

MODULE 2

LE MILIEU MARIN DE LA GRANDE CARAÏBE

OBJECTIFS

Connaître les caractéristiques générales du milieu marin et des écosystèmes côtiers dans la zone caraïbe élargie.
Comprendre les caractéristiques physiques et écologiques qui font de la Mer des Caraïbes un système d'écorégions.

THÈMES

Caractéristiques physiques de la Mer des Caraïbes et du Golfe du Mexique
Les écosystèmes côtiers les plus fréquents en Mer des Caraïbes
La province biogéographique côtière tropicale de l'Atlantique Nord-ouest et ses écorégions marines
Liens Connectivités biologiques entre populations et écosystèmes (1/2 h)

DURÉE

4 h

MODULE 2

THÈME 1

OBJECTIFS

IMPORTANCE

PRÉSENTATION

EXERCICE

DURÉE

LE MILIEU MARIN DE LA GRANDE CARAÏBE

Caractéristiques physiques de la Mer des Caraïbes et du Golfe du Mexique

Connaître les principaux facteurs physiques et chimiques influant sur les conditions environnementales et les habitats dans la Mer des Caraïbes.

Ces connaissances sont essentielles à l'élaboration de stratégies de protection efficaces.

Cours magistral

Visite de site : l'habitat marin (mangrove, étang côtier) pour observer les conditions environnementales^a

1 h 1/2

^a Cette visite peut être combinée avec la sortie de terrain des Modules 3 et 8, afin de mieux utiliser le temps disponible.

ENSEIGNEMENTS

- Les caractéristiques physiques et chimiques de l'eau de mer déterminent les conditions de l'habitat.
- Le mode de circulation des courants océaniques dans la Mer des Caraïbes est complexe et encore mal connu. Certaines données suggèrent cependant qu'il influe sur la dispersion des œufs, des larves, des polluants et des espèces migratrices dans toute la région.
- Les effluents terrestres influent sur les conditions environnementales de la zone côtière et de ses habitats (étangs côtiers, mangroves, récifs coralliens, etc.).

2.1 Caractéristiques physiques et chimiques de l'eau de mer

Bien qu'environ 71 % de la surface de la Terre soient recouverts d'eau de mer (Tait, 1981), l'environnement marin ne forme pas une seule masse d'eau homogène mais englobe de nombreux sous-environnements : des abysses froides et obscures aux zones de surface qui sont bien éclairées et brassées par l'action des vagues et de l'océan ouvert à la zone de transition, très variable, entre terre et mer. La mer abrite la vie depuis les origines et recèle une variété et une grande abondance d'organismes, du minuscule phytoplancton aux gigantesques baleines. Elle procure de nombreuses ressources vivantes et des services qui ont joué depuis toujours un rôle important dans l'apparition et le développement des civilisations. Les variables déterminant la composition biotique et les caractéristiques des différentes zones sont les suivantes :

- ◆ lumière et profondeur ;
- ◆ température ;
- ◆ pression ;
- ◆ action des vagues ;
- ◆ courants ;
- ◆ marées ;
- ◆ composition chimique (salinité, gaz dissous, nutriments) ;
- ◆ type de fond (substrat) ;
- ◆ dispersion et migration des propagules ;
- ◆ disponibilité de la nourriture ;
- ◆ relations trophiques (prédation et concurrence) ;
- ◆ proximité des masses continentales.

Lumière et profondeur

La **lumière** est le facteur physique le plus important pour les êtres vivants marins car elle influe sur leur distribution, que ce soit directement (par la photosynthèse, la température et la vision) ou indirectement. Son intensité et sa longueur d'onde se modifient en traversant les masses d'eau en direction du fond. À lumière incidente constante, la quantité de lumière pénétrant à travers la surface dépend :

- ◆ des conditions à la surface (une surface turbulente réfléchit davantage de lumière que si elle est calme) ;
- ◆ de l'absorption et de la réfraction par la colonne d'eau ;

◆ de la turbidité de l'eau.

Plus l'eau est trouble, moins la lumière peut y pénétrer. Même dans les eaux transparentes des océans, 80 % environ de la lumière est absorbée dans les 10 premiers mètres sous la surface. Sachant que les fosses du plancher océanique peuvent atteindre une profondeur de 11 000 mètres, la lumière (et la chaleur qui l'accompagne) est donc confinée à une très mince couche de surface.

Autre facteur important, l'eau réfracte (« brise ») la lumière et absorbe plus ou moins rapidement les différentes longueurs d'onde. Les infrarouges et les ultraviolets sont habituellement les premiers absorbés. La zone bleue et verte du spectre est celle qui pénètre le plus loin dans l'eau claire. D'autres facteurs, comme la turbidité et la concentration en plancton, affectent également le taux d'absorption et le taux d'atténuation des différentes longueurs d'onde.

Il est important de noter qu'en raison de la pénétration limitée de la lumière, la production primaire en milieu marin a lieu principalement dans les couches proches de la surface, là où la photosynthèse est possible. Bien que des organismes différents se regroupent à différents étages de la colonne d'eau, la faune marine est surtout abondante dans les couches de surface (moins de 50 m, jusqu'à 100 m en eau claire près de l'équateur en été) (Tait, 1981).

Température

La température est l'une des variables océanographiques les plus importantes. Elle influe principalement de deux façons sur les processus écologiques en milieu océanique :

- ◆ en affectant la photosynthèse et
- ◆ en affectant le brassage de la colonne d'eau.

Le taux de photosynthèse augmente avec la température, jusqu'à un maximum donné. Il diminue ensuite rapidement au-delà de ce maximum. Il a été suggéré que le rendement de l'activité photosynthétique pourrait être équivalent en climat tempéré et tropical, en raison de la capacité d'adaptation du phytoplancton correspondant (Tait, 1981).

Le brassage de la colonne d'eau sous l'effet de gradients de densité produits par la température favorise la descente des nutriments vers les niveaux plus profonds de l'océan (l'eau froide est plus dense, donc elle s'enfonce). Voir aussi les informations concernant l'effet de la température sur les gradients de densité dans le sous-chapitre sur les courants (2.5).

L'un des principaux facteurs contribuant aux gradients de température en milieu marin est la latitude. À basse latitude, comme dans la Mer des Caraïbes, la chaleur est absorbée à la surface, formant une mince couche chaude où la température se situe entre 26 et 30°C. Cette couche est séparée de l'eau profonde plus froide par une couche de discontinuité ou thermocline, habituellement entre 100 et 500 mètres. La permanence de cette thermocline (à la différence des eaux tempérées) est la principale raison pour laquelle les mers tropicales (dont la Mer des

Caraïbes) sont considérées comme les plus appropriées pour la mise en œuvre de la technologie de conversion de l'énergie thermique océanique (CETM/OTEC).

