainland néo-guinéen notent que la communication entre les isolats linguistiques se fait de proche en proche sans qu'existe un pidgin régional ou colonial de type bichlamar, *lingua franca* inter insulaire pour l'archipel du Vanuatu. Cet exemple laisse entendre que les modalités de diffusion opèrent de manière différente sur les espaces continus du type du mainland néo-guinéen et dans le domaine insulaire du triangle archipel Bismarck, Fidji, Nouvelle-Calédonie. L'intégration de la géolinguistique et de la géogénomique humaine met en regard un processus biologique de flux de gènes avec un processus de diffusion culturelle qui peuvent conduire à revoir les modèles migratoires jusqu'alors admis par les géohistoriens. Pour la grande île, il y a découplage entre, d'une part, le processus biologique et migratoire et, d'autre part, le phénomène culturel, alors que pour les îles de son cortège insulaire périphérique, la diffusion linguistique austronésienne³⁷⁸ est patente sans que l'on ait suffisamment d'éléments pour évaluer l'importance migratoire y compris sous sa forme d'échanges patri ou matrilocaux.

À l'échelle de l'archipel monde, à l'instar du graphe de cooccurrence des mammifères (Voir Figure 134), la synthèse faite par Luigi Luca Cavalli-Sforza (2001) sur la géolinguistique et la géogénétique³⁷⁹ de l'œcumène donne un aperçu synoptique sur les relations entre la fragmentation des terres émergées, la diversité génétique et les langues, sachant qu'il n'y a toujours concordance entre les proximités géographiques, génétiques et linguistiques. Le processus biologique est lié aux migrations (Figure 138A) alors que le processus linguistique correspond à une diffusion culturelle (Figure 138B) sans que les deux soient forcément corrélés comme nous venons de le voir. Pour ce qui est de la comparaison des dendrogrammes et de la mesure des « distances » entre les différents profils génétiques et les langues de différents peuples et cultures, les deux domaines ne procèdent pas de la même façon. Les distances génétiques permettent d'établir une hiérarchisation métrique proportionnelle à la longueur des branches du dendrogramme. Par exemple, les peuples de Nusantarie occidentale (Malaisie, Indonésie, Philippines) sont bien différents génétiquement de ceux de la Nusantarie orientale (Mélanésie) et du Pacifique (Micronésie, Polynésie) alors que cette distance est plus faible pour les peuples indo-européens sur la diagonale façade atlantique Inde du Nord. On opposera la spécificité génétique et linguistique de la Sardaigne comparé l'unité linguistique des langues austronésiennes parlées par des peuples aux origines génétiques différentes sur une large partie du monde, en particulier chez les peuples Merina et Betsileo des hauts plateaux de Madagascar. Le degré de ressemblance entre les langues ne peut procéder selon une métrique aussi précise et se limite à une hiérarchisation qualitative.

³⁷⁷ Cas général déjà identifié par Claude Lévi-Strauss et d'autres ethnologues par-delà le tabou universel de l'inceste.

³⁷⁸ Il est probable qu'elle date de 3000 BP et serait contemporaine de la culture Lapita. Pour le bichlamar, il s'agit d'un phénomène datant de la fin du XIX^e siècle.

³⁷⁹ Il y a un distinguo entre la génétique et la génomique, la première ne portant que sur quelques allèles qui ne sont que des variantes d'un même codon alors que la seconde considère l'ensemble du génome, c'est-à-dire tous les gènes, qu'ils soient codants ou non.

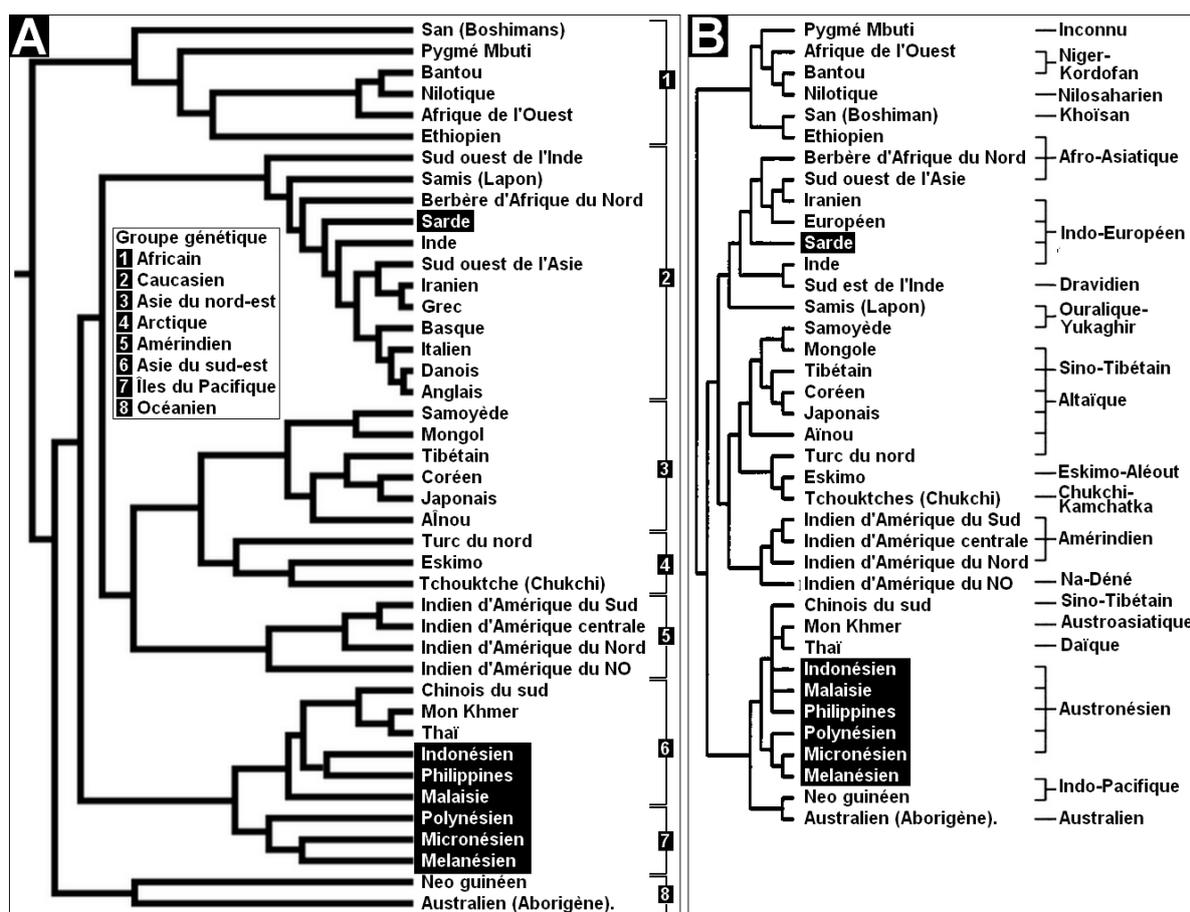


Figure 138: « Distances » génétique et linguistique de l'archipel monde
 (A) Dendrogramme génétique (Cavalli-Sforza, 2001)
 (B) Correspondance avec les langues (Cavalli-Sforza & al., 1988)

Le cas de la Sardaigne mérite attention puisque cette île méditerranéenne présente une forte identité génétique, linguistique et culturelle³⁸⁰. En se limitant à l'aspect génétique, certaines régions de la grande île auraient des ancêtres communs avec les Basques (Chiang & al., 2018). L'île serait un modèle de peuplement néolithique probablement sans population préalable de chasseurs-cueilleurs (Depraetere & Meichsner, 2016) puis demeurée relativement isolée des flux migratoires postérieurs qui furent bien plus marqués dans les autres îles de la Méditerranée. Cela résulte de l'éloignement de la Sardaigne par rapport aux mainlands continentaux environnants même si la Corse et les îles toscanes aient pu faire office d'îles-relais. Formose est un cas intéressant pour l'analyse comparative des flux génétiques et culturels ; Il a été démontré d'une part, que toutes les langues austronésiennes ont une filiation avec les dialectes formosans, d'autre part qu'il n'y a aucun élément génétique permettant d'avancer d'éventuelles migrations depuis cette île vers le vaste domaine linguistique austronésien³⁸¹ ; il y aurait donc eu un processus de diffusion linguistique progressive sur un immense espace océanique et insulaire sans que celui-ci soit lié à une quelconque migration à partir de l'île originelle. On retrouve là, dans un contexte et à une échelle bien différents, un découplage entre flux linguistique et migratoire ; à cela s'ajoute une « dispersion » et une filiation des cultures matérielles en particulier en matière de céramiques et de technologie

³⁸⁰ Culture nuragique de l'âge du Bronze.

³⁸¹ Sur tous les aspects linguistiques culturels et archéologiques des aborigènes formosans, on se reportera utilement à la synthèse qui en est faite dans l'ouvrage collectif (Blundell, 2009).

nautiques³⁸². L'ensemble des « processus » inter insulaires se décline souvent en différents volets : le fait de mettre en avant la notion de DDM en termes de flux suggère une analyse intégrée et correlative des phénomènes géohistorique. Par-delà certains poncifs sur le décloisement des disciplines scientifiques, une telle vision devraient passionner non seulement les géohistoriens mais aussi les ethnologues tout autant que les linguistes, les archéologues, les paléologues, les géniticiens, ... Ces processus s'expriment dans l'espace de l'archipel monde sous la forme de cultures, civilisations, nations, cultures se manifestant à un temps T par une fragmentation en territoires. Tout comme il existe une lutte pour l'espace intra et interspécifique pour les animaux, il est d'évidence exact que l'espèce humaine est grégaire et territoriale.

Miscellanées	IIC/CCI	Île	Sur. km²	Per. km	Lga km	Code Archipel	Code Mer	Code Pays	Forme			20390	NORD	NORD
									Iem	Icm	Ial			
	5480	Krk	413	185	37,8	10570	33	HR	1,347	2,569	1,651			
	5490	Cres	412	236	64,9	10570	33	HR	1,819	3,278	2,836			
	6940	Pag	294	283	59,3	10570	33	HR	1,692	4,658	3,063			
	12470	Dugi	122	170	44,9	10570	33	HR	2,063	4,332	3,603			
	18630	Pasman	64	64	21,5	10570	33	HR	1,271	2,254	2,385			
	20390	Ugljan	54	73	22,1	10570	33	HR	1,342	2,796	2,659			
	1401690	Galevac	0,04	0,76	0,30	10570	33	HR	1,001	1,079	1,338			

Territorialité culturelle versus continuum linguistique et génétique : le nœud gordien identitaire

Les spécialistes tendent à s'accorder sur le fait qu'il existe un continuum linguistique et génétique, ce qui revient à dire que les régions voisines ont une plus forte probabilité d'être apparentées au lieu considéré. Ainsi, un élément démontrant que la race aryenne n'existe pas tient au fait que la génétique des populations de la partie occidentale de l'Allemagne est bien plus proche de celles du nord-est de la France que des Länders de l'est qui sont génétiquement apparentés aux Polonais et aux Baltes. Il en va de même pour les dialectes ; il existe un continuum linguistique entre le Castillan fortement influencé par l'Arabe jusqu'au Wallon et *a fortiori* le Bruxellois dans leur contexte néerlandophone en passant par le Catalan, l'Aranais, l'Occitan et le Français. Les influences locales se traduisent souvent par un registre lexical emprunté aux voisins sans que la structure grammaticale de la langue change. C'est ainsi le cas pour la langue latine roumaine qui a incorporé de nombreux mots d'origine slave alors que les populations aroumaines de Grèce et de Bulgarie ont principalement enrichi leur lexique de mots grecs. Les anciens dialectes dalmates ou illyro-romains bien que restant à base latine ont diversifié leur vocabulaire en utilisant des termes slaves ou vénitiens, le dernier locuteur étant mort sur l'île de Krk en 1898. Ces territorialisations des aires linguistiques et leurs relations avec leurs voisins est un élément capital de l'ethos des peuples.

³⁸² Voir évolution de la forme des coques de bateau de 4000 BP à 2000 BP entre Formose et la Nouvelle-Calédonie dans (Bellwood, 2009, p. 355).

2.23. Territorialités des populations animales et humaines

Nous reprendrons en substance, un cours du Professeur Louis Constant pour ses étudiants en Droit³⁸³ : en Occident tout particulièrement, toute loi s'applique généralement à un territoire parfaitement délimité. Au XVIII^e siècle, deux ouvrages marquèrent la naissance de la sociologie, celui de l'Écossais David Hume « *Traité de la nature humaine* » (1739) et celui de Montesquieu « *L'esprit des lois* » (1748) ; ces ouvrages expriment l'existence d'une nouvelle méthode d'étude de la société, et son utilité. Hume définit lui-même son ouvrage comme un « *essai pour introduire la méthode expérimentale dans les principes moraux* » ; les principes méthodologiques de Hume seront repris par Montesquieu dans « *L'esprit des lois* » où il réfutera le postulat cartésien selon lequel des hommes créés libres ne se détermineraient qu'en fonction de leur libre volonté en écrivant ceci : « *J'ai observé d'abord les hommes, et j'ai vu que dans cette infinie diversité des lois et des mœurs ils n'étaient pas conduits seulement par leur propres fantaisies* ». En résumé, l'un comme l'autre selon des modalités différentes qui sont de l'ordre de la nuance plaidait en faveur d'une application de la méthode expérimentale aux phénomènes sociétaux et mentaux : ces deux penseurs étaient avant tout des « *observateurs* » des sociétés et des mœurs de leur époque.

Un siècle plus tard Geoffroy de Saint-Hilaire crée le terme d'éthologie qui a pour objet l'étude des comportements animaux qui devait mener parfois à une vulgarisation de l'éthologie humaine caricaturale et simpliste³⁸⁴ ; à l'instar de la nôtre, chaque époque a les best-sellers qu'elle mérite. Mais revenons à l'éthologie animale qui a pour elle le *Zeitgeist* du moment tout en permettant une approche conforme aux idées de Hume et Montesquieu avec moins de considérations d'ordre moral sur l'observation des sociétés animales. Après lecture de plusieurs ouvrages et articles, l'auteur fut subjugué par les travaux de l'éthologue français Michel Kreutzer dans un article traitant de chants d'oiseaux, relatant avec humour la territorialité de « *traditions orales locales* » différentes entre le mainland écossais et les îles. Le lien est évident avec la géohistoire de l'archipel monde qui sera l'objet du deuxième tome de cette ouvrage ; ce chapitre ne fera qu'esquisser la démarche à travers quelques exemples de territorialité humaine sur divers espaces insulaires et des observations relatives

Les processus biologiques d'occupation des niches écologiques conduisent à une territorialisation de l'espace variable en fonction des besoins en biomasse des espèces et de la richesse du milieu. Quelques hectares suffisent à une colonie de fourmis alors qu'il faut plusieurs dizaines ou centaines de km² pour un tigre solitaire. Qu'en est-il pour l'homo sapiens ? Il est clair que nous avons à faire avec un animal extrêmement territorial. Prenons le risque de mettre à contribution des méthodes de fragmentologie si familière aux écologues du paysage pour l'appliquer à la géographie politique en évitant de s'attarder sur les épiphénomènes que sont les îles partagées *de jure* ou *de facto*³⁸⁵. Supposons qu'il faille évaluer la fragmentation politique en fonction des fragments émergés composant l'archipel monde. Les grands fragments continentaux seront étudiés d'abord, indépendamment des îles. La Figure 139A montre qu'il existe une légère corrélation linéaire entre la superficie des continents *S* et le nombre de pays et territoires *Np*³⁸⁶.

³⁸³ Sociologie politique (1967), d'après les notes prises au cours de Monsieur Constans, Association amicale des étudiants en Droit et Sciences économiques de Montpellier, Editions de l'A.G.E.M., rue de la Croix d'Or, Montpellier, 53 pages.

³⁸⁴ i.e. *Le Singe Nu* » (1967) et *Le Zoo Humain* » (1970) de Desmond Morris

³⁸⁵ Nouvelle-Guinée, Bornéo, Hispaniola, Irlande, Timor, Terre de feu, Chypre, Saint-Martin, sans oublier... Usedom/Uznam en Poméranie et l'îlot de Märket entre la Suède et la Finlande.

³⁸⁶ Les territoires d'outre-mer sont assimilés à des entités indépendantes. Par exemple, dans le Pacifique, la Nouvelle-Calédonie, la Polynésie française et Wallis-et-Futuna sont comptabilisés comme trois territoires différents bien qu'étant associés à la France.

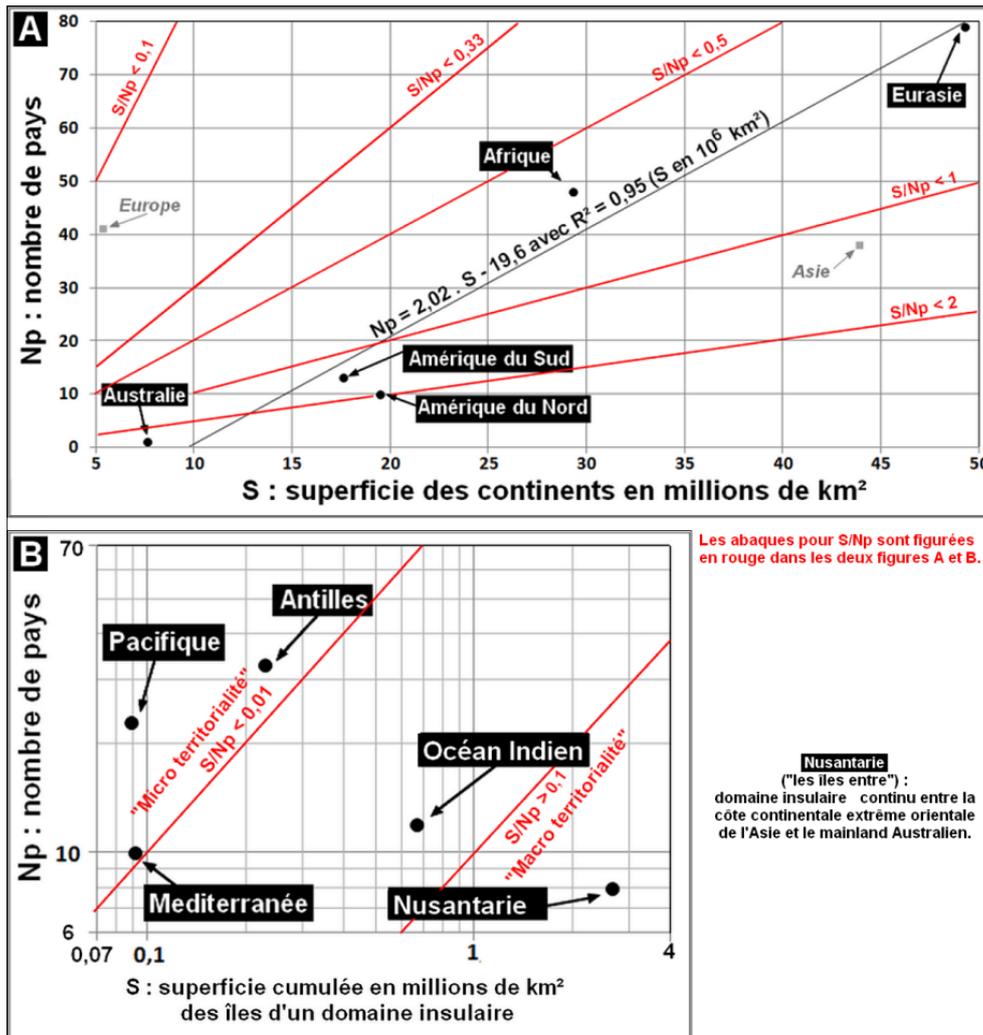


Figure 139 : Relation entre superficie des fragments et nombre de pays ou territoires
 (A) Pour les continents, corrélation linéaire significative ($R^2 = 0,95$) entre S et Np .
 (B) Pas de relation pour les domaines insulaires mais distinction entre régions « macro territoriales » (Nusantarie, $S/Np > 0,1$) et « micro territoriales » (Méditerranée, Antilles, Pacifique, $S/Np < 0,01$).