Les gradients thermiques provoquent de forts mouvements verticaux et horizontaux des masses d'eau. L'eau froide s'enfonce en entraînant ses nutriments. Le gradient de température entre les eaux superficielles et profondes (thermocline) produit une grande stabilité de la masse d'eau en empêchant l'ascension et le recyclage des nutriments vers les couches photosynthétiques supérieures (oligotrophes). Ce mécanisme régule la distribution des organismes (grande diversité tropicale) et influe sur la taille, le métabolisme, la croissance, la reproduction et la survie des organismes marins.

La température de l'eau exerce un puissant effet régulateur sur la distribution et le comportement des organismes marins. Si l'on y ajoute la concentration de la productivité dans les couches superficielles des mers tropicales, on peut prédire que les ressources halieutiques des Caraïbes seront très concentrées dans une mince couche superficielle de la Mer des Caraïbes. Et de fait, une grande partie de la production de poisson a lieu dans les hauts-fonds des talus océaniques et des récifs coralliens.

Courants

« Les principaux courants océaniques sont produits par l'action combinée du vent et de la pression atmosphérique à la surface, d'une part, et d'autre part des différences de densité entre différentes parties de la masse d'eau. » (Tait, 1981). En outre, la rotation de la planète influe aussi bien sur l'action du vent que sur les courants eux-mêmes. Les différences de densité sont dues à des différences de température et de salinité, les premières résultant du refroidissement et de l'enfoncement des masses d'eau aux pôles Nord et Sud.

L'enfoncement des masses d'eau aux deux pôles produit des circulations qui se manifestent sous la forme de courants « profonds », entraînant nutriments et oxygène en profondeur. Les eaux plus denses qui s'enfoncent aux pôles sont constamment remplacées par de l'eau de surface plus chaude, provenant des régions équatoriales, qui donnent naissance à des courants « de surface ».

L'existence de courants circulaires (tourbillons ou gyres) à petite ou moyenne échelle peut contribuer à l'endémisme des espèces et influencer sur la dispersion des organismes, en particulier aux premiers stades (œufs et larves), et ainsi sur le recrutement des larves et des juvéniles dans les eaux peu profondes.

Nous décrivons ci-après les caractéristiques des courants marins dans la grande Caraïbe, en raison de leur importance pour la dispersion des organismes à l'échelle régionale (larves et adultes confondus) et la propagation de l'eau douce, des sédiments et des polluants d'origine terrestre. Ces informations sont empruntées à J. A. Gyory, J. A. J. Mariano et E. H. Ryan, de l'Université de Miami (<http://oceancurrents.rsmas.miami.edu/caribbean/cari>)

Les courants dans la Mer des Caraïbes

La Mer des Caraïbes est une mer semi-fermée, bordée par les masses continentales de l'Amérique du Sud et Centrale. Elle est séparée de l'Océan Atlantique par l'arc insulaire antillais, qui filtre les entrées d'eau océanique (Murphy et al. 1999 ; Andrade et Barton 2000). La Mer des Caraïbes est fortement stratifiée sur ses 1200 premiers mètres de profondeur, peu stratifiée entre 1200 et 2000 m, et presque homogène en dessous de 2000 m. Cette structure est directement liée aux profondeurs des seuils dans l'arc antillais, qui empêchent la pénétration des eaux profondes dans la zone caraïbe (Gordon 1967).

Elle reçoit relativement peu d'apports d'eau profonde, principalement par les eaux profondes nord-atlantiques, qui passent par le bassin des Îles Vierges (Watlington et Donoso, 1996).

La couche de surface pénètre dans la Mer des Caraïbes à travers une série de détroits entre les îles, en provenance directe du Courant Nord-équatorial et du Courant des Guyanes. Ce dernier pénètre dans la zone caraïbe en suivant la côte nord-est de l'Amérique du Sud en étant significativement influencé par les effluents d'eaux douces de l'Amazone et de l'Orénoque. L'Amazone est la plus importante source ponctuelle d'apports en eau douce vers l'océan. Son gigantesque panache de surface s'étend sur des centaines de kilomètres vers le nord-ouest. Il exerce une influence importante, et on sait qu'il affecte la circulation océanique et la qualité des eaux de la Mer des Caraïbes. À l'appui de cette supposition, la plupart des bouées dérivantes déployées par Limeburner et al. (1995) près de l'embouchure du fleuve sur une année se sont finalement dirigées vers la Mer des Caraïbes au bout de 1 à 6 mois.

Ces courants parcourent la Mer des Caraïbes et le Golfe du Mexique avant de s'échapper vers l'Atlantique Nord en formant le Gulf Stream. Ce schéma est très général et des études récentes (mettant en œuvre des suivis par satellite, des modèles de simulation, etc.) montrent que les trajectoires des particules sont plus complexes et connaissent des variations temporelles et géographiques qui compliquent les schémas de circulation océanique.

Les relevés hydrographiques historiques de Wust (1964) et Gordon (1967) et les observations et modèles numériques de Johns et al. (2002) indiquent que les entrées d'eau dans la Mer des Caraïbes passent en majeure partie par les détroits de la Grenade, de Saint-Vincent et de Sainte-Lucie, au sud-est. L'eau continue ensuite vers l'ouest en formant le Courant Caraïbe, principale circulation de surface dans la Mer des Caraïbes. Le plus fort courant occupe le tiers sud de la Mer des Caraïbes et fait partie de ce Courant Caraïbe (Gordon 1967 ; Kiner 1983). Dans cette zone, les vitesses les plus élevées en surface peuvent atteindre 70 cm/s le long des côtes du Venezuela et des Antilles Néerlandaises (Fratantoni 2001). Il existe également de forts courants (60 cm/s) le long des côtes du Panama et de Colombie, mais peu de circulation sur la Dorsale Méso-américaine car la majeure partie du flux vers le nord-ouest est canalisée dans une tranchée/bassin au sud-ouest de la Jamaïque. Le courant s'infléchit fortement vers l'ouest en traversant la fosse des îles Caïman et entre dans le Golfe du Mexique sous la forme d'un étroit courant limitrophe qui suit les contours de la péninsule du Yucatán (Fratantoni 2001). Ce Courant du Yucatán entre dans le Golfe du Mexique par le Déroit du Yucatán. Il se sépare finalement du Banc de Campêche et devient le « Courant de Boucle » (*Loop Current*), puis le Courant de Floride en sortant du Golfe du Mexique par le Déroit de Floride (Molinari et Morrison 1998).

Morrison et Smith ont estimé la vitesse générale de l'eau entre la Ride d'Aves et le Déroit de Floride (1990). Ils ont détecté un maximum de transport dans le Déroit de Floride environ 90 à 100 jours après avoir mesuré un maximum dans l'est de la Mer des Caraïbes. La vitesse de propagation est donc d'environ 30-40 cm/s, selon le trajet et la vitesse moyenne du courant entre la Ride d'Aves (65°O) et le Déroit de Floride.

Hernandez-Guerra et Joyce (2000) ont trouvé des masses d'eau différentes dans deux zones : du Venezuela jusqu'à 13°N environ, et de 14°N à Porto Rico. Cette dernière zone semble provenir des Tropiques et de l'Atlantique sud, et il existe un courant vers l'ouest de 130 cm/s au milieu du bassin, tandis que le flux s'écoule vers l'est en dessous. De 14°N à Porto Rico, la masse d'eau est un mélange d'eaux de surface de l'Atlantique Nord, d'eaux de l'Amazone et d'eaux douces locales sud-américaines.

Ceci étant dit, la circulation connaît d'importantes variations dans l'espace et le temps dans la Mer des Caraïbes, avec des *tourbillons et des méandres de moyenne échelle*. On a constaté que plusieurs processus physiques dépendaient *de la topographie du fond, de la force des vents, de la largeur et du cisaillement des courants, ainsi que de la collision des tourbillons du Courant du Nord-Brésil avec les Antilles*. La plupart des tourbillons ou des grands méandres apparus sur les tracés des bouées dérivantes (Molinari et al. 1981) se produisaient près de structures topographiques importantes comme les rides d'Aves (64°O) et de Beata (72°O) ou la Dorsale Méso-américaine (82°O). Bien que ces auteurs affirment que ces caractéristiques provoquent des perturbations dans l'écoulement des courants par-dessus elles, au même titre que les New England Seamounts influencent le Gulf Stream (Fratantoni 2001), d'autres ne sont pas du même avis.

Plus récemment, Andrade et Barton (2000) ont décrit pour la première fois, à partir de données sur les anomalies du niveau de la mer, la dynamique et la durée de vie de la propagation des tourbillons dans la Mer des Caraïbes. Les gyres cycloniques et anticycloniques passent au nord du 15^{ème} parallèle, avec plusieurs tourbillons qui traversent l'Arc Antillais (par les passages d'Anegada et de Sainte-Lucie et au nord de Trinité) à différentes saisons et se dirigent tous vers le nord par le centre de la zone caraïbe. Il semble qu'une grande partie de ces tourbillons prenne naissance dans la région équatoriale, à la réflexion du Courant du Nord-Brésil, progresse ensuite vers le nord-ouest et que certains de ces tourbillons parviennent à s'insinuer en Mer des Caraïbes à travers les interstices des Petites Antilles. Une fois en Mer des Caraïbes, ils se reforment et reprennent leur route vers le nord-ouest. Un autre tourbillon emprunte le passage des Îles du Vent et longe le bassin des îles Caïman, pour ressortir six mois plus tard par le Déroit du Yucatán. Les tourbillons se dissipent cependant presque tous au niveau de la Dorsale du Nicaragua, en se heurtant aux hauts-fonds et aux bancs. Andrade et Barton ont également observé que les tourbillons provenant du sud-ouest de la Mer des Caraïbes sont les seuls à n'être pas advectés depuis l'est de la Mer des Caraïbes ni directement liés au Courant Caraïbe, ce qui suggère qu'ils se formeraient sous l'effet du gradient de salinité et de l'action directe du vent. Ils en concluent que le gyre de Panama-Colombie est une large circulation qui se maintient dans cette zone, limitant ainsi la communication entre le Bassin de Colombie et le Bassin des îles

Caïman. Leurs recherches indiquent l'existence d'une sorte de barrière à la dispersion des larves entre le sud de la Mer des Caraïbes, d'une part, et ses zones centrales et nord-ouest d'autre part.

Cependant, des données d'altimétrie et des modèles numériques (Murphy et al. 1999 ; Ezer et Mellor 2000 ; Oey et al. 2003) montrent que les tourbillons cycloniques dans le Golfe du Honduras, nés près de la Dorsale du Nicaragua, se propagent vers l'ouest le long de la côte hondurienne. Ils jouent un rôle important dans les communications et le transport biologique associé le long des côtes caribéennes. En moyenne, un tourbillon met environ 10 mois pour aller des Petites Antilles au Déroit du Yucatán, avec des délais extrêmes de 7 et 17 mois.

Dans l'est de la Mer des Caraïbes, les tourbillons et méandres mesurent environ 100 km de largeur ; dans le nord-ouest, entre la Jamaïque et Cuba, entre 100 et 200 km ; et dans l'ouest, 200 à 500 km, peut-être en fonction de la largeur de leur courant d'origine. Dans le sud-est de la Mer des Caraïbes, les passages étroits des Petites Antilles réduisent la largeur des courants et les tourbillons y sont donc particulièrement étroits. Dans le nord-ouest, le passage des Îles du Vent, plus large, et le fossé entre la Jamaïque et Cuba ne font pas autant obstacle au courant et les tourbillons sont plus étendus. Enfin, dans le sud-ouest de la Mer des Caraïbes, il n'existe aucun obstacle au Courant Caraïbe, et c'est donc là que sa largeur et ses tourbillons sont au maximum.

L'explication la plus récente des variations à moyenne échelle fait intervenir les tourbillons/gyres du Courant du Nord-Brésil. Lorsque ceux-ci se brisent sur les détroits des Petites Antilles, leurs fragments dérivent vers l'ouest et la Mer des Caraïbes, formant des tourbillons et méandres moyens, d'un diamètre de 100 à 500 km, qui suivent l'axe du Courant Caraïbe (Fu et Holt 1983 ; Andrade et Barton 2000 ; Fratantoni 2001). La plupart des tourbillons caribéens sont anticycloniques et vont vers l'ouest, à travers un étroit couloir, à une vitesse moyenne de 15 cm/s. La durée typique de leur trajet des Petites Antilles au Déroit du Yucatán est donc le plus souvent de 10 mois (Murphy et al. 1999).

Dans la zone du Golfe des Mosquitos, au large du Panama (82°W), Molinari *et al.* (1981) ont observé une circulation dans le sens horaire contredisant la description d'un courant antihoraire faite par Wust (1964). Des bouées dérivantes ont cependant mis en évidence une circulation antihoraire dans cette zone, suggérant que bien que les tourbillons soient fréquents dans le Golfe du Mexique, il n'y a pas de gyre permanent à faible profondeur. Il existe cependant de grandes circulations semi-permanentes dans d'autres parties de la Mer des Caraïbes.

Tatai et al. (2005) ont montré que la circulation dans l'ouest de la Mer des Caraïbes (de la région du Récif Méso-américain à l'ouest de Cuba) s'effectue du sud-est au nord-ouest, avec au moins cinq tourbillons anticycloniques, larges chacun de 50 à 150 km, dans le Golfe du Honduras, le long de la côte hondurienne, et un tourbillon anticyclonique large de 300 km se propageant au sud-est du Déroit du Yucatán. Les données suggèrent qu'un tourbillon de moyenne échelle typique se déplace d'environ 220 km en 30 jours. Il lui faut donc 10 à 12 mois pour traverser la zone occidentale de la Mer des Caraïbes du sud-est au nord-ouest. Le nombre et la fréquence des tourbillons anticycloniques dans le Golfe du Honduras et dans les régions côtières du nord du Honduras dépendent de la fréquence, de la force et de la nature (cyclonique ou anticyclonique)

des tourbillons de moyenne échelle ; bien que l'on puisse rencontrer jusqu'à cinq tourbillons anticycloniques à la fois, il n'y en a parfois que trois.