Les deux parties du continent américain ont des valeurs proches. S'il est exact que l'Amérique du Sud présente des territoires du même ordre de grandeur, il n'en va pas de même au nord puisque, à côté des grands pays que sont le Canada, les États-Unis et le Mexique, apparaît la mosaïque de l'Amérique centrale depuis le Honduras jusqu'au Panama. La notion de taille moyenne des États (S/Np) a donc un sens dans le premier cas alors qu'il n'est que statistique dans le second. Le microcontinent du mainland australien est un cas d'espèce puisqu'il n'appartient qu'à un seul pays. La même relation peut s'appliquer à des domaines insulaires ayant un cadre assez étendu tout en possédant une certaine unité géohistorique, notamment la Méditerranée, les Antilles et la Nusantarie. Pour l'Australasie et l'Océanie³⁸⁷, le choix a été fait de distinguer le domaine du Pacifique lointain au-delà du chenal entre San Salvador et Santa Cruz en y incluant la Micronésie, d'une part, et, d'autre part, l'ensemble de la Nusantarie, à savoir les chaînes insulaires et les archipels depuis les îles Nicobar jusqu'aux Salomon, plus son diverticule vers Sulawesi et les Philippines. Cet immense domaine insulaire

³⁸⁷ Etymologiquement, le terme d'Austronésie conviendrait mieux mais il fait référence à une culture et une famille de langues bien particulière qui ne se limite pas aux domaines insulaires.

inclut de grands États comme l'Indonésie, les Philippines et la Papouasie Nouvelle-Guinée, la partie insulaire de la Malaisie, ainsi que les petits pays que sont les Salomon, l'Émirat de Brunei et Timor-Leste, enfin les marges insulaires indiennes des Nicobar et des Andamans. Pour les mégastructures archipélagiques, il n'existe pas de corrélation entre la surface cumulée des fragments insulaires de chaque région (S en 10^6 km²) et le nombre de territoires (Np). Il est cependant possible de procéder à une classification empirique en distinguant les domaines insulaires « microterritoriaux » ($S/Np < 0,01$, la Méditerranée, Pacifique lointain et surtout Antilles) des « macroterritoriaux » ($S/Np > 0,1$ la Nusantarie). L'indice de territorialité géopolitique (Tg) peut également s'appliquer aux domaines continentaux. L'Australie est un cas extrême ($Tg = S/Np = 7,6$). La région insulaire la plus microterritoriale s'observe à la charnière des grandes et Petites Antilles, aux îles bien nommées Charnière (*Hinge Islands*, Figure 140). Entre la Guadeloupe et Porto Rico, ce ne sont pas moins de 12 territoires qui se partagent un domaine de 146 fragments³⁸⁸ totalisant 1788 km² : micro-États d'Antigua et Barbuda, de Saint-Kitts et Nevis, territoires britanniques des Îles Vierges (partie est), de Montserrat et d'Anguilla, territoires néerlandais de Saba, Saint-Eustache³⁸⁹ et Saint-Martin (partie sud), territoires américains des Îles Vierges (partie ouest, incluant l'île de Sainte-Croix), îles de Viéques et Culedra rattachées à Porto Rico qui fait elle-même partie du Commonwealth des États-Unis, possessions françaises de Saint-Barthélemy et de Saint-Martin (partie nord) : pour un indice de territorialité géopolitique $Tg = S/Np$, soit un territoire moyen de 149 km²³⁹⁰.

A priori, il est logique que la fragmentation géopolitique des espaces insulaires soit plus marquée que dans les domaines continentaux ce qui se reflète par les valeurs de Tg : de 0,6 à 7,6 pour les continents, 0,07 à 0,33 pour les domaines insulaires. Toutefois en ne considérant que l'Europe sans la Russie, cette partie continentale présente un indice de territorialité de 0,129 si bien qu'elle s'avère plus fragmentée géopolitiquement que le monde insulaire nusantarien qui a un indice Tg de 0,33.

Cette façon de traiter de façon concomitante la fragmentation des terres émergées et un fait géopolitique simple tels que les territoires pays s'inspire en partie du titre du livre « Our fragmented world : an introduction to political geography » publié en 1975 (East & Prescott, 1975). La géographie politique a été considérée comme une « moribond backwater » jusqu'au début des années 80, pour reprendre l'analyse et les termes de Peter Taylor (1991). A la même époque que cet article lors de l'effondrement de l'URSS, Francis Fukuyama évoquait « La fin de l'Histoire » n'ont pour signifié la fin des conflits et le triomphe de la « bonne cause » mais plutôt l'avènement d'une nouvelle donne planétaire dont ne sait ce qu'elle impliquera. La géographie, l'histoire passe, les idées vieillissent ou ressuscitent, comme nous l'ont appris les trente dernières années : la responsabilité des chercheurs, des géographes et historiens en particulier n'est pas de répondre aux questions du moment mais bien d'envisager celles de demain en ayant une vision large et profonde du phénomène humain tel qu'il s'exprime dans l'espace et se développe dans le temps en particulier à l'échelle globale. Tel sera le propos du tome 2 du présent ouvrage en s'appuyant sur une analyse sérielle des processus géohistoriques. L'archipel monde sera-t-il moins ou plus divers dans le futur ? Parmi les enjeux actuels, celui de la biodiversité insulaire peut avoir une valeur paradigmatique. De plus, les micro-états insulaires et les territoires ultramarins sont des parties prenantes incontournables de la biodiplomatie internationale.

³⁸⁸ Source GSHHG, $S_i > 0,06$ km².

³⁸⁹ Saint-Eustache et Saba sont devenus des territoires à part entière des Pays-Bas depuis le 10/10/2010, faisant ainsi partie intégrante de la CEE. Le sommet de Saba (887 m) est, depuis, le plus haut sommet de ce plat pays.

³⁹⁰ Cette superficie est du même ordre de grandeur que l'île de Montserrat (100,4 km²) ou les Îles Vierges britanniques (153 km²).

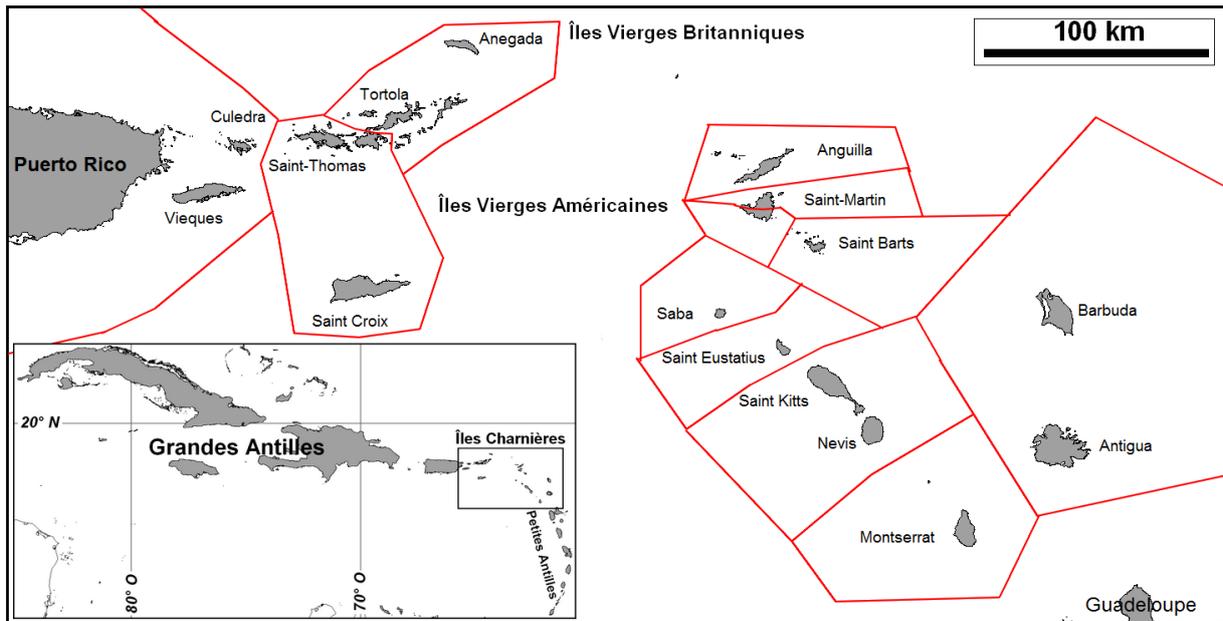


Figure 140 : Les îles Charnière (*Hinge Islands*, 1788 km²) entre les Grandes et les Petites Antilles constituent le domaine insulaire le plus fragmenté politiquement avec 12 territoires.

Miscellanées



CI/JIC	Île	Autre noms	km	Code mer	Pays
7140	Antigua		284	32	AG
8350	Saint Croix		221	32	US
9890	Saint Kitts		174	32	KN
14220	Montserrat		100	32	GB
14960	Saint-Martin	Sint Maarten	94	32	NL et FR
35120	Saint-Barthélemy	"Saint Bart"	23	32	FR
35550	Saint-Eustache	"Statia"	22	32	NL




Territorialité animale : le cas des chants d'oiseaux entendus par un éthologue

En prenant garde de changer ce qui convient de l'être, le domaine de l'éthologie animale n'est pas sans offrir quelques similitudes quant à la variation des comportements territoriaux en fonction des lieux, cela pouvant être observé en étudiant le chant des oiseaux ; dans une étude dont le titre est « un demi-siècle de chants d'oiseaux », l'éthologue Michel Kreutzer fait état de "traditions orales locales" chez les mâles de la gentie ailée à la fois pour marquer leur territoire et attirer une partenaire :

"On relève en outre des variations géographiques et des dialectes [de vocalisation] au sein des espèces [d'oiseaux] : certains motifs ou chants ne sont émis que par quelques congénères voisins ou dans certaines contrées plus ou moins étendues. Et puisque les auteurs constatent que ces dialectes et variations géographiques persistent pendant un nombre d'années bien supérieur à l'espérance de vie que peuvent avoir ces mâles en nature, un constat va s'imposer : il existe une tradition orale qui maintient les particularités locales ; les jeunes apprennent les chants émis par les adultes dans la région où ils ont éclos, ou bien où il se sont installés." (Kreutzer, 2014, p. 2)

Cet auteur précise qu'un oiseau venant à se trouver dans un lieu de dialecte différent mais venant de la même espèce saura qu'il a à faire à un congénère sans pour autant être familier de la vocalise. Il poursuit en précisant que les spécialistes de l'éthologie dans les années 50 se disputèrent pour savoir ce qui relève de l'inné et de l'acquis, soit en termes plus savants les hypothèses objectiviste et behavioriste. Cette dernière se voudrait *"valide pour toutes les espèces animales, y compris l'humain"* (Kreutzer, 2014, p. 3). Depuis chacune d'entre elles s'est vue invalidée par des expérimentations et des observations de sorte que, nécessité faisant loi, il fallait trouver un nouveau paradigme capable de rendre compatibles des comportements relevant parfois de l'instinct et pour partie de l'apprentissage. L'analyse de Kreutzer se poursuit en décrivant "certains effets insulaires" qu'il ne nous est pas possible de détailler ici ; en résumé, il s'agit de deux espèces de pinsons et mésanges charbonnières qui partagent les mêmes biotopes mais sur des niches différentes dans une large partie de l'Europe.

"Ces résultats suggèrent que la coexistence de ces deux espèces est limitée sur l'île car elles se nourrissent de la même manière et que cela a abouti à une territorialité interspécifique, non visible dans l'environnement plus riche du continent." (Reed, 1982)

Ces observations démontrent que sur le mainland écossais, il n'y a pas de compétition interspécifique si bien que les territoires individuels des mâles des deux espèces se recouvrent. Il en va tout autrement sur les îles, en particulier sur celles situées à l'ouest de l'Ecosse où il y a exclusion compétitive et lutte interspécifique.

2.24. Biodiversité et paléogéographie des îles

Le cas des papillons de Hanski aux îles Aaland n'est pas sans rappeler les fameux pinsons de Darwin aux Galapagos. Il apparaît patent que pour établir un modèle dynamique sur un espace occupant un espace fragmenté, on doit disposer d'une fonction de DDM de l'espèce végétale ou animale évoluant, au sens double du terme, entre ces fragments. En élargissant le débat du terrain strictement scientifique à celui des enjeux environnementaux et de la biodiplomatie, il faut préciser quel est le positionnement et la vocation de la nissologie nomothétique dans le cadre d'un enjeu aussi capital que l'inventaire et la protection des *hot spots* de la biodiversité insulaire. Outre les états, notamment, d'autres acteurs internationaux ont un poids notable en matière de stratégie mondiale concernant la biodiversité aussi bien terrestre, côtière que océaniques dont le *Global Island Partnership* (GLISPA), *Conservation International* (CI), du *World Conservation Monitoring Centre* (WCMC/UNEP), l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) et plus spécifiquement *Island Conservation* (IC)³⁹¹. Une géopolitique de la biodiversité insulaire se traduit par des projets à diverses échelles tels que résumés dans la Figure 141 ; la nissologie nomothétique se situe aux étapes 2 et 3, qui sont celles de production/validation des données et de mise en forme géographique de l'information (télédétection et SIG) et de modélisation des processus de spéciation et de dispersion de type écologie du paysage couplée à des processus de flux entre les fragments écosystémiques.

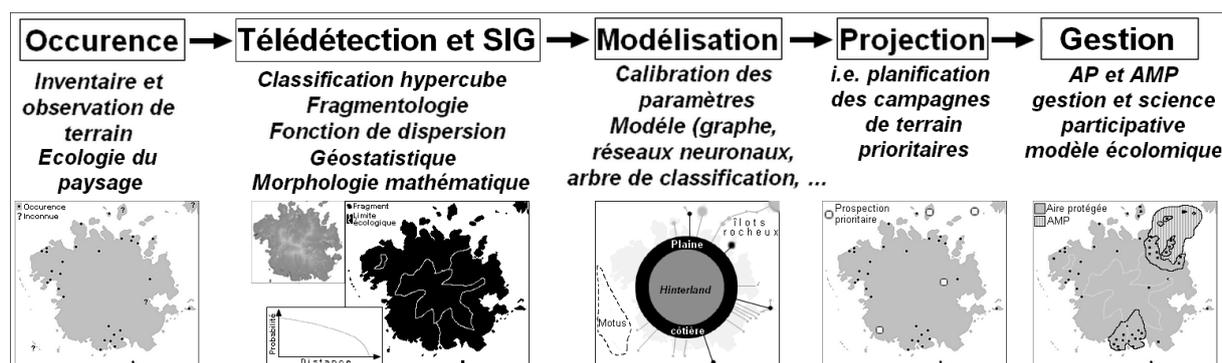


Figure 141 : flowchart du fonctionnement des tâches pour la préservation de la biodiversité sur l'exemple de l'île de Pohnpei (Ponape) dans les États fédérés de Micronésie³⁹²

Pourquoi les îles et particulièrement les petites voire les toutes petites îles ont-elles autant d'importance aux yeux des biologistes, biogéographes et biodiplomates ? Face au changement climatique, à la remontée du niveau marin, aux processus de compétition interspécifique avec les espèces introduites et à la fragmentation des milieux naturels sous l'effet des activités humaines, les isolats marins présentent plusieurs avantages, d'où leur qualification d'« îles refuge » à plusieurs échelles.

³⁹¹ GLISPA promeut des actions visant à préserver (conservation) les îles et les modes de vie (*livelihood*) durable en suscitant (*inspiring*) un leadership, en catalysant les initiatives, et en facilitant les collaborations. Le WCMC collabore avec des scientifiques et des décideurs politiques pour que la biodiversité soit mieux prise en compte dans le cadre d'une biodiplomatie mondiale. CI a pour vocation de protéger la nature dont nous dépendons pour l'alimentation, les ressources en eau et la qualité de vie ; CI achètent des terrains mis en défens pour de futures prospection de la biodiversité ou ayant vocation à devenir des aires protégées. L'UICN "aide le monde à trouver des solutions pragmatiques aux défis de l'environnement et du développement les plus pressants", en particulier en apportant son appui à la recherche scientifique. IC promeut la conservation et la restauration des écosystèmes insulaires, le développement durable des îles, et la sensibilisation à leur vulnérabilité et leur importance vitale pour la biodiversité de la planète. GLISPA est une émanation du PNUE/NU, le WCMC une fondation du gouvernement britannique associée au PNUE/NU, alors que CI, UICN et IC sont des ONG.

³⁹² D'après Bertelsmeier, Univ. Lausanne, « Prédiction de la distribution spatiale en écologie », 2016

- Échelle globale : l'Amérique du Sud et plus encore l'Australie et ses extensions biogéographiques sahuliennes de la Nouvelle-Guinée et de la Tasmanie sont les terres d'élection des marsupiaux et les monotrèmes ;
- Échelle régionale : les lémuriers de Madagascar, certaines espèces de ratites géants disparus récemment, dont l'æpyornis († vers 1000) ou le moa (genre *Dinornis*) en Nouvelle-Zélande († vers 1500) ;
- Échelle locale : les derniers mammouths nains disparus, il y a trois mille ans sur l'île arctique de Wrangel, les espèces d'éléphants et d'hippopotames nains de diverses îles de la Méditerranée notamment en mer Égée disparus pendant la période néolithique (Figure 142A) ; en Indonésie, le varan géant, ne se rencontrant que sur l'île de Komodo et sur quelques îlots périphériques ;
- Échelle micro-insulaire : le sphénodon (tuatara) ne compte que 2 espèces du genre *Sphenodon* des Lépidosauriens. Il est vieux de 200 millions d'années, fut contemporain des dinosaures du Secondaire et ne subsiste que sur trente-deux îlots au large des grandes îles de la Nouvelle-Zélande (Figure 142B).