L'entrée d'eaux profondes dans le bassin des Caraïbes étant relativement faible, le renouvellement des couches profondes s'effectue lentement et sur des intervalles de temps prolongés.

Ce mode de circulation affecte non seulement les flux de polluants et d'agents pathogènes mais aussi la dispersion des larves et, de ce fait, les connectivités biologiques (voir plus loin). Pour plus de précisions sur la circulation océanique en Mer des Caraïbes, voir Gyory *et al.* (<http://oceancurrents.rsmas.miami.edu/caribbean/caribbean.html>) de l'Université de Miami.

Le Courant du Yucatán

Le Déroit ou Canal du Yucatán est le passage reliant la Mer des Caraïbes au Golfe du Mexique (Ochoa *et al.* 2001). À la fin du XIX^{ème} siècle, Pillsbury (1890) a mesuré directement le Courant du Yucatán et rapporté de forts courants (170 cm/s à une profondeur de 6,3 m) sur le flanc occidental du déroit, avec des flux vers le sud sur le flanc oriental et vers le nord du côté occidental. La circulation vers le nord porte aujourd'hui le nom de Courant du Yucatán (et apporte la majeure partie des eaux du Golfe du Mexique), et celle vers le sud, du côté est, le Contre-courant de Cuba (Ochoa *et al.* 2001). On rencontre sous le Courant du Yucatán un Contre-courant du Yucatán dirigé vers le sud, qui joue un rôle important dans le mécanisme de remontée des eaux profondes au niveau du Banc de Campêche (Merino 1997 ; Ochoa *et al.* 2001). Des chercheurs américains (Cochrane 1966, 1968, 1969 ; Ruiz 1979) et soviéto-cubains (Belousov *et al.* 1966 ; Bogodanov *et al.* 1968 ; Bessonov *et al.* 1971 ; Bulanienkov et García 1973) ont rendu compte d'une remontée d'eaux profondes sur le flanc est du Banc du Yucatán (Merino, 1997). Ces résultats, publiés en russe, restent cependant peu connus.

Parce que le courant est situé en limite ouest, entre autres raisons, on a pensé que la divergence causée par le vent pouvait ne pas jouer un rôle important dans les remontées de la région du Yucatán (Merino 1997). Cochrane (1968, 1969) a suggéré que c'était le frottement de fond du fort Courant du Yucatán contre le talus du bord est du Plateau du Yucatán qui causait cette remontée. Garcia (1990) a proposé un autre mécanisme possible en formulant l'hypothèse que la remontée résulterait d'interactions entre le Courant du Yucatán et le contre-courant découvert par Bulanienkov et Garcia (1973) (Merino 1997).

Merino (1997) a conclu que les eaux profondes de la Mer des Caraïbes, provenant d'une profondeur de 220 à 250 m (à une température de 16 à 20°C et une salinité de 36,1 à 36,5 ‰) remontaient à une vitesse d'environ 10^{-2} cm/s sur la pente orientale du Plateau du Yucatán, jusqu'à la zone euphotique mais rarement jusqu'à la surface.

Cette remontée d'eaux profondes semble avoir un cycle saisonnier ; au printemps et en été, l'eau qui remonte crée une colonne d'eau à deux étages au-dessus du Plateau du Yucatán. En raison d'une stratification prononcée entre les eaux de surfaces de la Mer des Caraïbes et les eaux profondes qui remontent, ces deux couches se mélangent difficilement jusqu'à ce qu'arrivent l'hiver et les vents de nord.

Ochoa *et al.* (2001) ont décrit pour la première fois un flux moyen vers le sud du côté est du Détroit du Yucatán, entre 500 et 1500 mètres de profondeur. Selon eux, il pourrait s'agir d'un retour des eaux de même profondeur entrant dans le Golfe du Mexique avec le Courant de Boucle. L'eau qui ne peut pas s'échapper du golfe par le Détroit de Floride reviendrait donc de cette manière dans la Mer des Caraïbes.

Le Courant de Boucle

Les informations données ci-après sont tirées de Gyory *et al.*
(<http://oceancurrents.rsmas.miami.edu/caribbean/loop-current.html>)

Différentes caractéristiques du Courant du Yucatán ont été impliquées dans la pénétration du Courant de Boucle (« Loop Current ») dans le Golfe du Mexique (Molinari 1988). Dans un modèle empirique, Reid (1972) a constaté que la vitesse et l'angle du Courant du Yucatán, lorsqu'il quitte le Banc de Campêche, affecte la pénétration vers le nord de la « Boucle ». Quand le Courant du Yucatán s'éloigne du Banc de Campêche à l'est, l'intrusion du Courant de Boucle se fait à faible profondeur. En revanche, ce dernier pénètre plus profondément dans le golfe quand la séparation se fait plus à l'ouest (Molinari 1988).

La position du Courant de Boucle est variable. À l'extrême, il va presque directement jusqu'au Courant de Floride et le cisaillement du flux crée alors une recirculation quasi permanente dans le sens horaire, connue sous le nom de Vortex de Cuba. Cette formation peut favoriser l'amorce de l'expansion du Courant de Boucle (Coats, 1992 ; Nowlin et McLellan, 1967 ; Cochrane, 1972 ; Hoffmann et Worley, 1986). À l'extrême inverse, le Courant de Boucle pénètre dans le Golfe du Mexique en formant un intense flux dans le sens horaire qui atteint une latitude de 29,1°N. Il arrive que cette boucle parvienne jusqu'au delta du Mississippi ou au plateau continental de Floride (Wiseman et Dinnel, 1988 ; Molinari et Mayer, 1982 ; Huh *et al.*, 1981 ; Vukovich *et al.*, 1979). C'est à cause de cette grande phase en boucle que Nowlin et McClellan (1967) ont donné à ce courant le nom de « Loop Current ». Le Courant de Boucle reprend sa configuration directe en réduisant lentement son extension pour former un grand tourbillon au centre chaud, qui se propage ensuite vers l'ouest à une vitesse de 2 à 5 km/jour (Coats, 1992 ; Elliott, 1982 ; Shay *et al.*, 1998).

Des premières études ont tenté d'identifier un signal saisonnier du printemps dans l'intrusion du Courant de Boucle (Leipper, 1970 ; Behringer *et al.*, 1977 ; Nowlin et Hubertz, 1972 ; Maul, 1977). Cependant, bien que cette intrusion ait peut-être tendance à se produire plus fréquemment au printemps, elle peut survenir en toute saison, sur une période variant entre 6 et 17 mois (Molinari, 1980). On a corrélé la position du Courant de Boucle avec les changements de position du Courant du Yucatán, qui pourraient servir d'indicateur de l'ampleur de l'intrusion (Molinari et Cochrane, 1972). La manière dont chacun de ces deux courants affecte la position de l'autre n'est cependant pas clairement établie. Le Courant de Boucle reçoit les eaux du Courant du Yucatán, lui-même alimenté par le courant Caraïbe, le Courant des Guyanes et le Courant Nord-équatorial. Cette circulation crée un lien vital entre les eaux de l'Atlantique Nord et de l'Atlantique Sud. L'analyse de douze années de données ne fait pourtant apparaître aucune

corrélation significative entre la position du Courant de Boucle sur un mois donné et les transports dans le Courant de Floride (Maul et Vukovich, 1993). Bien que les fréquences de séparation des tourbillons varient, Sturges (1992) n'a pas pu établir de corrélation entre cette séparation et les variations du transport dans le Courant de Floride. Les fluctuations annuelles de débit du Courant de Boucle semblent dues à la force des vents (Sturges et Evans, 1983).

Composition chimique de l'eau de mer

L'eau de mer est un mélange complexe de matières inorganiques dissoutes et de gaz dissous (si l'on ne tient pas compte des matières inorganiques et organiques et des organismes qui sont simplement en suspension). Ce sont ces matières inorganiques dissoutes qui lui confèrent sa salinité. La quantité de matières inorganiques est typiquement de 35 g/kg, de sorte que la salinité typique de l'eau de mer est de 35 ‰. Les régimes de précipitations (faibles ou abondantes), les variations de l'évaporation, la fonte des glaciers, l'écoulement de surface des masses continentales et d'autres facteurs influent cependant sur la salinité locale.

Le Tableau 2.1 répertorie les principaux constituants inorganiques de l'eau de mer

Tableau 2.1 : Principaux constituants de l'eau océanique (S = 35,00 ‰)	
Constituant	g/kg
Sodium (Na)	10,770
Magnésium (Mg)	1,300
Calcium (Ca)	0,412
Potassium (K)	0,399
Potassium (K)	0,008
Strontium (Sr)	19,340
Chlorure (Cl ⁻)	2,710
Sulfate (sous la forme SO ₄)	0,067
Bromure (Br)	
Carbone (C, sous forme de bicarbonate (COH ⁻), de (CO ₃ ⁻²) et de dioxyde de carbone moléculaire (CO ₂)	de 0,023 à pH 8,4 à 0,027 à pH 7,8
Source : Tait, 1981	

Gaz dissous

Tous les gaz atmosphériques sont présents en solution dans l'eau de mer. La teneur en oxygène de celle-ci varie typiquement entre 0 et 8,5 ml/l, avec un maximum près de la surface où elle s'équilibre plus ou moins avec l'oxygène atmosphérique. Le dioxyde de carbone est présent principalement sous forme d'ions bicarbonate. C'est le principal facteur de régulation du pH de l'eau de mer (qui se situe normalement entre 7,5 et 8,4).

Nutriments

Un certain nombre de constituants mineurs de l'eau de mer peuvent être des nutriments essentiels à la croissance des végétaux : azote (sous forme de nitrate), phosphore (phosphate), silicium (silicate), fer et manganèse. Parmi ceux-ci, nitrates et phosphates sont les nutriments régulateurs. Leur rapport reste relativement constant, à 7 pour 1 en poids et 15 pour 1 en nombre d'ions (Tait, 1981). Parce que ces éléments mineurs sont indispensables à la croissance des plantes, ils sont considérés comme des nutriments limitants que les plantes absorbent sélectivement. De ce fait, les apports de nutriments à l'environnement marin stimulent la croissance rapide des espèces végétales, et en particulier des algues.

L'azote est présent dans l'eau de mer sous plusieurs formes : nitrate (1-600 µg/l), nitrite (0-15 µg/l), ions ammonium (0,4-50 µg/l) et traces de composés organiques azotés (30-200 µg/l). Sa concentration est habituellement plus faible en surface (1-120 µg/l NO₃-N) car il y est absorbé par les plantes.

Le phosphore est présent principalement sous forme d'ions orthophosphate (< 1-100 µg/l), avec des traces de phosphore organique (<1-30 µg/l). Sa concentration, comme celle de l'azote, est faible et variable en surface (0 à 20 µg/l de phosphate-P) et augmente avec la profondeur, jusqu'à un maximum entre 500 et 1500 m.

2.2 Influence des conditions physiques et chimiques de la mer sur les communautés benthiques marines

La distribution des organismes marins, et avec elle les types et la distribution des communautés benthiques, dépendent des éléments suivants :

- ◆ température ;
- ◆ composition de l'eau ;
- ◆ vitesse du courant ;
- ◆ profondeur/pression ;
- ◆ luminosité ;
- ◆ salinité ;
- ◆ turbidité ;
- ◆ substrat ;
- ◆ disponibilité de la nourriture ;
- ◆ concurrence biologique.

Comme on pouvait s'y attendre, certains facteurs (comme la vitesse des courants pour certaines espèces) ont une plus forte influence que d'autres (comme la concentration en oxygène sur ces mêmes espèces). La structure et le fonctionnement des communautés benthiques dépendent ainsi d'une combinaison de plusieurs facteurs. Ces communautés sont classifiées en fonction du substrat, de la profondeur, de la température et de la salinité (Tait, 1981). On distingue les :

1. Communautés d'eau peu profonde et d'eau saumâtre

La limite supérieure de distribution coïncide habituellement avec le rivage, voire l'intérieur des terres là où les effluents d'eau douce rencontrent l'eau de mer. Plage de températures variable selon la latitude, mais normalement eurytherme dans de larges limites. Salinité très variable (entre 7 et 34 ‰), communautés le plus souvent euryhalines. Ces communautés se rencontrent par exemple dans les mangroves, les estuaires, les étangs côtiers, les marécages, les ruisseaux, les canaux de drainage, là où un influx d'eau douce peut provoquer des variations journalières et saisonnières. Dans ces communautés il y a aussi beaucoup d'espèces très résistantes à la dessiccation, car situées dans la zone de balancement des marées.

2. Communautés néritiques du large

Limite supérieure de distribution typiquement en dessous du niveau extrême de basses eaux des marées de vive-eau. Normalement eurythermes et euryhalines (grande tolérance thermique et de salinité, respectivement), mais dans des limites plus étroites que les communautés des eaux peu profondes (salinité de 23 à 35,5 ‰). Exemples dans la Mer des Caraïbes : fonds meubles ou rocheux (avec ou sans végétation, avec ou sans récifs coralliens) par exemple herbiers marins, prairies d'algues, fonds sableux ou vaseux, fonds rocheux avec ou sans récifs coralliens.