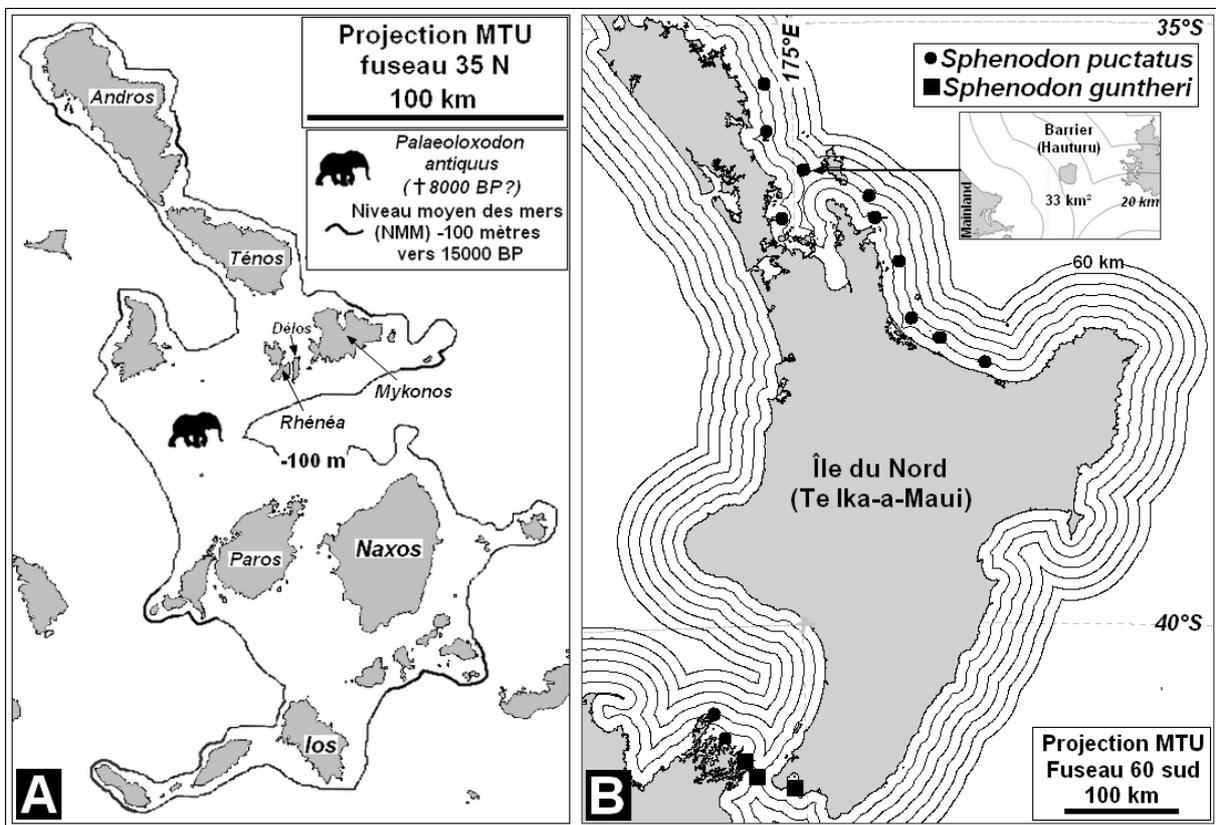


Figure 142 : Exemple d'îles refuge

- (A) Éléphant nain (*Palaeoloxodon antiquus*) sur l'île des Paléo-Cyclades vers 15000 BP
 (B) Distribution actuelle du Sphénodon sur 29 îlots périphériques (Nouvelle-Zélande)

Une espèce d'éléphant nain *Palaeoloxodon antiquus* occupe vers 15 000 BP la paléoîle des Cyclades qui s'étend sur 5600 km² et comporte de larges plaines traversées par des fleuves dans une zone refuge du sud de l'Europe alors englacée (van der Geer, Lyras, & van den Hoek, 2014). La transgression marine jusqu'en 7000 BP va progressivement donner naissance à 170 îles dont la plus grande, Naxos, ne couvre que 439 km². Le rétrécissement des pâturages limités à de minces plaines côtières au pied de montagnes, combiné à l'arrivée des premiers agriculteurs venus d'Anatolie eut raison du petit pachyderme vers 8000 BP ;

l'ultime population d'éléphants nains de la mer Égée (*Elephas tiliensis*) disparut vers 6000 BP sur la modeste île de Tilos (65 km²) dans le Dodécanèse voisin. Si le facteur environnemental a contribué de façon certaine à fragiliser une espèce désormais divisée en plusieurs petits pools génétiques, il n'en demeure pas moins que la concomitance de sa disparition avec l'arrivée des premiers agriculteurs fait que le facteur humain ne peut être écarté. Dans un article de synthèse sur la disparition de la méga faune insulaire³⁹³ suite à leur occupation par l'homme (Kouvaria & van der Geer, 2018, p. 295) :

"All islands lost their heaviest mammal species, whereas maximum surviving mammalian body size differs per archipelago, ranging from heavier than 100 kg (Philippines) to below 100 g (Canaries) and no surviving native mammals on the Galapagos. Major parts (almost 80%) of extinctions of insular endemics took place after the first human arrival, with the highest percentages during the Late Pleistocene (34.5%) and the Modern Era (31%). Whether these extinction waves follow a fast or slow scenario ("blitzkrieg" versus "sitzkrieg") remains unclear, but the gradual increase in extinctions through the Holocene, with a peak (31%) in the last 500 years, is suggestive of a slow scenario."

Selon ces auteures, distinction doit être faite entre un carnage type *blitzkrieg* dès l'arrivée des populations humaines d'une part, et une lente érosion des populations et du nombre d'espèces sous l'effet d'une dégradation progressive des milieux naturels soit une *sitzkrieg*³⁹⁴ d'autre part. Cette lutte pour l'espace entre milieux naturels et anthropisé l'apparente à une "guérilla" se traduisant par un grignotage des milieux naturels par des *encroachment* progressifs des activités humaines. Il est probable que les deux processus se combinent lors de l'arrivée des premiers hommes avec en phase initiale une « guerre éclair » suivi d'une guérilla « rampante ». Le phénomène ne se limite pas aux îles mais aussi aux continents parfaitement illustré par la culture dite de Clovis en Amérique à partir de 12000 BP et le « front » de disparition de la méga faune depuis l'Alaska jusqu'en Patagonie , (Lecointre & al., 2009). La rapidité du processus et le fait que la culture Clovis ait disparu une fois achevé le carnage démontre que des peuples de chasseurs-cueilleurs déviennent « prédateurs » lorsqu'ils disposent d'un front d'expansion leur offrant des ressources alimentaires apparemment infinies. Le phénomène se retrouve avec une moindre soudaineté en Australie vers 60 000 BP.

Qu'en est-il pour les plantes ? Nous nous limiterons à citer quelques exemples ayant un intérêt botanique ou alimentaire. Le dragonnier endémique des Canaries *Dracaena draco*, connu chez les Anciens sous le nom de sang-dragon, ne se retrouve que de l'autre côté de l'Afrique sur l'île de Socotra avec l'espèce *Dracaena cinnabari*. Le cas le plus emblématique et le plus rocambolesque est celui du *Lodoicea maldivica* qui, malgré son nom, ne vient pas des Maldives mais de deux îles de l'archipel Seychelles ; la confusion tient à ce que le « coco de mer » est longtemps resté une énigme puisque les marins fréquentant l'océan indien ainsi que les habitants de ses côtes connaissaient cette graine énorme flottant en pleine mer ou s'échouant sur les plages sans connaître l'arbre capable de les produire. Face à ce mystère, cette sorte de noix de coco « callipyge »³⁹⁵ se verra associée à des fantasmes ou croyances magiques du fait de sa taille et de sa forme . Encore actuellement, les Ceylanais ont pour

³⁹³ L'insularité provoque des phénomènes de nanisme ou au contraire de gigantisme variables en fonction des taxons considérés. La "méga faune" peut donc inclure des espèces naines en particulier pour les mammifères.

³⁹⁴ *Sitzkrieg* soit "guerre assise" en Allemand correspondant à la période de la "drôle de guerre" de septembre 1939 à mai 1940.

³⁹⁵ Fait référence à la vénéus callipyge hottentote. Les matelots appelaient l'objet flottant "coco fesses".

coutume d'accrocher dans leurs maisons les cocos de mer trouvés sur le rivage en gage de protection, de fécondité et de bonne fortune³⁹⁶. Pour les botanistes, il est surtout connu pour produire la plus grosse graine au monde, le « coco de mer ». D'un point de vue écologique, cette plante reste une énigme puisqu'elle ne pousse qu'en des lieux particuliers dans la partie amont de quelques vallées sur Praslin et de sa voisine Curieuse (Fleischer-Dogley & al., 2010), comme indiqué dans la Figure 143B. L'étude génétique montre un brassage des populations des deux îles du fait de la dissémination des pollens par le vent. Des différences phénotypiques marquées dénotent une plasticité adaptative. En revanche, la dispersion des graines, qui pèsent environ 20 kg, ne peut se faire que par gravité le long des pentes et par transport dans les rivières jusqu'à la côte. Pour comprendre la dynamique des peuplements de cocos de mer, il faut considérer une fonction de dispersion importante pour les pollens, couplée à une fonction beaucoup plus aléatoire pour les graines. Dans la mesure où les cocos de mer ne germent pas en dehors des îles Curieuse et Praslin, peut-être faut-il y voir une incapacité des graines à germer en bord de mer alors que forêts reliques actuelles se trouvent à l'intérieur des terres. De plus, ces deux îles ne sont que la partie émergée du plateau continental des Seychelles qui couvrent environ 50 000 km²³⁹⁷ au-dessus de l'isobathe 100 mètres et n'ont été séparées des autres îles que depuis environ 10 000 ans (Figure 143A). Il est probable pour ne pas dire certain qu'à cette époque l'extension des habitats était plus large et aurait dû se retrouver dans les autres grandes îles collinaires : Mahé, Silhouette et La Digue.

Le phénomène de rétrécissement des terres observé pour la microplaque des Seychelles lors de la dernière déglaciation est comparable dans son principe à celui observé pour la paléo île des Cyclades (Voir Figure 142A). L'évolution biogéographique de ces deux archipels est détaillée dans le tableau de la Figure 144 ; en remplaçant la comparaison dans le cadre des processus DDM, le coco de mer est lié à une fonction de dispersion au gré des courants océaniques alors que dans le cas de l'éléphant nain des Cyclades il faut envisagé un modèle simulant les flux migratoires soit une fonction migratoire ; pour les cocos de mer, la dissémination des pollens par les vents et les oiseaux se fait entre Praslin et Curieuse, ce qui donne une diffusion dépassant 5 km. Le rayon de dispersion de leurs graines géantes est quant à lui très grand puisqu'il s'étend sur toutes les côtes de l'océan Indien sans que l'on sache si le délai de dérive est plus long que le temps pendant lequel le germe reste vivant³⁹⁸. Il y a donc flux de gènes entre les deux îles et entre les isolats de chacune d'entre elles mais pas échange de graines entre les îles et les isolats qui se trouvent dans des vallées distinctes séparées par des crêtes. Le cas des éléphants nains aujourd'hui disparus des Cyclades est plus difficile à cerner. La diminution de territoire est certes moins forte que sur les Seychelles³⁹⁹, mais l'île principale de Naxos ne représente que 25 % du total du néoarchipel des Cyclades alors que Mahé totalise 62 % des Seychelles. Dans le cas de dispersion interinsulaire d'une mégafaune de type éléphant, il est clair que la largeur des chenaux doit être considérée même si les proboscidiens sont habituellement de bons nageurs. La valeur moyenne d'espacement entre les îles des Cyclades quelle que soit leur taille est de 12 km. Toutefois cette moyenne n'est qu'un indicateur car ce qui importe est la largeur des chenaux marins entre les grandes terres avec ou sans îlots intermédiaires. Par exemple, la distance entre Naxos et sa voisine Paros est de 5 km avec quelques minuscules îlots pouvant servir d'étape et s'avère du même ordre entre Mykonos et Rhénée mais avec l'îlot de Délos entre les deux (voir Figure 142A)

³⁹⁶ Communication personnelle d'André Louchet.

³⁹⁷ Soit approximativement la taille de la Tasmanie.

³⁹⁸ La même question s'applique pour les noix de coco, depuis leur foyer originel indonésien jusqu'au reste du monde.

³⁹⁹ Phénomène de *shrinking islands* de 6,8 % au lieu de 0,3 %.

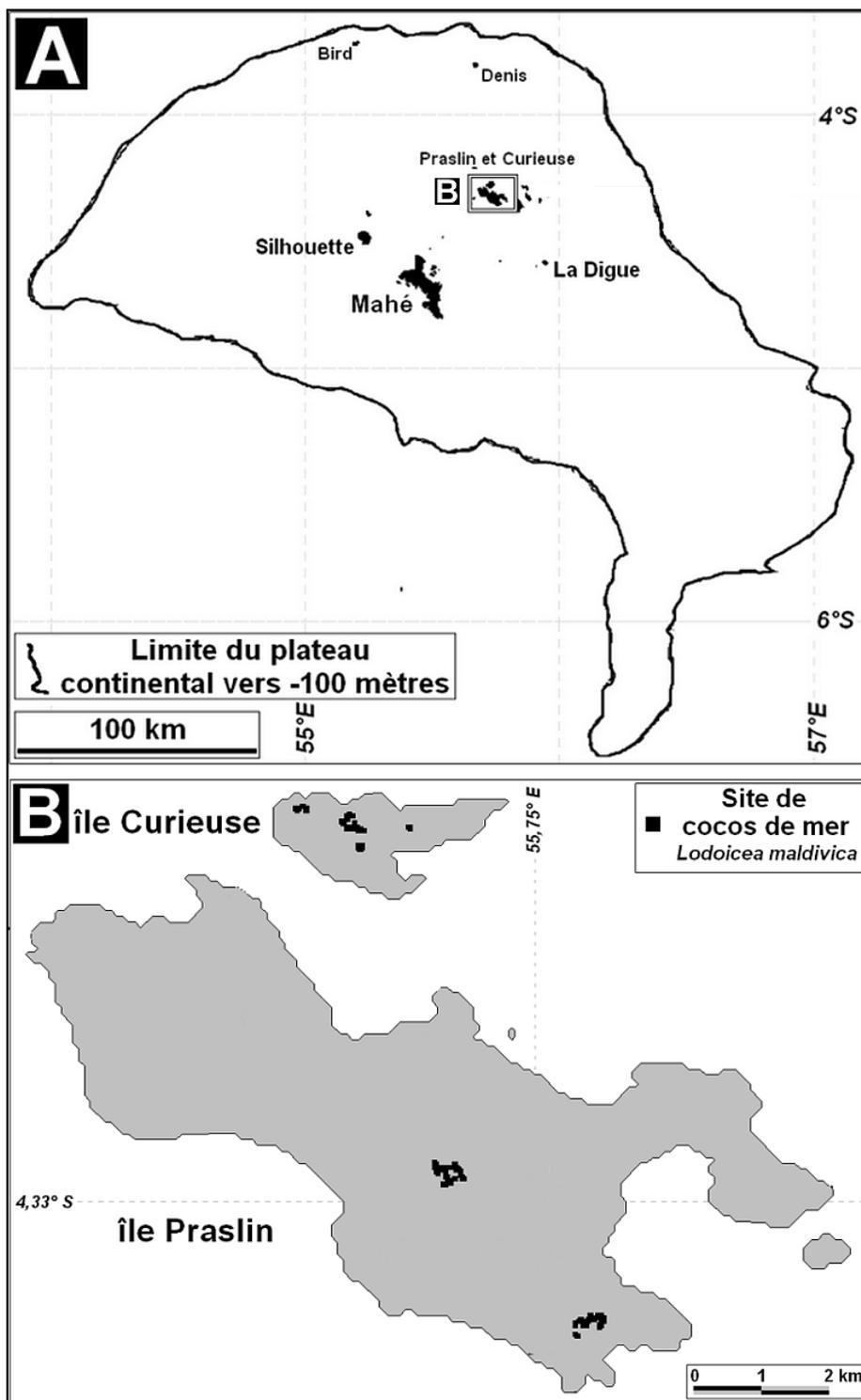


Figure 143 : Groupe des îles granitiques des Seychelles.
 (A) Plateau continental (Bureau hydrographique du Royaume-Uni., 1882-1988).
 (B) Sites de cocos de mer sur Praslin et Curieuse (Fleischer-Dogley & al., 2010).

Paléo grande île vers 15000 BP	Superficie paléo île Sp en km ²	Nombre "néo îles" post glaciation Nni	Surface des néo îles Sni en km ²	Rétractation* des terres 100.Sni/Sp %	La plus grande néo île Smax en km ²	Surface relative 100.Smax/Sp %	Surface relative 100.Smax/Sni %	Densité Insulaire Di2 Di2=10000 ² Nni/(Sp-Sni) f/10000 km ²	Largeur moyenne des chenaux Lm=2.(Sp/Nni) ^{0,5} Lm en km	Population considérée
Paléo Cyclades	6500	171	1770	27,23	Naxos 439 km ²	6,8	24,8	361,5	12,3	éléphants nains
Paléo Seychelles	50000	37	255	0,51	Mahé 159 km ²	0,3	62,4	7,4	73,5	cocos de mer

* Shrinking islands*

Figure 144 : Comparaison des conséquences de l'ennoiement des grandes paléo îles sur le "rétrécissement insulaire" (*shrinking islands*) entre la paléo Cyclades et la paléo Seychelles.

L'évolution paléogéographique des Cyclades et ses conséquences sur celle des flux inter îles rappellent fortement, la notion de transition de phase géographique à la façon de Pierre-Gilles de Gennes entre une grande paléo île et un archipel de "néo îles" (Voir Figure 16) s'est faite progressivement entre 15 000 et 7000 BP (Voir Figure 78) ; ce laps de temps a dû permettre une adaptation progressive des petits pachydermes à leur nouvel environnement fragmenté en développant des aptitudes et des comportements leur permettant de traverser les nouveaux chenaux marins et de maintenir ainsi des métapopulations génétiquement viables en particulier sur les îles proches telles que Naxos et Minoas, Mykonos et Rhénéea via Délos, Andros et Ténos ainsi que l'île d'Ios et son groupe.

Les deux exemples du coco de mer aux Seychelles et des éléphants nains aux Cyclades montrent le lien étroit qui existe entre la dynamique des populations et l'évolution de la fragmentation des terres. Dans la première phase, le *pool* génétique est important, avec sans doute une faible diversité d'espèces, de sous-espèces ou de variétés, alors que, dans la seconde, les pools génétiques sont plus réduits et donc plus exposés à un endogamisme délétère s'il est accessif mais présentent une plus grande variété évolutive allopatrique, qui peut aboutir à un micro-endémisme insulaire au sein de populations ou de métapopulations autorisant le maintien de quelques flux reproducteurs entre les groupes d'îles et d'îlots proches. Il va de soi que l'élément le plus difficile à déterminer de façon précise est la fonction de dispersion de chaque espèce, notamment pour les animaux dont une part de l'adaptation est d'ordre comportemental et pas seulement adaptative au sens physiologique et physiologique.

2.25. Géomatique et « chasse au trésor » de la biodiversité insulaire

Par-delà l'allusion au livre de Robert-Louis Stevenson, l'état de l'art en matière d'évaluation des biodiversités potentielles micro insulaires reste assez tatonnante à ce jour alors que les enjeux sont importants. De part son caractère emblématique pour notre propos, nous nous inspirerons d'une étude menée sur les petites îles de la Méditerranée (PIM) en tant que « sentinelles de la biodiversité » par une équipe de biologistes de la conservation (Renou, 2012, p. 12). Le projet met en avant à juste titre que les petites îles de la Méditerranée recèlent un « trésor » de biodiversité dont elles sont « le premier joyau » :

« Pourquoi les îles, et petites de surcroît ? La Méditerranée enferme un trésor et ses petites îles en sont le premier joyau. Sans dénigrer les nombreux et vaillants rochers balayés en permanence par les flots, nous ne nous intéresserons ici qu'aux espaces séparés de la terre où pousse une végétation permanente. Il en existe plus de 10 000 en Méditerranée et 1 200 dans le bassin occidental. Protégées par leur relative inaccessibilité, les îles sont souvent mieux préservées que le reste du littoral. Elles jouent le rôle de conservatoire des reliques disparues sur les terres et de banque de gènes pour la biodiversité méditerranéenne et mondiale. »⁴⁰⁰. (Renou, 2012, p. 12)

⁴⁰⁰ Ces propos font écho à l'heureuse formule « Petites îles, grands enjeux » de la réunion internationale de Maurice sur les Petits États Insulaires en Développement (PEID/SIDS) de janvier 2005.

La citation ci-dessus comporte une once de lyrisme comme il est d'usage pour évoquer les îles, auquel s'ajoute un effet d'annonce sur l'existence de 10 000 « espaces séparés de la terre où pousse une végétation permanente » tout en laissant de côté de « nombreux et vaillants rochers ». La méthode consiste donc de poétiser le sujet tout en lui donnant un vernis de scientificité avec des chiffres « orphelins » dont la source est inconnu même pour les responsables du projet. Le lecteur retrouve là « l'effet chapeau » déjà mentionné et développé au début de cette ouvrage à propos des îles norgéviennes et du Japon (Voir page 55). Le temps passant, il y a inflation insulaire en 2014 ; le projet annonce le chiffre de « 15 000 petites îles exceptionnellement conservées » toujours sans aucune référence⁴⁰¹.