3. Communautés profondes

Limite supérieure de distribution à une profondeur de 70 m au minimum. Habituellement sténothermes et sténohalines (salinité de 34 à 35,5 ‰). Exemples dans la Mer des Caraïbes : étages bathyal, abyssal et hadal.

INFLUENCES CÔTIÈRES

La zone d'interface entre la mer et la terre ferme est communément appelée zone côtière. Elle se divise en trois parties : terre ferme (zone supralittorale), zone littorale (médiolittorale) ou intertidale (périodiquement submergée) et zone infralittorale (de la zone intertidale au bord du plateau sous-marin).

La qualité de l'eau, la distribution et le type des terres périodiquement submergées, le type et la distribution des communautés benthiques, la disponibilité et la situation des ressources halieutiques et autres ressources marines sont très variables. Les variations ne sont pas seulement géographiques : les conditions peuvent nettement changer à un même endroit à différentes périodes. Cette grande variabilité dépend des facteurs suivants :

-
- ◆ absence ou présence d'un talus côtier et variabilité bathymétrique donnant forme à la ligne côtière ;
 - ◆ saison (hiver/été) ;
 - ◆ apports d'eaux douces (sécheresse/pluies) ;
 - ◆ topographie (absence ou présence de grandes plaines) ;
 - ◆ type de côte (rochers, plage, etc.) ;
 - ◆ configuration et complexité de la côte (ouverte, baie, etc.) ;
 - ◆ variations des marées ;
 - ◆ précipitations.

Ces facteurs déterminent les conditions physiques d'un lieu et, par conséquent, son aptitude à accueillir des assemblages donnés de faune et de flore . Les paramètres physiques et chimiques qui varient en fonction de la combinaison des contraintes listées ci-dessus comprennent :

- ◆ la périodicité d'exposition des zones intertidales ;
- ◆ la température ;
- ◆ la vitesse du courant ;
- ◆ l'action des vagues ;
- ◆ la concentration en oxygène, en matières organiques, en nutriments, en matières inorganiques et en nourriture ;
- ◆ la salinité ;
- ◆ les influx d'eau douce, la turbidité et la luminosité.

Les variations de ces conditions le long des côtes créent différents types de mosaïques ou de combinaisons d'habitats, appelées « systèmes côtiers » par Sullivan Saley et Bustamante (1999) (faute de meilleur terme pour définir un niveau de classification supérieur à l'habitat mais inférieur à l'écorégion). Ces *systèmes côtiers* constituent l'unité de taille minimale dans laquelle peuvent avoir lieu les processus écologiques et physiques essentiels au maintien de la biodiversité côtière (voir plus loin).

À ces variations naturelles s'ajoutent les influences des activités humaines sur l'environnement côtier. Celles-ci exacerbent les effets de certaines des contraintes mais apportent aussi de nouveaux facteurs tels que les polluants chimiques et solides, les eaux d'égouts et les nutriments d'origine agricole notamment. Tout en modifiant la variabilité de l'environnement côtier, elles affectent aussi directement les fonctions naturelles de ces écosystèmes (Module 3).

MODULE 2**THÈME 2****OBJECTIF****IMPORTANCE****PRÉSENTATION****EXERCICE****DURÉE****LE MILIEU MARIN DANS LA GRANDE CARAÏBE****Écosystèmes côtiers de la grande Caraïbe**

Démontrer que les écosystèmes côtiers sont liés et que la protection de leurs interactions est donc essentielle à la préservation et à la qualité des biens et services qu'ils peuvent rendre.

Les interactions entre les écosystèmes côtiers ne sont pas toujours reconnues ou bien comprises. De ce fait, certains zonages d'activités économiques entraînent souvent des perturbations de processus vitaux pour les écosystèmes. Le maintien de l'intégrité des écosystèmes nécessite donc de comprendre ceux-ci et leurs interactions.

Cours magistral

(Observation sur le terrain de différents écosystèmes)

1/2 h

ENSEIGNEMENTS

- La biodiversité va au-delà de la richesse spécifique : elle inclut la diversité des habitats et la diversité génétique des populations.
- Apprendre à reconnaître les écosystèmes côtiers les plus courants en Mer des Caraïbes et les avantages et « prestations environnementales » qu'ils apportent, afin de justifier leur protection.
- Il est possible d'obtenir des ressources depuis le milieu marin, à condition de ne pas le surexploiter.

2.2.1 Biodiversité et écosystèmes

La biodiversité est la somme des espèces végétales et animales côtières et marines, de leur diversité génétique, des habitats et écosystèmes dont ils font partie et des processus écologiques qui permettent leur existence. Certains écosystèmes comportent un petit nombre d'espèces car les conditions physiques y sont extrêmes (déserts) ou très fluctuantes (estuaires). Cela ne signifie pas pour autant qu'ils aient une « valeur de biodiversité » (ou « de protection ») plus basse, car certains d'entre eux peuvent être très productifs et produire une biomasse importante. Il n'en reste pas moins que plus le nombre d'espèces est élevé dans un habitat soumis à l'exploitation par l'homme (dans son étendue naturelle), plus celui-ci est sain et durable. Les raisons en sont les suivantes :

- Ils fournissent davantage de ressources (poisson, bois de mangrove, etc.) aux utilisateurs (pour servir de nourriture et d'abri). Chaque espèce a une façon spécifique d'utiliser les différentes ressources et de s'adapter aux changements (par exemple de salinité ou de température de l'eau). De ce fait, la productivité des habitats et des écosystèmes est maximale si le nombre d'espèces y est élevé.
- Ils sont ainsi plus stables, c'est-à-dire plus résistants aux changements environnementaux radicaux (par ex. élévation du niveau de la mer, inondations, passage d'ouragans ou de cyclones).
- Ils permettent le développement local des différents stades de la vie (larves, juvéniles, reproducteurs, etc.). La préservation d'un seul habitat n'est pas forcément suffisante pour conserver toutes les espèces ; en revanche, le maintien en bonne santé de tous les habitats maximise la productivité.
- Pour des raisons esthétiques, la qualité de vie des populations côtières et le plaisir des visiteurs dépendent de la biodiversité marine.

Écosystèmes. Les écosystèmes sont des groupements caractéristiques d'espèces que l'on peut définir, pour simplifier, comme des communautés biologiques d'organismes en interaction entre eux et avec leur environnement physique.