A défaut de sources indiquées par le projet, la méthode superficie-nombre (SN) appliquée aux îles de la Méditerranée (voir Figure 32) fournit une fonction de distribution statistique entre la superficie S des fragments émergés et leur nombre N :

$$N=569.S^{-0,554} \text{ soit en l'inversant } S=(N/569)^{1/-0,554}$$

La méthode inversée permet de mieux cerner à quoi correspondent ces chiffres qui semblent « sortie du chapeau » :

- En 2012, les 10 000 « *espaces séparés de la terre où pousse une végétation permanente* » (2012) correspondent à des fragments émergés de plus de 0,56 hectares soit des îles et îlots de 75 mètres de côté (« pixel ») ;
- En 2014, les 15 000 « petites îles exceptionnellement conservées » (2012) font référence à des terres isolées de plus de 0,27 hectares soit des îles et îlots de 50 mètres de côté (« pixel ») ;
- Les autres terres menues inférieures à ces seuils sont les « nombreux et vaillants rochers balayés en permanence par les flots ».

Les superficies seuil de 0,56 et 0,27 hectares, soit des « pixels » de 75 et 50 mètres, sont de l'ordre de grandeur de couverture satellitaire du type Landsat-1 à Landsat-8 (1972-2013) avec des résolutions variant entre 79 et 30 mètres. Est-ce une nouvelle campagne d'inventaire par télédétection avec de nouveaux capteurs ayant une meilleure résolution qui a permis cette évolution entre 2012 et 2014 ? Est-ce les critères de surface minimale qui ont été changés ? Le lecteur n'a aucun moyen de le savoir mais on supposera qu'il n'en est pas de même pour les scientifiques et autres parties prenantes. En terme opérationnel pour le projet PIM, il apparaissait fondamental d'avoir une méthode pour pré sélectionner les 10 000 ou 15 000 « îles et rochers » méditerranéens supposées car il n'est pas envisageable d'effectuer des missions de prospection de la biodiversité sur chacun d'entre eux. En compilant diverses sources, il semble que 29 îles "représentatives" des 15 000 annoncées aient été finalement retenues (Figure 145).

Notre propos étant de démontrer que la nissologie nomothétique à une valeur opérationnelle par rapport à des problèmes concrets, on ne peut que se désoler que des chiffres sur le nombre d'îles soient livrés sans qu'aucune classe de superficie ne soit définie et sans référence. Comme vu précédemment, il est possible de déduire à quoi correspondent ces nombres orphelins connaissant les propriétés des espaces insulaires et en utilisant la

⁴⁰¹ Cf. le magazine de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, article de presse paru le 18 avril 2014 évoquant le projet PIM : "La Méditerranée recèle un trésor méconnu : 15 000 petites îles, exceptionnellement préservées.". Est-ce une erreur ? https://www.sauvonsleau.fr/jcms/c_7111/tavolara-une-ile-vierge-tresor-de-nature#.XEWWh3FVKipo

méthode superficie-nombre telles que commentées sur le cas de la Norvège (Figure 29), d'où une estimation possible de la gamme de superficie considérée et la superficie minimale des fragments insulaires inventoriés.

Un aperçu des îles sélectionnées au regard des critères retenus par le projet apparaît nécessaire. Par exemple, les îles sélectionnées le long de la côte tunisienne et dans l'archipel maltais correspondent à divers contextes.

- Îles situées sur le plateau continental et autrefois connectées au mainland pendant le dernier maximum glaciaire à une distance variant de 10 à 25 km du rivage africain : Kerkennah, Kuriat, Zembrat et Zembretta ;
- Île de la Galite détachée du continent sans en être éloignée ;
- Îlot de Comino entre Malte et Gozo mais éloignée de la Sicile ;
- Minuscule îlot de Filfla à 5 km au sud de Malte.

L'impact anthropique diffère d'une île à l'autre. La densité de population est de 100 ha(B)km² pour Kerkennah, Kuriat est occupée par un phare, Zembrat et Zembretta font partie d'une aire protégée mais sont occupées par des espèces invasives importées, comme les lapins ou les rats. La Galite n'est occupée que par quelques familles de pêcheurs. Comino, autrefois habitée et réserve de chasse, est de nos jours inhabitée. Le rocher tabulaire de Filfla a une histoire singulière puisqu'il était utilisé comme cible par la marine britannique, ce qui lui valut jusqu'à l'indépendance de Malte d'être enregistré comme *Her Majesty Ship* (HMS) par l'Amirauté. En dépit de ces rudes canonnades, une espèce de lézard et une espèce d'escargot sont endémiques à ce caillou escarpé de 5 hectares. A l'échelle du « gisement » de biodiversité micro insulaire de la Méditerranée, il est probable que le critère de « conservatoire des reliques disparues sur les terres et de banque de gènes » se trouve vérifié pour la plupart des îlots de quelques hectares ou km² du projet, il n'en va pas de même pour les îles de Kerkennah, Milos et Santorin, les deux îles grecques subissant une forte pression touristique en plus de leur population permanente. Certaines des îles et îlots sont déjà protégées et même sanctuarisées comme Port-Cros, d'autres sont en périphérie urbaine plus ou moins préservée en tant que terrain militaire comme une des îles du Frioul. Toutefois, l'échantillonnage de 29 îles sélectionnées parmi les 10 000 possibles ne paraît pas tout-à-fait cohérent par rapport aux objectifs spécifiques du projet.

Des initiatives régionales comme celle du projet PIM ont toute raison d'être mais supposent un fort investissement scientifique dans la sélection des sites d'études prioritaires potentiellement riches de biodiversité plus ou moins menacés. Cela revient à poser la question suivante : Comment augmenter la probabilité de trouver un « trésor » de biodiversité, voire une espèce nouvelle ou disparue ailleurs, sur des îlots souvent difficiles d'accès ?⁴⁰² La contribution des nouveaux capteurs satellitaires haute résolution et multispectraux ou les drones peuvent contribuer en partie à relever le défi pour peu qu'ils soient intégrés dans une démarche SIG globale et étroitement associés aux écologues de terrain et aux modélisateurs. Pour évidente et de bon sens, cette remarque n'en reste pas moins peu pratiquée tant les deux communautés des biologistes et des géoscientifiques peinent à mieux intégrer leurs compétences et savoir faire respectifs.

⁴⁰² Les chasses au trésor micro insulaire ne se limitent pas seulement à un défi scientifique mais aussi logistique et financier. Une démarche visant à optimiser les campagnes à la mer fort coûteuses ne pourrait que satisfaire les bailleurs de fond, notamment les fondations des entreprises privées (i.e. EDF mécénat, Total) espérant un retour sur investissement sous la forme de découverte de nouvelles espèces susceptibles de toucher le grand public et faire le *buzz* sur les médias : le *greenwashing*.

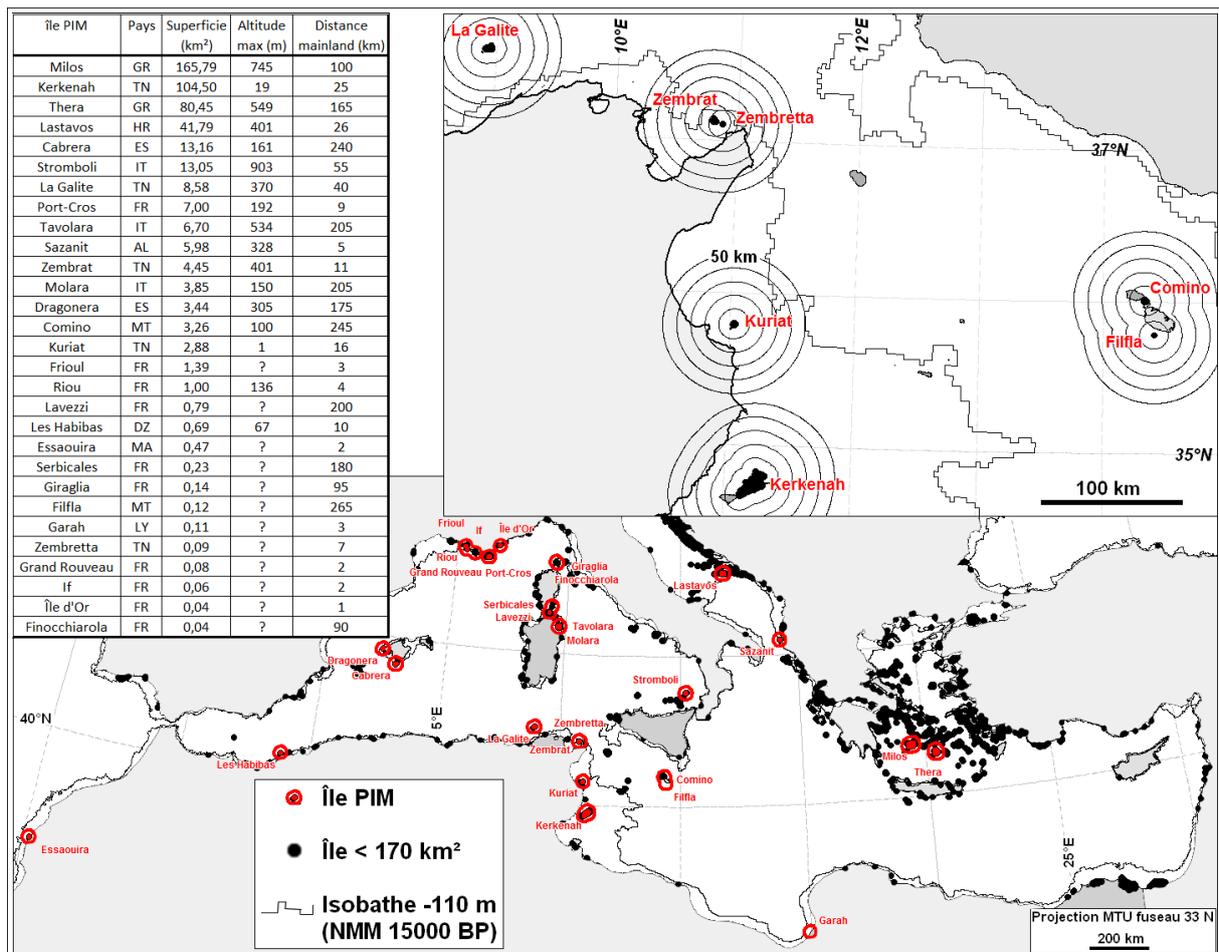


Figure 145 : les 29 « petites îles » (<170 km²) sélectionnées dans le cadre du projet PIM

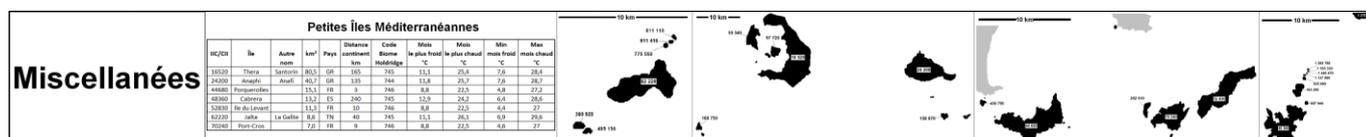
Par-delà la Méditerranée et le projet commenté ci-dessus, il s'avère que même des îlots minuscules essentiellement rocaillieux ou rocheux peuvent être les ultimes sanctuaires pour des espèces disparues, éradiquées sur les mainland locaux. Deux exemples illustrent cette dichotomie entre mainland dégradé et îlots voire rochers périphériques préservés. Le plus connu est celui du phasme géant endémique de l'île de Lord Howe (*Dryococelus australis*) entre l'Australie et la Nouvelle-Zélande, qui fut considéré comme éteint depuis la fin du XIX^e siècle jusqu'à ce qu'en 2001 des alpinistes australiens décident d'escalader l'aiguille de roche quasi verticale émergeant de la mer de Ball's Pyramid à 15 km du mainland. De disparu, le statut de cet insecte « ressuscité »⁴⁰³ devint celui d'une espèce en danger qui devait être réintroduite sur le mainland de l'île de Lord Howe. L'autre exemple vient de l'îlot Saint-Paul dans les Terres australes et antarctiques françaises (TAAF). Du fait de la présence de rats sur le mainland (7 km²), le seul refuge qu'avaient trouvé les oiseaux de mer pour nidifier était une colonne de roche de quelques hectares, le Rocher de la Quille. La seule solution fut d'éradiquer les rats en 1999, ce qui permit au mainland de redevenir un site de nidification et d'augmenter la population et la diversité des oiseaux.

Etudier la biodiversité micro insulaire ne peut passer sous silence les opérations d'éradication d'espèces invasives menées à travers le monde car elles sont d'autant envisageables à des coûts raisonnables que les îles sont petites. A l'instar de l'îlot de Saint-Paul (7 km²), sa grande voisine Amsterdam (52 km² TAAF) fait l'objet de la part du

⁴⁰³ Lorsqu'une espèce éteinte voire fossile est redécouverte, tel le coelacanth, les biologistes évoquent un « effet Lazare ».

gouvernement français et de l'Institut Polaire Français (IPF ex IPEV) d'une action à long terme pour restaurer l'ancienne forêt de 17 km² de *Phylica arborea* qui couvrait les basses pentes du volcan⁴⁰⁴ (voir Figure 21) ; la première étape fut une campagne d'abattage systématique et totale des bovins autrefois introduits sur l'île⁴⁰⁵ ; depuis, l'équipe scientifique de la base de Martin-de-Viviès a mis en place une pépinière de *Phylica* dont les plants sont repiqués en pleine terre dans les sites les plus favorables. À terme, la forêt de *Phylica* devrait ressembler à celle restée quasi intacte sur l'île britannique de Gough.

L'autre spécificité des écosystèmes micro insulaires tient à leur extrême fragilité ; le destin tragique d'un minuscule passereau aptère sur un îlot perdu suffira à démontrer le caractère synecdotique des terres menues. Il était une fois une population endémique de Xénique de Stephens (*Xenicus lyalli*) sur l'île de Stephens (1,5 km²) dans le détroit de Cook en Nouvelle-Zélande (1,5 km²) ; sur l'île, un phare, un gardien de phare et son chat. En quelques jours en 1894, le félin pratiqua une blitzkrieg envers la petite population de Xénique dont il ne resta plus que quelques tas de plumes déposés au pied du gardien de phare David Lyall qui donna son nom scientifique à cette espèce aussitôt découverte, aussitôt disparues.



La biodiversité micro insulaire : une « chasse au trésor » ?

Les deux modèles conceptuels précédents d'Allen & White et de Lomolino (Voir Figure 135) synthétisent le fait que le nombre d'espèces est éminemment variable sur les « petites îles ». L'exploration de la biodiversité des "petites îles", en plus de la délicate définition de leur seuil de surface minimale en fonction du taxon et de l'échelle, ressemble davantage à une "chasse au trésor" avec beaucoup d'échecs et quelques belles découvertes. Comme le constate les scientifiques du projet PIM, il apparaît ardu de rationaliser une campagne de prospection sur les petits fragments émergés qui ont cependant pour eux d'être généralement moins impactés et anthropisés que leurs mainlands.

Dans cette chasse au trésor, le savoir-faire des géomaticiens et géoscientifiques ne doit pas se limiter à fournir des données géoréférencées pour les modélisateurs (voir Figure 141). Cela suppose de la part de la première communauté un effort pour mieux maîtriser les concepts et théories fondamentaux de la biologie de la conservation. De même pour la seconde communauté, il faudrait que les méthodes de traitement des données géographiques dans le contexte du big data soit au moins connues à défaut d'être maîtrisées. Bien que de nombreuses équipes se disent multidisciplinaires et que chacun tend à se sentir transdisciplinaire, fait est que ces mots cachent mal un déficit de mise en pratique alors même que l'intrication des connaissances et savoir-faire est une condition nécessaire si ce n'est suffisante d'une science véritablement opérationnelle.

⁴⁰⁴ Le *Phylica* est le seul arbre des TAAF et spécifique à l'île avec celles de Tristan da Cunha et Gough dans l'Atlantique sud.

⁴⁰⁵ Il est plus facile d'éradiquer des bœufs que des rongeurs.

Intérêt et limites des théories biogéographiques et géohistoriques

Dans sa monographie sur l'île de Guana, le biologiste de la conservation James Lazell insiste sur les limites de tout modèle théorique traitant du vivant :

“Méfiez-vous des théories écologiques présentées sous forme de formules. Nos tentatives de quantifier les généralisations et les théories écologiques en termes mathématiques précis ont le plus souvent été à la fois des échecs et des distractions. L'écologie diffère des sciences physiques. Bien que les formulations théoriques visant à décrire la nature puissent avoir une valeur heuristique ou pédagogique, elles ne sont pas la vérité, ni même suffisamment vraies pour être utiles à la planification de la conservation ou de la durabilité. Au contraire, elles impliquent une uniformité ou une homogénéité, ainsi qu'une prévisibilité concomitante de la nature qui s'avèreront positivement dangereuses si elles sont crues.”
(Lazell, 2005, p. XIII)

Cette réflexion d'un spécialiste vaut aussi en l'adaptant pour les théories historiques, le principe se résumant ainsi : connaître les théories oui, les comprendre et les appliquer de façon dogmatique, non. En corollaire, Lazell reconnaît la "valeur heuristique et pédagogique" des formulations et généralisations. Il s'agit d'une sorte de profession de foi, d'une déontologie qui est totalement conforme à l'esprit qui anime le présent ouvrage. Ce crédo insistant sur le dialectisme entre « faits et théories », qui est le sous-titre du livre de Lazell, sera repris en l'adaptant dans la partie géohistorique qui procédera d'une certaine forme de "Lazellisme" dans la mise en regard des faits relatés par l'historiographie et des théories tentant d'appréhender les processus de fond et les tendances dans le temps long de l'évolution des sociétés humaines. C'est donc en prenant un risque scientifique que nous aborderons la géohistoire sérielle de l'archipel monde face aux tenants d'une historiographie qui se veut dogmatiquement non déterministe, anti déterministe, indéterministe pour des raisons éthique, morale ou simplement pratique.

Un croiseur français percute un radeau forestier en Mer de Chine du Sud

Concernant les modes de dispersion des animaux dit supérieurs notamment les mammifères, une anecdote suffira à montrer que les éléments flottant à la dérive sur les océans ne se limitent pas à quelques branches ou troncs d'arbre. Le capitaine de corvette Jean Sommet dans ses carnets de bord du croiseur Lamotte-Picquet nous fait part d'un incident lors d'une navigation de nuit en mer de Chine méridionale loin de la terre ferme ; leur navire vint percute et s'enfonça dans une masse forestière avec de bruyants oiseaux et des singes affolés dans les frondaisons (Sommet, 1998) ; le croiseur n'a pas subi de dommages ; aucun îlot n'était mentionné sur les cartes ; force est de constater pour le capitaine et son équipage qu'il s'agissait d'un immense radeau flottant sans doute détaché du rivage suite à une tempête ou une forte crue d'un fleuve côtier.

Cette anecdote prouve que la dispersion par ces radeaux n'est pas qu'une hypothèse tentant d'expliquer les flux au long cours des animaux de grandes tailles. Même si le phénomène doit être rare, il l'est moins dans le temps long de l'histoire naturelle de notre planète. Il faut cependant considérer que quelques individus parvenant sur une nouvelle terre ne suffisent pas pour créer une population génétiquement viable à long terme. Comme souvent, nécessité faisant loi, des espèces tel le varan de Komodo peuvent en certaines circonstances se reproduire par parthénogénèse, ce qui permet la survie de la population mais ne contribue bien évidemment pas à son évolution et à sa diversification génétique.