L'environnement côtier de la grande Caraïbe est caractérisé par l'existence d'écosystèmes divers et productifs. Ces écosystèmes naturels sont très importants pour l'intégrité et la

productivité du milieu côtier et marin. Ils contribuent à la biodiversité de la région et sont indispensables à la présence humaine dans la zone côtière. Les écosystèmes de la région sont les suivants :

- ◆ forêts côtières/ forêts littorales ;
- ◆ communautés de la végétation basse côtière/ végétation littorale basse ;
- ◆ plages ;
- ◆ zones humides (d'eau douce, d'eau salée, d'estuaire) et mangroves
- ◆ côtes rocheuses ;
- ◆ herbiers marins ;
- ◆ récifs coralliens ;
- ◆ océan ouvert.

Tous ces écosystèmes sont reliés entre eux par les mouvements des eaux, aussi bien de la terre vers la mer (influence terrestre) que de l'océan ouvert vers la terre (influence océanique). Leurs liens peuvent également être déterminés à partir de certaines de leurs fonctions écologiques (Tableau 2.2), notamment :

- ◆ les zones humides et les herbiers marins jouent le rôle de pouponnière pour certaines espèces de la faune marine et retiennent les sédiments qui peuvent nuire aux récifs coralliens ;
- ◆ les zones humides côtières retiennent les sédiments et réduisent la concentration des nutriments et des polluants avant que ceux-ci ne parviennent dans le milieu marin ;
- ◆ les matières organiques s'exportent des zones humides et des herbiers marins vers les récifs coralliens voisins ;
- ◆ les récifs coralliens protègent certaines communautés proches de la côte ;
- ◆ certaines espèces de la faune marine (coraux, poissons, etc.) sont recrutées dans des zones en amont (parfois à des centaines de kilomètres).

Tableau 2.2 : Fonctions naturelles et économiques des principaux écosystèmes marins de la Zone Caraïbe

Écosystème	Fonctions écologiques et économiques
<i>Forêts</i>	<ul style="list-style-type: none">• Protection contre les inondations• Fourniture de résines, d'huiles, de médicaments• Disponibilité de l'eau• Production d'aliments et de boissons• Prévention de l'érosion• Production de bois à brûler et de charbon de bois• Production de bois d'œuvre• Habitats pour les espèces sauvages• Atout touristique

<p>Zones humides (y compris mangroves)</p> <p><i>Production de biomasse : jusqu'à 30 tonnes/ha ; dans les mangroves côtières (les plus développées), la chute des feuilles représente 20 à 40 % de la production brute (10 g/m²/jour). Une partie de cette production s'exporte vers les écosystèmes adjacents. Près de 10 % de la biomasse est constituée par les poissons et invertébrés marins.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Régulation des inondations • Zone de croissance pour les poissons, les crevettes et les langoustes • Piège à sédiments (amendement des effluents allant vers la mer) • Formation de terres / de substrat (piège à sédiments) • Protection des côtes contre l'énergie des vagues et les tempêtes • Habitat pour les oiseaux, les crocodiliens et autres espèces animales • Source de nourriture pour les récifs coralliens voisins • Source de matériaux pour la construction, la pêche et l'artisanat • Tourisme et autres formes de loisirs
<p>Récifs coralliens</p> <p>Distribution limitée à la zone tropicale (>20°C) et aux eaux claires, de forte salinité et faible sédimentation, très éclairées, sur substrat dur et dans les zones où les vagues et les courants sont faibles.</p> <p>Forte productivité et biomasse importante dans les eaux oligotrophes : 5 à 20 g/m²/jour (contre 0,05 à 0,3 g/m²/jour dans les eaux océaniques voisines).</p> <p>Production de calcium : jusqu'à 400 à 2000 tonnes/an.</p> <p>Forte biodiversité, aussi importante que dans les forêts tropicales. Zonage marqué (voir figure ci-dessous).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Habitat et nourriture pour les poissons et autres organismes marins • Protection des côtes contre l'action des vagues • Source de matière première pour les plages de sable • Produits de la pêche de grande valeur • Contribution à l'expansion des habitats de mangrove et d'herbier marin • Production de roche calcaire, jusqu'à des systèmes insulaires entiers • Laboratoire vivant pour la recherche et l'éducation • Tourisme et autres formes de loisirs
<p>Herbiers marins</p> <p>Uniquement à moins de 40 m de profondeur, distribution et biomasse régulées par la lumière (turbidité et profondeur), l'énergie des vagues et le broutage par les oursins et les poissons.</p> <p>Biomasse et productivité très importantes (pousse des feuilles : jusqu'à 5-10 mm/jour).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Lieu de croissance des jeunes poissons, mollusques et crustacés • Empêchent l'érosion des côtes en réduisant l'énergie des vagues et en retenant le sable ; améliorent aussi, de ce fait, la clarté des eaux • Lieu de nourrissage pour les tortues, les lamantins et certaines espèces de poissons et d'oursins • Exportation de nourriture vers les récifs coralliens voisins et forte production primaire

MODULE 2

THÈME 3

OBJECTIF

IMPORTANCE

PRÉSENTATION

EXERCICE

DURÉE

LE MILIEU MARIN DANS LA GRANDECARAÏBE

La province biogéographique côtière de l'Atlantique Nord-ouest tropical et ses écorégions marines

Montrer que la Mer des Caraïbes est une province biogéographique présentant des divisions écorégionales définies par les connexions biologiques entre ses populations marines.

Les modes de circulation océanique ainsi que la migration des adultes et la dispersion des larves suggèrent que les populations et écosystèmes de la grande Caraïbe communiquent entre eux à divers degrés ; le succès et l'échec de la gestion des ressources dans une zone peuvent donc affecter les ressources d'autres zones.

Cours magistral

Aucun

1/2 h

ENSEIGNEMENTS

- La grande Caraïbe est une province biogéographique (Atlantique Nord-ouest tropical).
- La dispersion océanique des larves est limitée, avec des zones de rétention (tourbillons) et d'autres de dispersion sur de grandes distances.
- Il existe différentes unités de connectivité biologique ou écorégions dans la grande Caraïbe.
- Les informations sur les connectivités biologiques des populations marines à l'échelle de l'océan sont essentielles pour la protection et la gestion des ressources marines, à l'intérieur des frontières de chaque pays et au-delà.
- Les schémas de dispersion et de recrutement des larves suggèrent que dans certains pays, des mesures de gestion à l'échelle nationale pourraient être suffisantes, tandis qu'une coopération écorégionale sera nécessaire dans d'autres pour que cette gestion soit efficace.
- Sources de larves de poisson de chaque pays ou aires marines protégées.

INTRODUCTION

Face à la dégradation du milieu marin et des ressources halieutiques liée à la surexploitation, les chercheurs travaillant à la protection de l'environnement marin s'efforcent de comprendre les liens entre les écosystèmes et populations marines à une échelle supranationale. Dans les années 1960 et 1970, la connaissance des courants marins dans la grande Caraïbe laissait penser que les larves océaniques étaient transportées passivement, de façon quasi linéaire, de sorte qu'elles étaient recrutées dans les zones de hauts-fonds à des centaines de kilomètres de leur lieu d'origine. Cela signifiait que des poissons nés dans des sites de frai situés vers les îles du sud-est de la zone pouvaient se retrouver, adultes, dans des populations hantant les eaux de Cuba ou du sud de la Floride. Dans ces conditions, la Mer des Caraïbes dans son ensemble serait « connectée biologiquement », et la protection des ressources biologiques et de la biodiversité ne pourrait être efficace que si elle était planifiée à l'échelle régionale.