2.26. Epilogue de la deuxième partie et prologue à la troisième

Ce survol des contextes environnementaux des îles, des espaces insulaires et de l'archipel monde veut démontrer qu'une approche sérielle des processus naturels multi échelle permet de mieux cerner le cadre des Etudes insulaires et l'intérêt que pourrait avoir la nissologie nomothétique pour les doter de bases scientifiques communes. Reste le défi de faire le lien entre cette nissologie nomothétique et la nissologie chorographique ; une sorte de déficit pour la communauté des insularistes évoluant dans le domaine des Sciences humaines et sociales (SHS).

En filigrane se pose toujours l'interrogation de l'articulation entre celles-ci et « celles qui le sont moins ». Pour tenter de répondre à la question, la sémiotique et l'éthologie nous donne des pistes que j'ai pu observées et explorées avec d'autres collègues depuis plusieurs décennies dans le cadre d'équipes multidisciplinaires ; les « signes » envoyés par une communauté sont souvent mésinterprétés par d'autres communautés ; par exemple, la fractalité est rarement comprise dans le domaine des sciences humaines, inversement la phénoménologie reste assez floue pour les tenants des sciences exactes et expérimentales, y compris pour celui qui écrit ses lignes. Ce constat tout personnel qu'il soit fait cependant écho à la phrase de Paul Valéry « *On ne perçoit que le significatif* »⁴⁰⁶, ce que d'aucuns formulent ainsi : « *On ne reconnaît aisément que ce que l'on est en état de produire* »⁴⁰⁷.

Certains pourraient donc être surpris qu'un géoscientifique nissologue féru de géomorphologie et d'hydrologie en vienne à écrire ses réflexions sur la géohistoire de l'Homme, non pour juger le fait humain à l'aune des valeurs de son temps mais afin de tenter de comprendre la dynamique d'une Terre devenue celle de trop d'hommes et de femmes. Observera-t-il les faits comme un naturaliste le fait sur les mœurs d'un papillon sur une prairie près d'un étang d'une île finlandaise ? Tentons l'aventure !

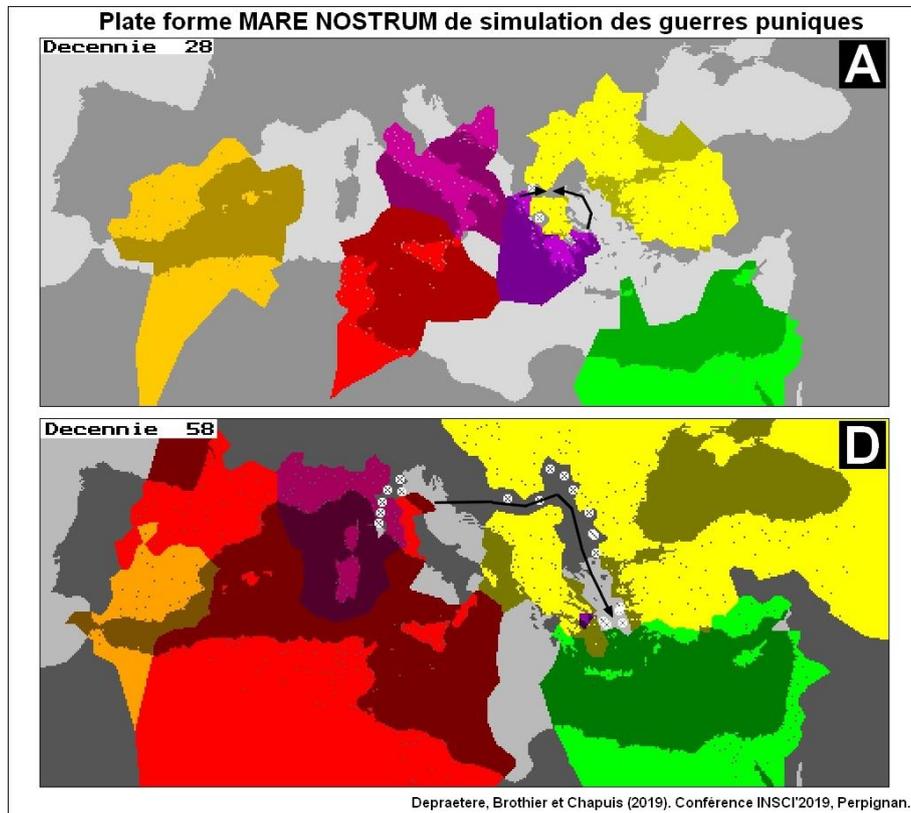
La troisième partie consacrée à la géohistoire de l'archipel monde souhaite être une contribution à une historiographie de la formation de l'œcumène à l'échelle d'une planète essentiellement océanique comportant des archipels d'archipels. *De facto*, l'approche du phénomène humain ayant conduit à l'actuelle Anthropocène participera du même esprit de géométrie si ce n'est de finesse que celui développé précédemment. Le risque est grand que cette « sériellisation » appliquée aux processus historiques, avec ce qu'elle suppose de généralisation (voire de quantification et de modélisation) des processus politiques et sociétaux pourrait se heurter à une réserve de principe qui a toute raison d'être si elle n'est pas dogmatique : le scario-saint dogme de l'indéterminisme.

⁴⁰⁶ Cité dans l'ouvrage « Le langage efficace » (Richaudeau, 1973, p. 7).

⁴⁰⁷ Le constat se retrouve curieusement dans un article intitulé « Un demi-siècle de chants d'oiseaux » de l'éthologue Michel Kreutzer (2014, p. 6) qui laisse entendre qu'il n'y a qu'une différence de degré et non de nature entre le comportement des sociétés animale et humaine. Partant du fait qu'une espèce d'oiseau d'une île écossaise ne perçoit pas le sens du chant d'un de ses congénères venant d'une autre île ou du mainland, l'éthologue animalier spécialiste de « cognition comparée » conclut : « On ne reconnaît aisément que ce que l'on est en état de produire ». De là à comparer les scientifiques à des volatiles...

PARTIE 3

GEOHISTOIRE D'UN ARCHIPEL D'ARCHIPELS



« Elle [La géohistoire] est typiquement française, car elle est née d'une longue et fertile cohabitation des historiens et des géographes. »
(Higounet, 1985, p. 363) citant Pierre Chaunu

« Les îles relèvent d'autres modèles d'organisation de l'espace qui peuvent offrir de nouvelles grilles d'explication du monde. Le monde peut en effet être lu tout autant en termes d'espaces en réseau qu'en termes d'espaces centraux, il peut être regardé non pas comme un seul espace mais comme un archipel. Il obéit alors à une logique de relation politique plus qu'à une logique de concentration économique. » (Bonnemaison J. , 1997, p. 121)

Ecce Homo sapiens ou l'impromptu attendu

En guise d'introduction reprenons la lapalissade déjà utilisée : pour qu'il y ait des insulaires et insularité, il faut qu'il y ait des îles !⁴⁰⁸ Comme le détail la partie précédente, l'archipel monde a mis du temps à se former et l'*Homo sapiens* advint alors que les terres émergées avaient une configuration géographique, proche de l'actuelle. Qu'aurait été l'expansion de l'Œkoumène si la fragmentation des terres avait été différentes ? Ce aurait été une autre géohistoire.

Quand il entre en scène de façon impromptue mais attendue à la vingt-cinquième heure de la pièce, le décor est un archipel d'archipels. Impromptu, car l'espèce constitue un saut évolutif sans équivalent sur notre planète ; attendu parce qu'il est dans la nature du processus évolutif de laisser apparaître de nouvelles formes de vie de plus en plus élaborées. Et quoi de plus adapté qu'une espèce ne se contentant pas de dépendre de son environnement mais de le transformer pour ses besoins. Meilleure ou pire engeances de la Création, l'Homme n'en ai pas moins celui qui dit le monde, pour mieux l'exploiter, le mathématiser mais aussi le poétiser, l'enchanter même ; tard venu le bipède doué d'un son gros cortex et de mains habiles arrive bien tard dans la dramaturgie de la planète bleue et ne prendra totalement conscience de son rôle qu'à l'ultime seconde qui est la nôtre : l'Anthropocène.

Prenons quelques-uns de ces hommes philosophant sous les étoiles. Blaise Pascal bien sûr, effrayé à l'idée « du silence éternel des espaces infinis » mais aussi un de nos contemporains l'astrophysicien Hubert Reeves lorsqu'il nous invite sur son banc pour évoquer ses « méditations cosmiques » (2017, p. 1).

« C'est là que, parfois, me viennent à l'esprit des questions. Elles me semblent dans le fil d'une longue interrogation sur ce monde, qui m'émerveille, me fascine et m'inquiète à la fois. Après un moment de silence, me viennent à l'esprit des pensées qui prolongent m'a constante interrogation. Y réfléchir, c'est aussi chercher à se rassurer. »

Laissons là nos effrois métaphysiques et nos inquiétudes du moment pour en revenir à une question plus terre à terre : la géohistoire de l'espèce humaine sur l'ensemble des terres émergées en se basant à la fois sur la donnée géographique et le phénomène humain dans les temps longs de la préhistoire et de l'histoire⁴⁰⁹. Bien que se nourrissant de l'esprit de l'École des Annales, cette géohistoire sérielle s'inspire aussi de la « cliométrie » de l'école américaine dite aussi « *new economic history* », les deux sous le regard de la même muse. Les deux

⁴⁰⁸ Mao Zedong faisait grand usage de lapalissades dans le « Petit livre rouge » pour la plus grande joie des maoïstes français dans les années 70. Bien innocente, celle-ci : « là où le balai ne passe pas, la poussière s'accumule »

⁴⁰⁹ Ceux voulu par Fernand Braudel : l'esprit reste, les méthodes changent.

écoles tentent de s'affranchir d'énoncés qui ne seraient qu'interprétation de l'historiographie ou d'éléments archéologiques et paléontologiques disparates. Par ce fait même, elle oblige celui qui voudrait suivre ces voies à un effort d'abstraction et de formalisation des processus géohistoriques quant à leur « observabilité » et leur « opacité », pour reprendre le terme des mathématiciens lorsqu'ils étudient un système spatio-temporel (SST) :

« On s'intéresse aux problèmes d'observation et d'observabilité des systèmes spatio-temporels, c'est-à-dire des systèmes dits distribués. C'est ainsi qu'on va introduire les notions d'observabilité d'un ou plusieurs points de l'espace. Un système est dit observable si la connaissance de la dynamique du système complétée par la donnée de mesures (ou observations) prélevées sur le système permet la détermination (connaissance), en temps fini, de l'état du système. » (Belfekih, Bernoussi, & El Jaï, 2019, p. 1 et 3)

La géohistoire de l'homme n'est-elle qu'un processus spatio-temporel comme un autre avec sa part d'observabilité et d'opacité ? Nul scientifique ne peut totalement le nier.

On ne peut prétendre avoir une connaissance holistique du Passé puisqu'elle procède du double filtrage inhérent à la culture des observateurs, en l'occurrence des géohistoriens au sens large, et du caractère parcellaire des éléments observables ou connus de « l'état du système » à un temps T. Toutefois, la multiplication et la diversification des moyens de mesures et d'observation actuelles donnent des assises plus solide à nos interprétations comme nous tenterons de le démontrer, par exemple la génétique et la génomique des populations humaines ; souvent elles nous racontent une histoire bien différente et plus objective que celles de nos manuels scolaires, des historiographies nationales et des *storytellers*. Ces nouveaux moyens mis à la disposition des scrutateurs de notre Passé commun autorise une approche moins moralisatrice, moins dogmatique, plus fonctionnaliste du phénomène humain, avec bien sûr toujours la crainte du déterminisme.



What if ? WHATIF, un logiciel ...

Et si l'Angleterre n'était pas une île ?

Si Carthage avait gagné, les îles Tyrrhéniennes parleraient-elles encore la langue punique ?

Si Hispaniola n'avait pas été divisée, serait-elle un paradis ?

Laissons Albion et les falaises Douvres bien au large. N'évoquons pas ici les guerres puniques, qui semblent de « vieilles lunes » sauf dans les académies militaires. Prenons **Hispaniola**, cette Janus insulaire avec une face tournée vers l'ouest et l'autre vers l'est.

Gary King et Langche Zeng ((2006) (2007)) ont conçu le logiciel de simulation contrefactuelle WHATIF, une version plus « dure » que les usages contrefactuelles antérieurs plus littéraires et ludiques (Deluermoz & Singaravélou, 2012, p. 70). Ces chercheurs de Harvard (<https://gking.harvard.edu/whatif>) ont collecté des données sur les processus de démocratisation afin de déterminer les « effets causaux de la démocratie ». Sur la base de leur modélisation sophistiquée, **Haïti** avait plus de chance de devenir une « démocratie accomplie » en 1990 qu'en 1996. Conclusion générale, « les autocraties auraient 28 % de chances de devenir des démocraties tandis que 53 % des démocraties pourraient suivre le chemin inverse. »

Tout cela est matière à controverse, et c'est tant mieux ?.

Quentin Deluermoz et Pierre Singaravélou déjà cités précisent que « contrairement aux apparences, l'histoire "avec des si" n'est ni l'apanage des anglo-saxons, ni une nouvelle méthodologie apparue à la fin du XX^e siècle ». Ils précisent que l'approche contrefactuelle a tardé à trouver grâce auprès des historiens français mais cette approche tend à devenir acceptée, voire acceptée (cf. (Grataloup, Géohistoire : Une autre histoire des humains sur terre, 2023)).

Et si l'archipel monde avait été différent ?

Et si l'Homme était apparu plus tôt ou plus tard au cours de cette valse des continents ?

«Ce que je peux dire, c'est que le fonctionnalisme a ses limites, mais aussi ses mérites. Nous ne devons pas suivre la voie d'Elisabeth Churchill Semple, qui a cherché à définir la condition humaine à partir de caractéristiques géographiques uniquement. Mais nous ne sommes pas non plus des entités abstraites et philosophiques qui se contentent de glisser dans l'espace sans en être affectées. » Godfrey Baldacchino ⁴¹⁰

3.2. Structure de l'archipel monde et évolution de l'homme

Les hommes sont-ils des « entités abstraites et philosophiques qui se contentent de glisser dans l'espace sans en être affectées » (voir ci-dessus) ?

On se contentera ici de donner une définition large du fonctionnalisme : un modèle d'analyse dans lequel les faits sociaux sont appréhendés selon la fonction qu'ils remplissent dans un système plus global. Dans la dialectique du local et du global, les îles océanes sont des pièces de choix car quoi de plus local que ces terres menues mais toujours ouvertes sur la matrice océanique mondiale. Ce qui suit ne se veut pas un plaidoyer pour une géohistoire « déterministe » mais comme des éléments de réflexion et d'analyse sur les limites d'un « indéterminisme foncier », presque dogmatique, des faits humains.

La géographie propose, l'histoire dispose. Oui, « l'Histoire a une Géographie » comme le fait remarquer le géohistorien Christian Grataloup⁴¹¹. Soyons géographe d'abord ; la pratique du monde, devenu archipel monde depuis le désenclavement planétaire du XVI^e siècle, permet d'en dégager les principaux chemins et ruelles (Figure 146). Les terres majeures s'organisent en trois bandes latitudinales selon les axes Amérique du Nord/Amérique du Sud, Europe/Afrique et Asie/Australie. Chacune d'entre elles comporte une zone de raccordement plus ou moins marquée entre leurs parties septentrionale et méridionale sous la forme d'isthmes, de chapelets d'îles ou de péninsules séparés par des chenaux marins plus ou moins importants. Dans la partie septentrionale des continents de l'hémisphère nord, des lignes d'îles ou des péninsules se rejoignant presque offrent des possibilités de navigation de proche en proche. L'ensemble des trois bandes et de leurs appendices insulaires ou péninsulaires est coiffé au nord par l'océan Arctique et au sud par le continent englacé de l'Antarctique. Cette configuration implique l'existence de quelques lieux ayant un rôle majeur dans l'accès à l'océan mondial, dont la topologie souligne l'existence de seize points particuliers tels qu'indiqués dans la Figure 146. Ce type de schématisation synthétique s'inspire des méthodes de la chorématique de Roger Brunet ; nous la qualifierons de schéma "chorémique" par la suite.

L'évolution du phénomène humain, du moins en se limitant à l'*Homo sapiens*, apparaît bien courte au regard de la profondeur de celle du vivant, *a fortiori* pour les dynamiques géophysiques et géologiques de notre planète : à peine deux cent mille ans d'existence suivie de peu par une sortie rapide de l'Afrique, le *Out of Africa*⁴¹², vers 185 000 BP⁴¹³, puis par une progressive découverte et occupation de l'ensemble de l'archipel en plusieurs vagues de

⁴¹⁰ Professeur de Sociologie à l'université de Malte, éditeur du *Island Studies Journal* (ISJ). Membre de l'international Small Islands studies Association (ISISA). Communication personnelle 2022, traduite en Français.

⁴¹¹ L'inverse est tout aussi vrai mais semble davantage une évidence de bon sens : la Géographie a une Histoire.

⁴¹² Cette hypothèse autrefois avancée par des paléontologues, des archéologues et préhistoriens s'est vue confirmée par les plus récentes recherches en génétique humaine.

⁴¹³ Les dates seront données soit en millions d'années (Ma), soit en référence à la période actuelle (BP pour Before Present), soit en années avant Jésus Christ (av. JC) ou selon l'ère chrétienne (i.e. 1000 pour l'an 1000 après JC, en fonction de l'antériorité de l'évènement.

migrations amphibies ⁴¹⁴: depuis l'Asie vers l'Australie et le Pacifique proche (à partir de 60 000 BP), par l'isthme ou le détroit de Béring vers l'Amérique (vers 15 000BP), par la remarquable migration maritime des Austronésiens vers le Pacifique lointain vers 3000 av. JC et des Inuits vers le Groenland vers 2500 av. JC, enfin par le grand désenclavement planétaire du XVI^e poursuivi jusqu'au XVIII^e siècle avec l'ouverture des grands espaces océaniques, la découverte des archipels et des îles de l'océan Indien et de l'Atlantique, la découverte du continent antarctique ou du moins sa péninsule en 1819 venant clore une exploration de l'ensemble de l'archipel monde (Figure 147B). Cette expansion d'un œkoumène qui, à terme, se confond avec l'archipel monde se révèle à la fois la conséquence et la cause d'une croissance démographique qui, sur le long terme, apparaît régulière, avec les seuils majeurs que sont l'évolution et l'expansion néolithique à partir de 12 000 BP jusqu'au XIX^e siècle, et la proto mondialisation suivie de la révolution industrielle de 1500 à 1900 (Figure 147A).

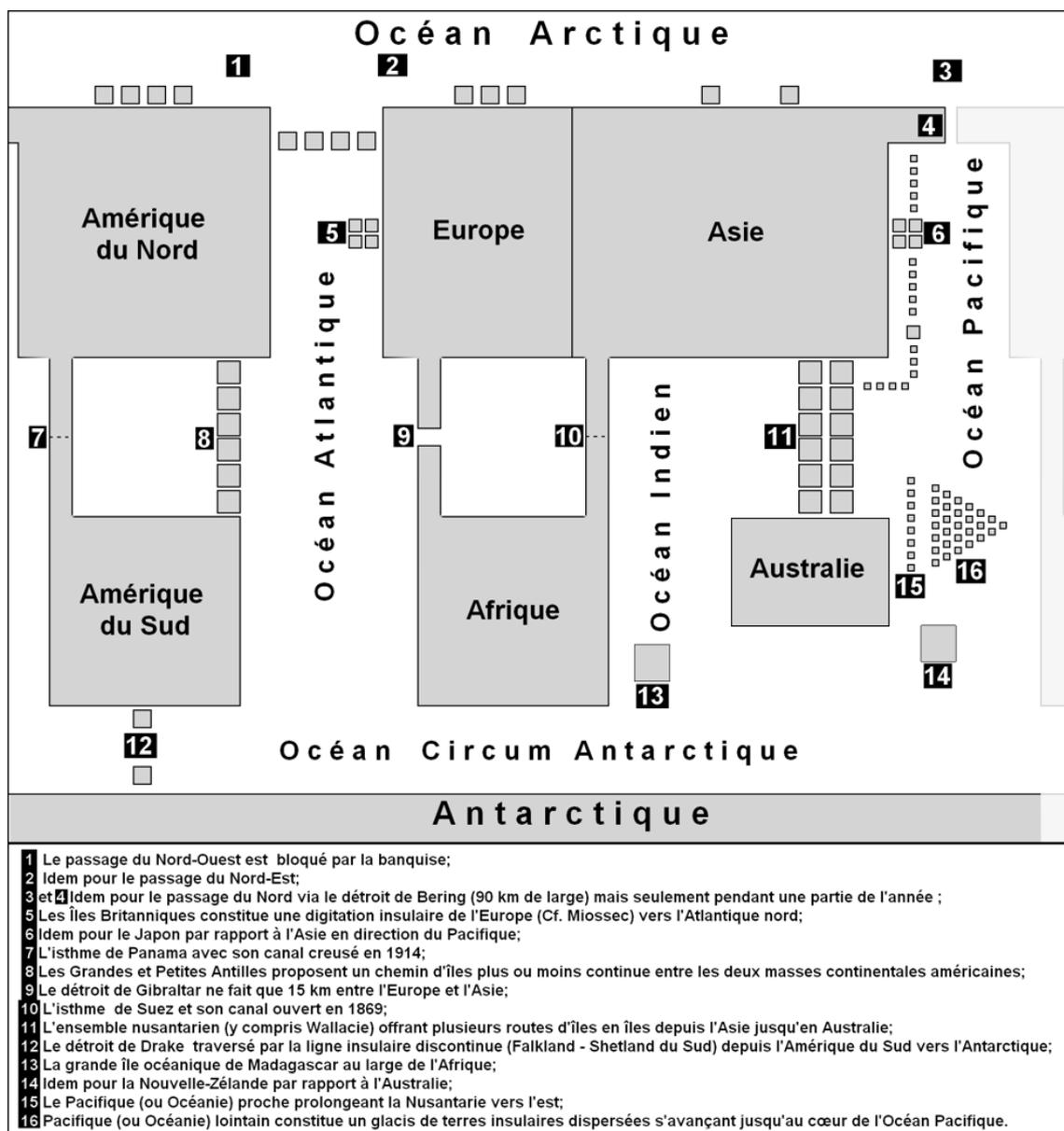


Figure 146 : chorème fonctionnel des lieux géostratégiques de l'archipel monde.

⁴¹⁴ De récente étude génomique tendent à démontrer qu'il y eut probablement un goulot d'étranglement démographique (*bottle neck*) réduisant l'humanité à 10 000 personnes vers 74 000 BP.

Le modèle malthusien est un classique de la démographie historique ; elle suppose une croissance exponentielle de la population P fonction du temps t telle que $P(t) = k.P(t-1)$ avec pour les *Homo sapiens* un coefficient $k=1,02$ avec t en années (Israel, 1996, p. 89). Or cela ne s'applique pas sur des populations importantes qui tendent vers un état d'équilibre lorsque toutes les niches exploitables par l'espèce considérée sont utilisées. Cet effet de saturation se traduit par une valeur limite correspondant à la *carrying capacity* propre à un écosystème et à une espèce, soit une variante de la loi malthusienne telle que [21] $P(t) = k.P(t-1) - h.P(t-1)^2$ (Pierre-François Verhulst, 1837). Le second terme de l'équation et son coefficient h rendent compte « d'une sorte de "frottement" intérieur à la population proportionnel au nombre de rencontres entre individus » (Israel, 1996, p. 90). Dans le cas de l'espèce humaine, le modèle malthusien s'applique de façon satisfaisante à des populations pionnières sur de nouvelles terres alors que la variante de Verhulst s'avère conforme à une évolution dite « logistique »⁴¹⁵ avec un plafonnement asymptotique du nombre d'habitants et de la densité en fonction de la production alimentaire (chasse, pêche, cueillette, agriculture, élevage) et d'autres facteurs d'ordre économique, le commerce notamment. Cette dynamique sigmoïdale s'observe à l'échelle mondiale pendant toute la période de transition néolithique entre 10 000 BP et l'an 1000 AD (Figure 147A). La « crue » se tarit au début de l'ère chrétienne et connaît même un léger étiage vers l'an 1000⁴¹⁶. Depuis, la population n'a fait que croître, le processus s'accéléralant notamment après la révolution industrielle et les progrès de la médecine. Les flots humains mais aussi les flux de gènes, d'idées, de croyances, de savoir-faire, de techniques mais aussi d'espèces domestiquées et de maladies vont percoler depuis et autour des grands fragments continentaux vers les petits fragments selon des rythmes variables d'un lieu et d'une époque à l'autre avec, en corollaire, un impact important sur la biosphère, dont « l'anthroposcénisation » actuelle ne serait qu'un épilogue, ultime « transition de phase » entre une humanité dispersée et cloisonnée au milieu d'un continuum naturel et une fragmentation de ce dernier dans un océan de milieux anthropisés. Pour la période qui précède l'ère chrétienne, l'accroissement de la population mondiale ne peut être qu'esquissé même si les effets démographiques de la transition néolithique sont patents ; certains paléo démographes dont Jean-Pierre Bocquet-Appel (2010, p. 306) estime que les taux de croissance des populations agricoles serait de l'ordre de 0,015 %/an soit un doublement en 500 ans, un centuplement en 3000 ans alors que d'autres spécialistes envisagent des taux plus faibles de 0,04 %/an.

Avant d'aborder quelques-uns des épisodes de la saga d'*Homo sapiens* sur l'archipel monde dans le temps long de son histoire, il serait intéressant d'imaginer que cette épopée se soit produite au moment où la Pangée de la période carbonifère regroupait presque toutes les terres en un seul immense continent. Allons plus loin dans cette fiction historique et inventons pour les besoins de la cause un continent parfaitement circulaire et plat de la même superficie que nos terres émergées actuelles⁴¹⁷ et que nous appellerions Circland (Figure 149A). La longueur de sa côte ne serait que de 42 000 km, comparable à celle de l'Australie (36 700 km) alors que pour des littoraux de l'archipel monde actuel elle atteint 1,6 millions km, soit un rapport de 1 à 38. À l'inverse, imaginons un archipel monde hyper fragmenté formé d'une trame d'îles et d'îlots montagneux couvrant la même superficie que dans la précédente

⁴¹⁵ Voir les fonctions dites logistiques du type LOGIT : https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gression_logistique

⁴¹⁶ Dont, pour l'Europe, l'impact de la peste dite de Justinien à partir du milieu du vi^e siècle, puis la peste noire dans la seconde moitié du xiv^e siècle et ses prolongements au siècle suivant.

⁴¹⁷ En matière de fiction géographique et mathématique, se reporter au "Flatland" d'Edwin A. Abbott (1884). "*Flatland: A Romance in Many Dimensions*". New York: Dover Thrift Edition (1992 unabridged). Plusieurs films et courts métrages ont été tirés de cette œuvre originale et roborative.

hypothèse, soit 29 % de terres émergées. Appelons-le Fragland (Figure 149B).

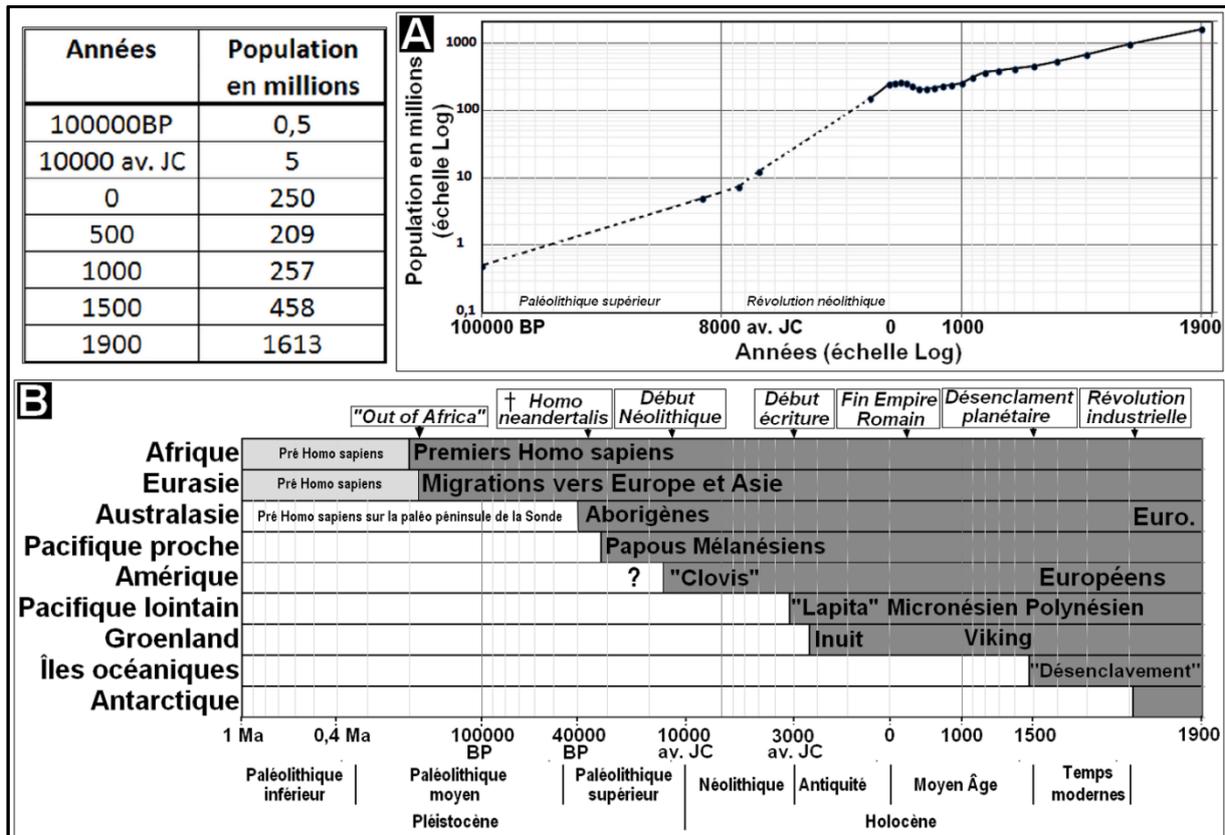


Figure 147 : Démographie et dispersion d'*Homo sapiens* sur l'archipel monde.
 (A) Évolution démographique depuis 100 000 ans (d'après Biraben, 2003).
 (B) Chronogrammes de l'expansion par continents et grandes régions insulaires.

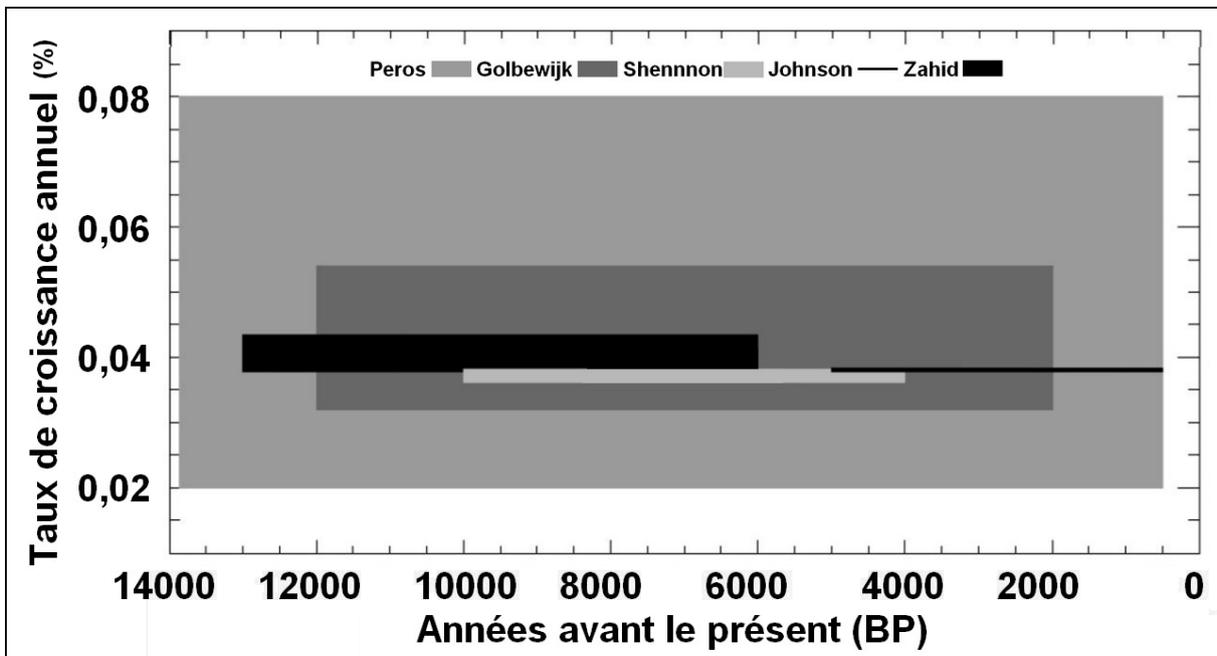


Figure 148 : ordres de grandeur des taux de croissance annuelle des populations humaines pendant la transition néolithique selon divers paléo démographes (D'après (Zahid & et al., 2016)).

Dans le cas de Circland, la navigation se serait limitée essentiellement à la pêche et au cabotage local en l'absence de toute nécessité de transbordement d'un fragment vers un autre. Quant à l'exploration, gageons qu'elle n'aurait eu qu'un intérêt limité pour ne pas dire absurde sur un océan vide de toutes terres. Les explorations d'un Colomb ou d'un Magellan circlandien auraient suscité peu d'intérêt dans un tel contexte. La biodiversité, tout autant que la diversité ethnologique, culturelle et politique y aurait été d'autant plus réduite que nous avons supposé l'absence totale de relief. Du fait de l'isotropie du territoire et de sa platitude, les transports terrestres se seraient trouvés favorisés au dépens du fret maritime, ce qui n'est pas le cas dans notre monde sur les longues distances ou près des côtes. Stratégiquement, il aurait été logique que le centre du pouvoir et du commerce se trouve au cœur même de Circland. Dernier point, il est probable que la dynamique historique tendant à la formation d'empires aurait conduit à une structure hégémonique sans partage. Intéressons-nous maintenant à Fragland avec son enchevêtrement de terres insulaires montueuses et d'étroits chenaux marins, dispositif qui n'est pas sans rappeler celui de l'archipel des Åland à l'échelle régionale (Voir Figure 67E). La navigation se serait faite essentiellement par cabotage. La diversité biologique et culturelle aurait été favorisée par un relief en fragmentation de nature à créer des espaces discontinus et anisotropes. Des navigateurs au long cours n'auraient pas eu lieu d'être puisqu'un Magellan fraglandien n'aurait eu qu'à pratiquer des sauts d'îles en îles sans presque jamais perdre la terre de vue pour circum naviguer le globe. À travers cette rapide incursion dans le domaine de la fiction géohistorique, on ne fait que suggérer que la simple configuration des terres conditionne de façon fondamentale les processus mais aussi les savoirs nécessaires à leur compréhension. De la même façon que les États ont la politique de leur géographie, les mondes ont l'évolution de leur paléogéographie.

Pour l'essentiel, la topologie⁴¹⁸ de l'archipel monde n'a été connue qu'au XVI^e siècle⁴¹⁹ pour se poursuivre jusqu'au XVIII^e siècle⁴²⁰. Seule la possibilité d'une connexion entre l'océan Atlantique et l'Océan Indien était plus ou moins connue depuis la haute Antiquité⁴²¹. Certes, chaque peuple avait une connaissance locale voire régionale des mainlands, des îles, isthmes et détroits qui structuraient leur environnement géographique ; on citera les cas des cartes insulaires remarquablement précises des Inuits des îles Belcher dans la baie d'Hudson (Fuson, 1969, p. 71) ou les canevas réticulaires de type « *mattang* » indiquant les îles, les courants et les lignes de houle des Polynésiens des îles Marshall (Depraetere & Dahl, 2007, p. 80). En remontant dans le passé jusqu'à la formation du pont terrestre de Panama vers 3 Ma, il est certain que la topographie d'ensemble a peu changée mais que les variations du niveau marin ont joué à plein dans les transitions de phase isthme/détroit notamment durant la dernière déglaciation entre 18 000 et 7500 BP comme indiquées dans la Figure 78, ce qui modifia ainsi de façon notable les chemins de migrations terrestres ou océaniques ; c'est dans ce contexte de fluctuations climatiques et eustatiques que les migrations de l'Homme hors d'Afrique eurent lieu dont notamment *Homo sapiens* depuis environ 180 000BP (Hershkovitz & Weber, 2018) et même pour son lointain ancêtre l'*Homo erectus* vers 1,2 Ma. Jusqu'à récemment, les éléments archéologiques ou paléontologiques suggéraient que les populations pré *Homo sapiens* se soient limitées aux parties continentales à l'exclusion ou presque des îles y compris en Méditerranée.

⁴¹⁸ La topologie et non la topographie. Cette branche des mathématiques étudie entre autres les propriétés de voisinage entre des objets dans de multiples dimensions. Nous nous limiterons au cas plus trivial de la surface sphérique de la Terre.

⁴¹⁹ Tour du monde de Magellan et el Cano de 1520 à 1522.

⁴²⁰ Circum navigation de l'Antarctique par James Cook de 1772 à 1775.

⁴²¹ Expédition phénicienne commanditée par le pharaon Nechaos entre 609 et 594 av. JC relatée par Hérodote.

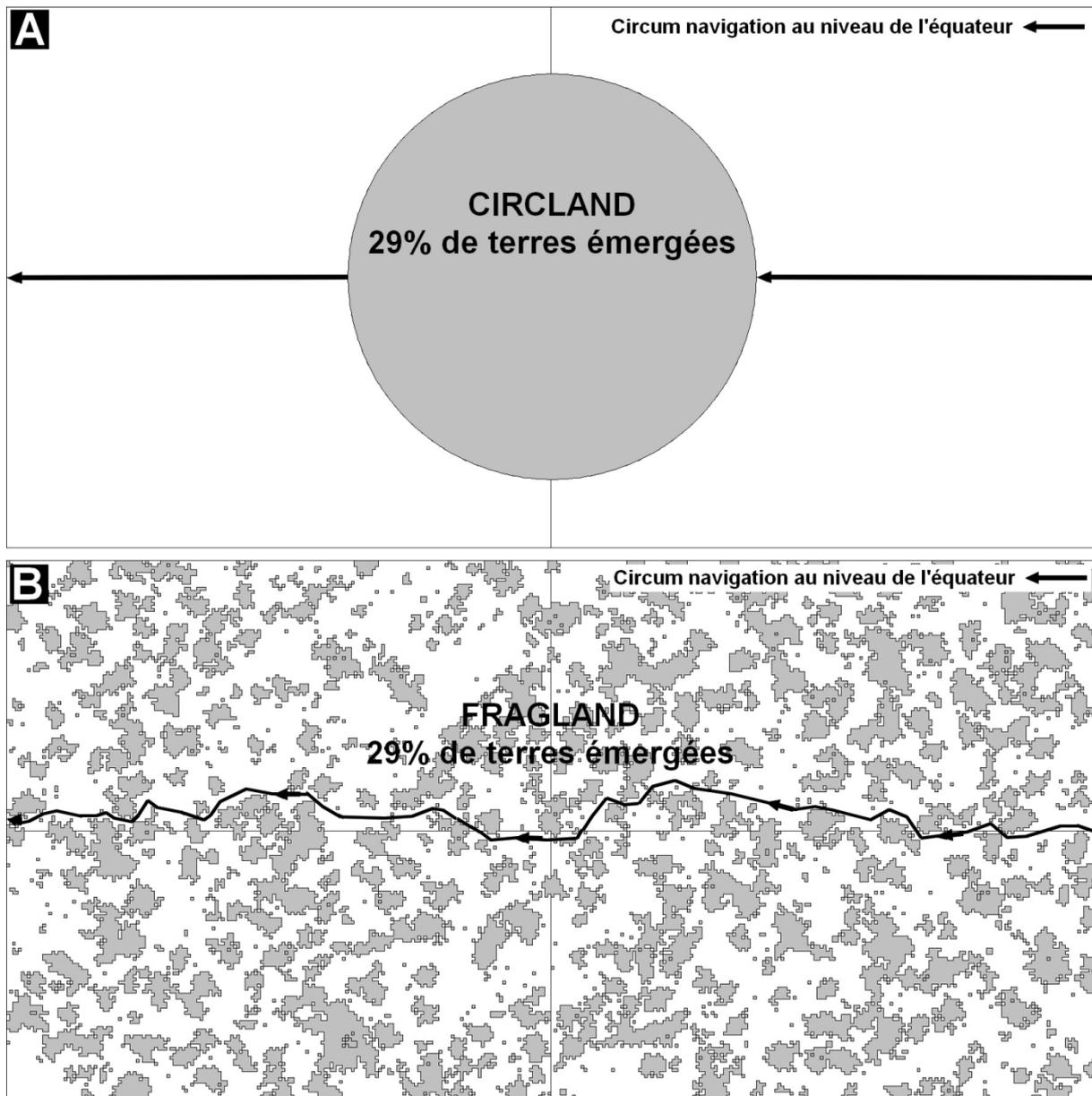


Figure 149 : Deux mondes contrastés en fonction de la fragmentation des terres émergées couvrant 29 % de la surface de la sphère terrestre et circumnavigation à l'équateur. (A) Le continent CIRCLAND parfaitement circulaire. (B) Archipel monde de FRAGLAND.

Selon Cyrille Coutansais du Centre d'étude stratégique de la Marine, « les humains ont toujours eu le pied marins » (2023, p. 24) ; selon lui, l'hypothèse que nos ancêtres *Homo sapiens* ne se soient « aventurés sur les flots » que tardivement relève du mythe et de citer la migration des Aborigènes vers le paléo-continent Sahul vers 45 000 BP (2023, p. 25) ; sur le processus déjà évoquer de *island hopping* entre l'Australasie et l'Asie via la Wallaceie voir également Figure 40A, Figure 69A, Figure 72 et Figure 78. L'insert ci-dessous précise que les *Homo erectus* devaient également avoir certaines capacités nautiques pour traverser les mêmes détroits, dont celui de Lombok, puisque l'archéologie les signalent sur Florès et Luçon dès 50 000 BP, voire 74 000 BP.

Selon l'hypothèse dominante du "berceau africain", l'apparition du premier homme bipède, *Homo habilis*, se situe en Afrique orientale. Il faut cependant mentionner une autre

théorie plus récente qui suggère que d'autres espèces d'homininé⁴²² occupaient vers 2,6 Ma le piémont himalayen (Dambricourt-Malassé. A., 2016) et le sud de la Chine (Li, Li, & Kuman, 2017). De façon plus certaine, l'*Homo ergaster* présent en Afrique sub-saharienne vers -1,9 Ma serait le premier à sortir de ce continent vers -1,2 Ma ce qui aurait donné naissance à l'*Homo erectus* en Asie et à l'*Homo antecessor* en Europe. Le passage entre les deux continents se serait fait soit par la péninsule du Sinaï soit par le détroit de Bab-el-Mandeb ce qui suppose la traversée de la zone saharienne désertique dont l'existence date de 7 Ma. Néanmoins, le climat de cette région a connu une succession de phases humides dite du Sahara vert en phase avec les maxima glaciaires (Isla S. Castañeda, 2009) et (2013)). Ajoutons que le paléo-Nil ménageait le maintien d'un corridor migratoire pérenne depuis la zone équatoriale jusqu'à la Méditerranée même pendant les périodes les plus arides. Le Moyen-Orient a ainsi joué le rôle de carrefour. L'ancêtre le plus probable de l'Homme moderne pourrait être l'*Homo rhodesiensis* localisé en Afrique du Sud et daté de - 0,7 Ma. À la même époque mais cette fois-ci en Europe, l'*Homo heidelbergensis* donnera naissance aux Néandertaliens (*Homo neanderthalensis*) vers 120 000 BP. Ce n'est qu'en 2010 qu'est découvert aux confins de la Mongolie et de la Chine l'Homme de Denisova, cousin asiatique contemporain des néandertaliens vers 70 000 BP. Ces événements sont contemporains des premières migrations de l'*Homo sapiens* dans la péninsule arabique et au Moyen-Orient vers 180 000 BP.

En résumé, l'expansion de l'homme moderne aurait provoqué la disparition des autres hominines sus-cités de façon délibérée ou non. Cette évolution au cours de la dernière centaine de milliers d'années doit être replacée dans le cadre environnemental et climatique de cette période, soit la glaciation dite du Würm en Europe et son corollaire de baisse du niveau marin ; Une régression marine s'amorce dès 120 000 BP pour atteindre son maximum vers 17 000 BP à -120 mètres par rapport à la période actuelle. Les conséquences paléogéographiques d'un tel changement englacement des pôles provoquent l'exondation de vastes portions du plateau continental facilitant ainsi les migrations comme ce fut le cas pour les ancêtres des Papous et des Aborigènes australiens. Les études génomiques récentes tendent à démontrer que leurs migrations depuis l'Afrique vers 70 000 BP se sont déroulées rapidement ; il leur faudra moins de 20 000 ans pour peupler le continent Sahul en profitant de l'émersion partielle des péninsules et des îles le séparant du continent africain (Rasmussen & al., 2011). Comme évoqué précédemment, une hybridation partielle avec des populations dénisoviennes a eu lieu lors du transit asiatique.

Le fait préhistorique fondamental de l'expansion de l'espèce Homo reste à n'en point douter le peuplement de la « péninsule » américaine ; en effet pendant tout le Würm⁴²³, ce qui allait devenir le Nouveau monde était connecté au mainland eurasiatique via l'actuel détroit de Béring alors exondé mais non englacé ; la Béringia bien que localisée à des latitudes sub polaires⁴²⁴, ce pont terrestre entre la Sibérie orientale et l'Alaska, y compris l'Alaska lui-même, fut peuplé dès 24 000 BP jusqu'à la limite de l'inlandsis nord-américain. Il s'en suivit ce que les paléontologues appellent l'Arrêt béringien ou *Beringian standstill* aurait permis une première occupation de l'extrémité nord-ouest de l'Amérique au nord avant le peuplement de l'ensemble

⁴²² La sous-famille des Homininés inclue l'homme, ses ancêtres fossiles ainsi que le chimpanzé et les bonobos.

⁴²³ Etant le plus souvent utilisé, le terme générique de Würm s'appliquera à la dernière période glaciaire bien qu'elle fasse référence à la calotte glaciaire alpine. En toute rigueur, il faudrait parler de glaciation vistulienne pour l'Europe du nord, et de wisconsinienne pour l'Amérique du nord.

⁴²⁴ Situé entre 55° et 73°N, cet isthme émergé et non englacé est aux mêmes latitudes que celles des inlandsis nord-américain (39,8° à 84°N) et européen (52° à 83°N). Cette absence d'englacement tout comme celui de la Sibérie s'explique par la faible névrosité ne permettant pas une accumulation de glace années après année.

du continent par-delà la barrière de glace qui ne semble intervenir qu'à partir de 15 000 BP (Bourgeon, Burke, & Higham, 2017). Pendant l'arrêt béringien, le site de Bluefish Caves sur territoire du Yukon au Canada contient des os d'animaux fossiles associés à des artefacts humains d'où l'hypothèse que des populations de chasseurs-cueilleurs auraient traversé la Béringie en suivant le gibier. La thèse dominante concernant le contournement de l'obstacle de l'inlandsis est celle de l'autoroute du varech (*Kelp highway*) qui seraient le fait de peuples de pêcheurs-chasseurs « percolant » le long des côtes pacifique à partir des 15 000 BP soit au moment du maximum glaciaire ou tardiglaciaire, migrations qui aurait donné naissance à la culture Clovis. Cette dernière hypothèse bien qu'encore actuellement débattue permet cependant de souligner un point particulier relatif à l'archéologie le long des côtes et des peuples qui les auraient occupées ; en effet, le littoral correspondant au dernier maximum se trouve de nos jours à 120 mètres de profondeur. Ce problème spécifique n'est pas limité aux côtes américaines mais concerne l'ensemble de l'archipel monde. Il compromet de façon évidente les preuves archéologiques qu'on pourrait pu avoir sur les peuplements côtiers et des techniques de pêches ou de navigation qui s'y trouvaient.

D'une façon plus générale et par rapport à notre propos, il convient d'évoquer ce qu'aurait pu être les capacités nautiques des peuples préhistoriques côtiers. Un élément indirect de l'existence de bateaux permettant de traverser des bras de mer est donné par les migrations maritimes inter insulaires déjà évoquées depuis l'Asie vers la Nouvelle-Guinée et l'Australie vers 45 000 BP ; même en tenant compte de l'émersion d'une grande partie du plateau continental sahulien et des grandes îles de la Sonde devenues une péninsule raccordée au continent, la migration des proto-Papous et des proto-Aborigènes les a contraints à franchir de nombreux profonds détroits de quelques dizaines de kilomètres de large s'échelonnant entre les petites îles de la Sonde : Lombok, Sumbawa, Flores, Sumba, Timor, Solor, Alor, ... Cela suppose au moins l'existence de pirogues suffisamment stables et un moyen de propulsion de type rame ou voile. L'anthropologue Joseph Birdsell a qualifié ce processus consistant à se déplacer à vue d'îles en îles de "*island hopping*", terme que l'on peut traduire par "saut d'îles en îles". Comme dans le cas de la culture Clovis en Amérique, il faut mentionner que l'arrivée des premiers habitants sur le paléo continent de Sahul regroupant Nouvelle-Guinée, Australie et Tasmanie a provoqué une extinction de masse de la mégafaune, notamment les marsupiaux géants australiens.

Les remarques précédentes peuvent être replacées dans le cadre de la Méditerranée au moment du maximum glaciaire würmien. Alors que l'inlandsis occupait toute l'Europe du nord, quelques zones refuge de la végétation forestière tempérée ont pu persister le long des côtes méditerranéennes, en particulier au sud des trois péninsules hispanique, italienne et balkanique. Elles ont dû servir de zone de replis pour les populations de chasseurs-cueilleurs adaptés au milieu forestier et pratiquant la pêche le long du littoral. Il est probable que les sites côtiers les plus favorables ont été submergés lors de la dernière transgression marine. Les îles de Méditerranée restées isolées pendant cette période de bas niveaux marins auraient dû être peuplées du fait qu'elles devaient être également des zones refuge pour la végétation tempérée. Or, certaines îles ne semblent pas avoir été occupées que tardivement soit au Mésolithique, soit au Néolithique: 12 000 BP pour Chypre, 10 000 BP pour la Crète, 7200 BP pour Malte, 7000 BP pour les Baléares. Outre l'absence d'éléments archéologiques pouvant être imputables à l'ennoiement postglaciaire des côtes, une preuve indirecte tient à ce que la disparition des espèces endémiques de ces îles (éléphants et mammoths nains, hippopotames nains) est le plus souvent concomitante de ces périodes. Il peut paraître surprenant que ces îles n'aient pas été peuplées plus tôt alors même qu'elles étaient visibles depuis le continent (Voir Figure 59). Cela laisse supposer que les peuples paléolithiques de la

Méditerranée n'ont pas pratiqué le *island hopping* alors que les ancêtres des Papous et des Aborigènes l'avaient fait des dizaines de milliers d'années avant eux. Diverses conjectures pourraient expliquer ce retard comme par exemple l'absence bien que peu probable de technique nautique ou un trop faible pool génétique pour maintenir une population viable de chasseurs-cueilleurs sur de petites îles.

Alors que s'amorce l'Holocène il y a 10 000 ans, l'humanité occupe l'ensemble des masses continentales mais pas les espaces insulaires intra océaniques dont Madagascar et la Nouvelle-Zélande. Cette période est associée à une remontée de la température moyenne mondiale jusqu'à une valeur proche de celle observée actuellement. Elle se traduit par une fonte des deux inlandsis européen et nord-américain qui implique une transgression glacio-eustatique depuis -110 mètres vers 17 000 BP pour atteindre un niveau des mers proche de l'actuel vers 7000 BP; la vitesse moyenne de montée des eaux a donc été de l'ordre de 1,2 mètres par siècle mais avec des valeurs pouvant atteindre 6 mètres par siècle lors des principales impulsions de fonte ou *meltwater pulses* (Blanchon & Shaw, 1995). Cet événement relativement rapide à l'échelle des temps géologiques a profondément modifié le tracé des côtes et la géographie de l'archipel monde. Il faut mentionner notamment :

- Ouverture du détroit de Béring (profondeur max de l'ordre de 40 m) et séparation entre l'Ancien Monde et le Nouveau Monde;
- Submersion d'une grande part du plateau continental de Sahul pour former la Nouvelle-Guinée, l'Australie et la Tasmanie (la profondeur maximale du Détroit de Torres n'est que de 8 m) ;
- Submersion de la péninsule de la Sonde impliquant l'apparition des îles de Sumatra, Bornéo, Java et Bali ;
- Formation de la mer du Nord et de la Manche (profondeur max 50 m) donnant ainsi naissance à l'archipel britannique ;
- Apparition de nouvelles mers épicontinentales de faibles profondeurs dont la Baltique (profondeur moyenne 50 m), le golfe Arabo-persique (moyenne 50 m) la baie d'Hudson (moyenne 125 m), la mer Adriatique, la mer d'Azov (profondeur moyenne 13 m) et la mer Jaune (moyenne 50 m) ;
- Ouverture des détroits des Dardanelles (profondeur max 82 mètres) et du Bosphore (103 m) provoquant le débordement de la Méditerranée, dans le bassin mer Noire alors occupé par un lac d'eau douce à -160 mètres vers 7000 BP (Ryan & Pitman, 1998).

Le recul des côtes continentales a été suffisamment marqué pour permettre l'insularisation ou l'achipélagisation de nouvelles terres: Formose et Hainan au large de la Chine, formation de l'archipel des Philippines, Ceylan (Sri Lanka) au sud de l'Inde, ouverture du détroit de la Pérouse et apparition de l'île de Sakhaline, séparation entre les îles d'Honshu (Hondo), Kyushu et Shikoku au sein l'archipel nippon, déconnexion entre l'île du Nord et l'île du Sud en Nouvelle-Zélande, rétrécissement des péninsules du Yucatan et de la Floride, etc. L'ennoiement partiel ou total de quelques petites plaques continentales est à signaler par exemple les Grands Bancs au large de Terre-Neuve, leurs profondeurs actuelles étant de 50 à 100 m ; le cas le plus emblématique est à n'en point douter celui du terrane des Seychelles dont la superficie était de l'ordre de 50 000 km² au moment du maximum glaciaire pour se réduire de nos jours à des îles granitiques de quelques dizaines de km². Comme mentionné ci-devant, on peut proposer le terme de "rétraction insulaire" s'appliquant à d'autres terres plus ou moins totalement immergées, en particulier dans la partie centrale de l'Océan Indien entre l'île de la Réunion et le Deccan : les bancs des Chagos, de Saya de Malha, de Nazareth Bank et des Maldives. Le Dogger Bank en mer du Nord avec une profondeur moyenne de 20 mètres

en est également une illustration ; la remontée du niveau des mers pendant l'Holocène nous étant connue de façon précise, il est possible de dater la disparition de ces paléo îles, par exemple vers 8500 BP pour le Dogger Bank (Peltier, 1998, p. 637). Sur ce haut-fond, des os de mammoths et de rhinocéros ont été trouvés ainsi que des artefacts de chasses prouvant que des hommes du Mésolithique ont occupé cette terre. Ces éléments démontrent que les modifications résultant de la dernière déglaciation ont eu des conséquences notables sur la géographie actuelle du continent européen, des terres australasiennes et d'en une moindre mesure pour l'Asie et l'Amérique du Nord. A contrario, l'Amérique du Sud, l'Afrique et Madagascar ont été peu affectées par cette transgression marine de par l'étroitesse ou l'absence de plates-formes continentales à leur périphérie.

Le cadre géographique étant posé, il convient de préciser l'évolution du système TOA quant à ses relations avec l'évolution de la biosphère et le "phénomène humain" pour reprendre le terme de Teilhard de Chardin. C'est en effet pendant cette courte période de l'Holocène que l'*Homo sapiens* va progressivement et de plus en plus rapidement modifier sa relation à l'environnement. Le même philosophe Teilhard de Chardin évoquait en 1955 une "noosphère" pour définir selon les usages de l'époque une nouvelle relation entre l'Homme et la nature. En 1995, c'est le météorologue Paul Josef Crutzen qui propose à son tour de créer une nouvelle ère dite de l'Anthropocène qui succéderait à l'Holocène pour la période postérieure des prémises de révolution industrielle du XIII^e siècle. Si le terme n'est pas encore validé par la communauté scientifique, il n'en est pas moins dans l'esprit du temps ou plus exactement le *Zeitgeist* comme le démontre l'article de Clive Hamilton et Jacques Grinevald intitulé "*Was the Anthropocene anticipated?*"

"Le concept d'anthropocène est un produit de la récente intelligibilité interdisciplinaire de la Terre en tant que planète en évolution introduite dans les années 1980 par le Programme International Géosphère-Biosphère et les sciences du Système Terre » . (Hamilton & Grinevald, 2015)

Autant que faire se peut, ce sera dans cet esprit que l'on tentera de présenter dans ce qui suit les interactions Géosphère-Biosphère-Anthroposphère, le concept de géosphère incluant *de facto* le système TOA utilisé précédemment qui relève plutôt de la compétence des modélisateurs du climat. Le nouveau paradigme de la multidisciplinarité et la volonté de décloisonnement des disciplines traditionnelles résultent de l'accroissement exponentiel de la quantité d'informations scientifiques dans tous les domaines. Ce phénomène qualifié de "mégadonnées" ou *big data* procède de plusieurs facteurs dont l'accroissement sans précédent de la communauté scientifique mondiale et la multiplication extraordinaire des moyens de traitements et d'accès à l'information. Ceci a une conséquence directe sur la pratique scientifique. Alors qu'elle se faisait dans un contexte où les données et les observations étaient rares, les chercheurs sont désormais confrontés à pléthore d'informations impliquant à la fois une évolution rapide des connaissances et une critique tatillonne des multiples informations disponibles parfois contradictoires ou d'une fiabilité douteuse. Il s'agit moins de décrire un phénomène par le détail d'une chaîne de causalités que de comprendre les processus multiples dont il est l'expression. Cette ambition peut être appliquée à l'étude du phénomène de complexification progressive des sociétés humaines en essayant d'en hiérarchiser les étapes. Dans le cadre limité qui est celui de mieux comprendre les processus géohistoriques à diverses échelles de temps et d'espace, c'est le critère de densité de populations humaines qui permet d'évaluer de manière objective l'importance des

phénomènes sous-jacents. Sur ce point, deux faits majeurs s'imposent à savoir la révolution néolithique et la révolution industrielle.

Alors que vers 12 000 BP des tribus de chasseurs-cueilleurs s'essaient à la domestication des plantes et des animaux dans les steppes arborées à la charnière de l'Eurasie et de l'Afrique, lieu idéal d'un fort brassage de population, certains peuples occupent déjà des terres isolées sur les marges extrêmes de l'archipel monde et de l'œkoumène. A ce titre, les aborigènes de Tasmanie⁴²⁵ constituaient une des populations les plus marginales par rapport à cette trame humaine lancée sur les terres émergées ; toutefois leur extermination rapide au début du XIX^e siècle ne permet pas une étude approfondie de leur culture. Le seul équivalent géohistorique pour lequel on dispose de davantage d'information ethnologique se trouve en Terre de Feu, à la pointe méridionale de l'Amérique du sud vers 54°S. Le peuplement de cette île serait contemporain de l'apparition de l'agriculture au Moyen-Orient et correspondrait à l'ultime avancée de la culture Clovis le long de l'Autoroute du Varech depuis l'Alaska. Une partie des populations fuégiennes notamment les Selk'nam, se sont séparés génétiquement du pool du mainland patagonien dès 11 000 BP, phénomène accentué lorsque les derniers ponts terrestres enjambant le futur détroit de Magellan disparaissent vers 6000 BP. (Lalueza & et al., 1997, p. 41). Le cas des peuples fuégiens peut donc être considéré comme représentatif de l'évolution de cultures paléolithiques sur les marges de l'œkoumène.

Nous utiliserons les travaux de plusieurs anthropologues en Terre de Feu concernant du peuple les Yamana, les Alakaloufs et les Selk'nam dont Mireille Guyot (1968). Un des premiers intérêts de l'étude tient à ce qu'elle fournit des cartes détaillées des groupes humains qui se partagent la région ce qui autorise une analyse fine des territorialités tribales ; la population de l'ensemble de ces peuples devait être de l'ordre de 10 500 personnes vers 1850 sur une surface de 80 000 km² soit 1 habitant pour 8 km² (Figure 150A). La grande île de la Terre de Feu couvre à elle seule 38 000 km² et est partagée par les Alakaloufs, peuple pratiquant la pêche dans les fjords et les étroits chenaux de la partie sud-ouest, et les Selk'nam, peuple chasseurs-cueilleurs ne pratiquant pas la pêche et n'utilisant pas de pirogues, dans la partie est et nord. Le domaine de ces derniers était divisé en 39 territoires familiaux soit environ 1000 km²/Famille avec une population totale de 3900 personnes en 1850 soit 1 habitant pour 10 km² (Figure 150B). La superficie de chaque groupe familial varie entre 300 (Omakas, 27) et 3500 (K'auwes, 16). Avant l'arrivée des européens à partir de 1830⁴²⁶, la tradition locale évoque sans date précise le fait que les ancêtres des Auš⁴²⁷ auraient chassé les Alakaloufs de la grande terre de l'est puis se seraient vu eux-mêmes refoulés dans l'extrême sud-est par les Selk'nam venus de Patagonie. Le grand territoire familial de plus de 3000 km² des K'auwes comprend de hautes collines stériles atteignant 600 m au sud rendant difficile l'accès au fjord d'Almirantazgo, des lacs et des tourbières au nord et un piémont couvert d'une maigre végétation arbustive (Figure 150C). Bien que variés, les terrains de chasse étaient limités en termes de production de biomasse expliquant les faibles densités de population. Les Selk'nam n'étaient plus que 4000 en 1880, la dernière représentante de cette culture étant morte en 1966. Quant au territoire des K'auwes, il est devenu le parc naturel de Karukinka⁴²⁸ financé par la banque Goldman Sachs dans le cadre de ses actions de *green washing*.

⁴²⁵ 43°S. Vers 12 000 BP, la Tasmanie est encore une péninsule rattachée au mainland australien. L'insularisation ne sera effective que vers 10 000 BP (Voir Figure 78).

⁴²⁶ Dont Charles Darwin.

⁴²⁷ Les Auš ou Haushs bien que rattachés aux Selk'nam parlaient une langue différente et se nourrissaient principalement de phoques alors que la base alimentaire des Selk'nam reposait sur le Guanaco et se contentaient de manger les poissons morts s'échouant sur les côtes.

⁴²⁸ Signifie "*la dernière terre des hommes*" en langue Selk'nam et se rapporte à la Terre de Feu dans son intégralité. Ushuaïa est d'origine Yamana pour indiquer le fond d'une baie.

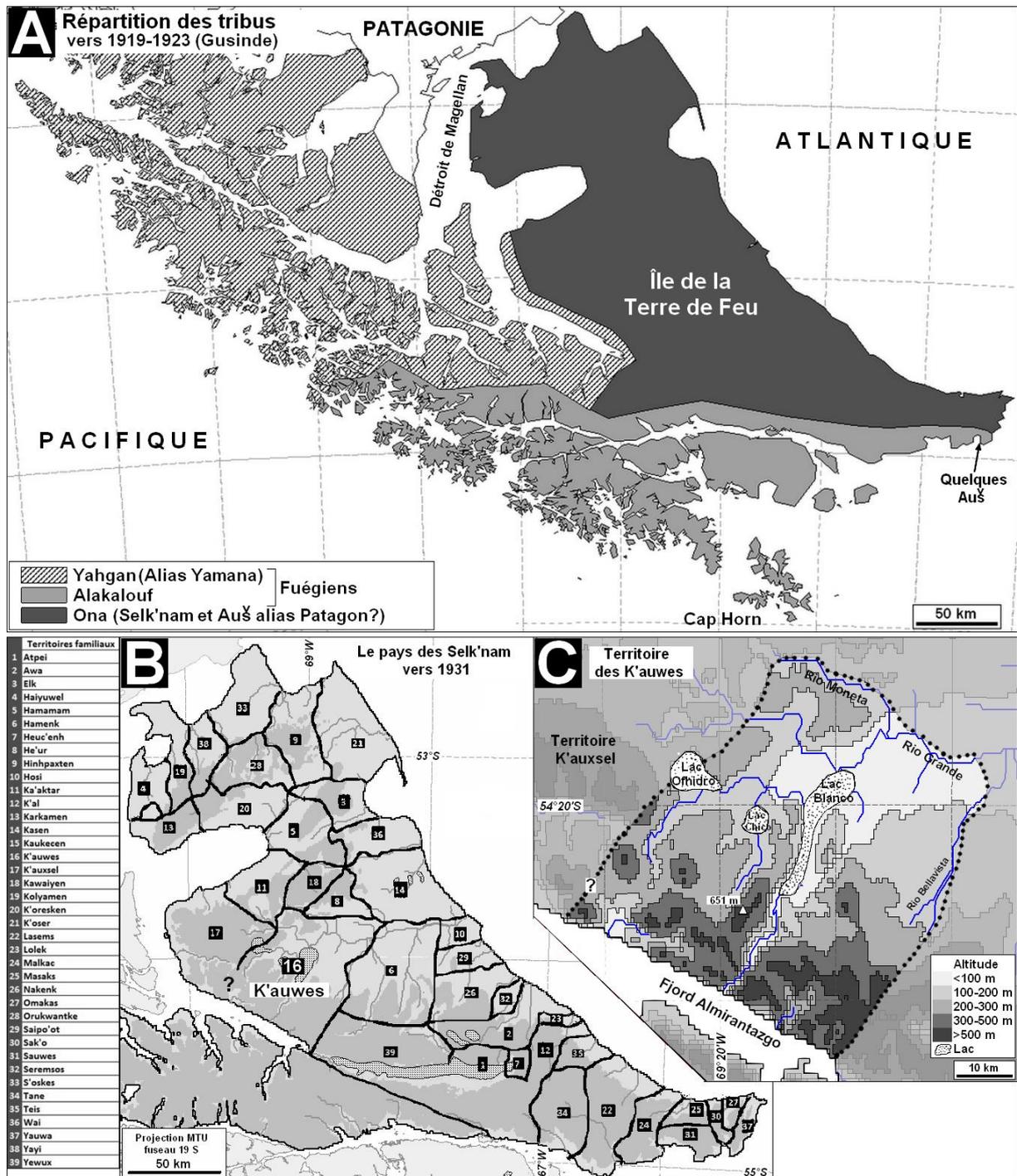


Figure 150: peuples de la Terre de Feu (Adapté de (Guyot, 1968, p. 21 et 62)).

(A). D'après la Mission scientifique au Cap Horn (1882-1883).

(B) Le peuple Selk'nam vers 1920 d'après Karl Streit et Martin Gusinde.

Ici comme ailleurs, la disparition des autochtones et de leur culture serait due principalement aux maladies importées dont la rougeole de 1885 à 1924 combinées avec un processus d'acculturation par l'entremise des missions, des colons et des administrations locales qu'elles soient chilienne ou argentine⁴²⁹. Deux points méritent d'être soulevés ; les

⁴²⁹ La frontière divise en deux l'ancienne terre des Selk'nam selon le méridien 66°37' 50"E!

Selk'nam étaient strictement chasseurs cueilleurs et présentaient une physionomie bien différente des autres peuples notamment par leur haute taille de 1 mètre 80 qui pourrait être à l'origine des géants patagoniens relatés par les premiers explorateurs. Le deuxième point porte sur la richesse culturelle de ces peuples et notamment de leurs langues. Deux versions s'opposent sur ce point : un magazine argentin résume ainsi la culture des Fuégiens :

« [La langue des Selk'nam était] "primitive et leur vocabulaire restait limité du fait du peu de leur nécessité. La syntaxe très simple et directement était accouplée à un système de numération se limitant à compter jusqu'à 5"⁴³⁰.

À l'inverse, les travaux des ethnologues indiquent clairement que la langue Selk'nam comptait pas moins de 30 000 mots ce qui est remarquable pour une communauté linguistique aussi réduite et se limitant à la tradition orale (Guyot, 1968). Peut-être, faut-il y voir une exagération dans l'un ou l'autre sens.



Géogénétique humaine et Préhistoire

La paléogéographie de l'espèce humaine devient plus précise de par l'importance des données archéologiques mais également du fait de l'apport de la génétique et de la génomique pour mieux comprendre la filiation entre les diverses populations qui se partagent l'Ancien Monde ; ces études génétiques doivent être considérées comme le *Deus ex machina* de la paléontologie tant elles permettent de démêler et de documenter l'écheveau de l'évolution récente de l'espèce humaine notamment sur l'espace eurasiatique. Il n'est pas possible de décrire ici l'importance de cette révolution scientifique et nous n'évoquerons que ses principales implications pour notre objectif qui est de comprendre l'expansion de l'espèce humaine sur l'archipel monde. L'étude de la génomique humaine démontre si nécessaire que l'évolution n'a pas été linéaire avec une succession d'espèces mais qu'elle fut plus complexe.

Il y a cent mille ans, trois espèces se partagent la bande de terres allant de l'Europe à l'Extrême-Orient avec des régions de recouvrements et de métissage entre les Néandertaliens, les Dénisoviens et les Sapiens. Ainsi, il est patent qu'une partie des gènes des deux premières espèces aujourd'hui éteintes se retrouve en proportion variable dans le génome des populations actuelles d'*Homo sapiens*; Elle est de l'ordre de quelques % pour les gènes néandertaliens dans les populations européennes (1 à 4%); de même, des gènes dénisoviens ont été observés parmi diverses populations asiatiques dont les Inuits, les Tibétains, les Mélanésiens, les Papous (6%) et les Aborigènes australiens. Les deux espèces néandertalienne et dénisovienne ont disparues sans doute au cours de la dernière glaciation mais certains de leurs gènes ont été préservés dans le génome humain actuel car ils présentaient des avantages adaptatifs au froid (Inuits), à l'altitude (Tibétain) ou sur le plan immunologique (Nouvelle-Guinée et Australie). La cause de leurs extinctions reste encore énigmatique mais il est probable qu'elle résulte de plusieurs facteurs: concurrence des groupes d'*Homo sapiens* plus techniquement évolués, sensibilité aux maladies tropicales importées, faible pool génétique et "absorption" génétique par les Sapiens, moindre adaptabilité aux changements climatiques, etc. Vers 30 000 BP, l'homme moderne domine l'ensemble de l'Ancien Monde. Seules quelques populations subsistent localement dont des groupes métissés Sapiens-Néandertaliens dans le sud de l'Espagne.

⁴³⁰ Latitud-argentina Magazine, "Indiens d'Argentine > Ona-Selk'nam", 24 août 2010 (Voir <https://www.latitud-argentina.com/blog/indiens-argentine-ona-selknam/>).

Agriculture et croissance démographique à l'échelle mondiale

La croissance démographique à l'échelle de plusieurs continents y compris l'Amérique du Nord entre 12 000 et 2000 BP aurait été de l'ordre de 0,04 %, ce qui correspond à un doublement de la population en 1700 ans, un centuplement en 11 500 ans (Zahid & et al., 2016) ; il s'agit d'un taux moyen annuel d'équilibre dans le temps long de peuples continuant à pratiquer la chasse et la cueillette ou ayant adoptés l'agriculture et l'élevage avec des phases de transitions progressives et d'éventuelles cohabitations mutuellement bénéfiques pour les deux types de sociétés. Les estimations diverses des Figure 147 et Figure 148 permettent d'évaluer l'impact de la transition néolithique sur la croissance démographique préhistorique ; sur la période considérée, les sociétés de l'Ancien Monde pratiquaient l'agriculture ou en voie de le faire alors que les tribus amérindiennes continuaient majoritairement à dépendre des ressources naturelles de leur milieu. Malgré cela, les taux de croissance de ces deux populations restent semblables pendant une grande partie de l'Holocène ; pour l'ensemble de l'Amérique du Nord, cet accroissement se caractérise par sa constance avec des taux à long terme de $0,05 \pm 0,03$ % pendant toute la période considérée.

Ce résultat étonnant suggère que l'adoption de l'agriculture ne peut être la seule cause d'une augmentation du taux annuel de croissance de la population à long terme ; ce fait tend à confirmer que l'accroissement de la population humaine à ces échelles de temps et d'espace est antérieure au processus de néolithisation à l'introduction de l'agriculture. Aux échelles locales et régionales, des fluctuations sur de courtes périodes de cent à mille ans résulteraient de facteurs externes (brusque modification du climat ou des milieux naturels) ou interne (conflits, épidémie, changement du mode de subsistance, etc.).

Paléo peuplements dans les îles nusantariennes

En 2003, la découverte d'une espèce naine d'*Homo erectus* sur l'île de Florès en Indonésie et plus spécifiquement en Wallace est venue remettre en cause cette vision continentaliste ; Cette île faisant partie de la Wallace n'a jamais été connectée au continent ce qui implique ceci étant à plusieurs titres d'un intérêt certain pour notre propos fait qu'il sera commenté en évitant d'entrer dans les controverses qu'il suscite encore. L'*Homo erectus floresiensis*, ou Homme de Florès, aurait été présent sur l'île jusque vers 60 000 BP alors que l'on pensait l'espèce éteinte sur l'ensemble de la Terre depuis 0,6 Ma. Elle serait à peu près concomitante de l'arrivée des premiers *Homo sapiens* dans la région, d'où une hypothèse de cause à effet (Callaway, 2016). Toutefois, un autre facteur a pu contribuer à fragiliser davantage la population déjà réduite sur une île de 15 000 km² : en supposant une valeur moyenne pour la densité de 1 hab./10 km² pour des chasseurs-pêcheurs-cueilleurs alors le pool de population devait être de l'ordre de 1500 personnes ; en 74 000 BP, l'énorme éruption volcanique du Mont Toba sur l'île de Sumatra aurait provoqué un refroidissement brutal durant une décennie suivie d'une période froide pendant environ 1000 ans (Robock, et al., 2009). Ces observations suggèrent que les causes de la disparition de l'Homme de florès seraient dues pro parte à un facteur structurel lié à l'endogamie d'un faible pool génétique venant se combiner avec des événements extérieurs comme la concurrence avec les *Homo sapiens* ainsi que l'impact climatique et environnemental causé par l'éruption du Toba.

Une autre espèce humaine, l'*Homo luzonensis*, a été découverte sur l'île de Luçon en 2019 donc dans la même région insulaire à l'est de la ligne de Wallace et datée d'une période du même ordre entre 50 000 et 67 000 BP (Détroit & al., 2019). Jusqu'à plus ample informé, cette nouvelle espèce d'homininé présenterait des caractéristiques anatomiques l'apparentant à la fois à l'*Homo Habilis*, l'*Homo erectus* mais aussi à l'Australopithèque. Ainsi, ces deux populations relictuelles auraient-elles trouvé refuge sur les îles nusantariennes jusqu'à l'arrivée des premiers migrants venant d'Afrique. Le cas de l'*Homo floresiensis* et sans doute son possible cousin de l'Île de Luçon illustrent une tendance forte de la paléontologie à la multiplication des espèces d'hominidés et d'homininiens de sorte que la phylogénie de l'Homme autrefois simple est devenue bien plus complexe avec de nombreuses branches adventices provoquant l'existence de plusieurs espèces au même moment pouvant donner lieu à des métissages comme tend à le démontrer la génomique des populations passées et présentes. De ce fait, priorité sera donnée aux phases de migrations à partir de l'Afrique que la paléontologie nous permet d'esquisser avec un intérêt tout particulier pour celles de l'*Homo sapiens*.



La géohistoire : une fonction d'état d'un système spatio-temporel

D'après (Belfekih, Bernoussi, & El Jaï, 2019)

Une définition formelle des systèmes spatio-temporels est donnée par une équation d'état S associée et une fonction de sortie E dans un espace de Hilbert telle que :

$$[20] \text{ équation d'état (S) : } \dot{z}(t) = A.z(t) + B.u(t) \text{ avec } 0 < t < T, \text{ avec } z(0) = z_0$$

$$\text{équation de sortie (E) : } y(t) = C.z(t)$$

Ces éléments s'interprètent comme suit pour les processus géohistoriques :

- L'état initial $z(0)$ peut correspondre au Big Bang (13 Ga) pour les astrophysiciens, à la formation de la Terre (4,3 Ga) pour les géosciences, à l'apparition de la vie sur les terres émergées (0,44 Ga) pour les biologistes, à l'apparition des ancêtres directs de l'homme (3 Ma) pour les anthropologues, à la sortie d'Afrique d'*Homo sapiens* (0,3 Ma), au désenclavement planétaire (1500 AD), etc. Il va de soi que le choix d'un état initial suppose en théorie que soient pris en compte des éléments qui le précèdent... sauf dans le cas du Big bang ;
- T représente la durée totale du temps de mesure (d'observation). Il ne faut pas oublier que le géohistorien (l'observateur) est à la fois celui qui étudie une période du passé et une région de la Terre mais qu'il est aussi un témoin des processus de son époque, ce qui n'est pas sans influencer sur sa perception et ses jugements qu'il a sur des faits s'étant déroulés en un autre temps et un autre lieu ;
- A est la dynamique (au sens de la dérivée \dot{z}) du continuum spatio-temporel, soit le quoi, quand, où et comment de chaque événement, si infime soit-il ;
 U est l'espace des contrôles supposé former de boucles fermées et des rétroactions (Belfekih, Bernoussi, & El Jaï, 2019, p. 12) avec : $[20bis] u(t) = Q.z(t) \implies \dot{z}(t) = (A + B.Q).z(t)$
- Y est l'espace d'observation formé par l'ensemble des informations connues de façon indirecte (archéologie, paléontologie, paléogénétique, mesures y compris statistiques, etc.) ou directe (témoins, chroniqueurs et historiens du passé), ces « sorties », au sens de mesures ou d'observations, devenant le corps de la géohistoriographie ;
- A, B, C sont des opérateurs de dynamique, de contrôle et d'observation.

Cette formulation que d'aucuns rejetteront comme excessive voire superfétatoire doit être considérée comme fondamentale pour les équipes se disant nécessairement « multidisciplinaires » du fait de la complexité du processus spatio-temporel qu'elles étudient. Elle permet de passer d'un niveau rhétorique et incantatoire à un *modus operandi* plus propice à une synergie des connaissances. La géohistoire peut-elle être abordée comme un examen des processus spatio-temporels comme un autre ayant conduit à la formation de l'œkoumène actuelle ? Pourquoi pas !