Depuis les progrès des études océanographiques et écologiques dans les années 1980, les données de recherche suggèrent que cette connexion n'est pas aussi étendue qu'on le croyait et qu'il existe des unités biogéographiques de plus petites dimensions. Ainsi, dans les années 1990, faute de meilleures informations sur la migration des adultes et la dispersion des larves, les scientifiques et les organismes de protection internationaux ont consacré leurs ressources à la délimitation d'unités biogéographiques ou écorégions. Ce scénario écorégional avait pour but de mieux identifier les zones à protéger en priorité, dans le cadre d'une planification à grande échelle de la protection de la biodiversité.

En 1996, Miller définit la biorégion comme « un espace géographique contenant une série ou plusieurs écosystèmes imbriqués » (Miller, 1996). Cela signifie que les biorégions peuvent exister à différentes échelles, selon les critères choisis pour les définir, caractéristiques biophysiques mais aussi usage pratique de chaque unité géographique.

Afin d'optimiser l'investissement des ressources dans la protection de la biodiversité, le Programme de soutien à la Biodiversité, un consortium formé par The Nature Conservancy, le World Wildlife Fund et le World Resources Institute (sous financement de l'USAID), a commandité une série de projets pour identifier les zones de protection prioritaires (terrestres, de mangrove, marines). En 1996-1997, The Nature Conservancy a réalisé le premier exercice de priorisation pour un hémisphère en Amérique Latine et dans les Caraïbes, dans le but d'identifier les aires de protection marine prioritaires (Sullivan Sealey et Bustamante, 1999). Sous la direction de ces auteurs, une trentaine d'experts régionaux a proposé un système de classification des régions biogéographiques en Amérique Latine et dans la région caraïbe, à différentes résolutions spatiales, pour servir de base à la sélection des aires de protection prioritaires. À partir des données existantes sur le régime de températures et la circulation géographique générale, neuf « Provinces biogéographiques côtières » ont été délimitées, dont celle de l'Atlantique Nord-ouest tropical. Cette « province » se compose des eaux marines de la grande Caraïbe (sud de la Floride, Bahamas, la majeure partie du Golfe du Mexique, les Grandes et Petites Antilles, l'Amérique Centrale, le Venezuela et la Colombie), ainsi que la Guyane française, le Guyana et le Surinam. Des caractéristiques telles que la géomorphologie des côtes et la distribution des grands groupes taxonomiques et des principaux écosystèmes ont en outre été utilisées comme critères pour diviser cette province en six écorégions : Sud de la Floride, Golfe du Mexique, Archipel des Bahamas, Mer des Caraïbes centrale, Petites Antilles et Guyanes.

Sachant que l'écorégion est une unité trop vaste pour une bonne planification de la protection, les auteurs et un groupe d'experts ayant participé à l'exercice ont subdivisé la zone côtière de l'écorégion marine de la Mer des Caraïbes centrale en sections du plateau qu'ils ont appelées « systèmes côtiers ». Un système côtier est simplement une partie de la zone littorale et du talus continental adjacent, présentant certaines caractéristiques biophysiques résultant de la géomorphologie de la côte, des effluents terrestres et de l'existence d'une mosaïque spécifique d'habitats marins. Sa taille (en dizaines de kilomètres carrés) convient mieux pour la planification de la protection et la mise en œuvre de mesures de gestion des côtes. Ces systèmes côtiers ont été classifiés en fonction de l'habitat dominant (mangrove, type de récif corallien, prairies marines, plages de sable, rivage rocheux, etc.) et une méthodologie simple a été appliquée pour les évaluer et définir les priorités de protection (voir Sullivan-Sealey et Bustamante, 1999¹).

La cartographie de la distribution des espèces et des habitats dans certaines sous-régions et certains pays, l'acquisition de nouvelles connaissances scientifiques sur la circulation océanique, la dispersion des larves, la migration et la distribution des adultes dans la Mer des Caraïbes, ont cependant contribué à affiner encore la subdivision des écorégions. En outre, l'analyse des lacunes en terme de

¹ http://conserveonline.org/workspaces/MarCons_LAC

protection a également permis de mieux comprendre le scénario écorégional dans la province biogéographique de l'Atlantique Nord-ouest tropical et son utilisation pour la gestion des ressources. Voici une liste des travaux ayant servi de source d'informations aux chercheurs et intervenants sur le terrain dans la protection de l'environnement, dans une optique locale ou régionale.

Tableau 2.3.1 Classification des écorégions et exercices de priorisation de la protection côtière dans la grande Caraïbe

Zone étudiée	Auteurs
Amérique Latine et Caraïbes	Sullivan Sealey et Bustamante (1999)
Récif Méso-américain (du Mexique au Honduras)	Kramer et Kramer (2002) ; Arrivillaga <i>et al.</i> (2006)
Amérique Centrale	Calderón (2004)
grande Caraïbe	Chatwin <i>et al.</i> (2004).
Cuba	Areces <i>et al.</i> (2004)
Colombie, côtes continentales de la Mer des Caraïbes	Alonso <i>et al.</i> (2007)
Floride	Geselbracht <i>et al.</i> (2005).
Venezuela	Miloslavich <i>et al.</i> (2003) ; INTECMAR <i>et al.</i> (2006) http://www.intecmar.usb.ve/PDVSACaribe/
Monde	Spalding <i>et al.</i> (2007)

Les recherches récentes en océanographie et sur la dispersion des larves suggèrent cependant l'existence d'une série **d'unités géographiques de connectivité biologique**, qui se substitueraient aux écorégions tracées voici de nombreuses années (Tableau 2.3.1), à une époque où les données disponibles dans ces domaines étaient insuffisantes.

Annexe 1

Depuis quelques années, la réalisation de cartes de distribution des habitats et des espèces dans certaines sous-régions et certains pays s'intensifient, ainsi que l'utilisation de celles-ci dans la classification des écorégions, l'analyse des lacunes et les exercices de priorisation en terme de préservation. Certains de ces travaux sont cités ci-après. Ils peuvent constituer une source d'informations plus précises pour les acteurs de la préservation du milieu marin et de la gestion des zones côtières au niveau local ou national.

Tableau 2.3.1 Recherches récentes sur la classification des écorégions et la sélection des zones de conservation prioritaires dans la grande Caraïbe

Zone étudiée	Informations utilisées	Auteurs	Remarques
Récif Méso-américain		Kramer P. et P. Kramer. 2002.	
Amérique Centrale		Calderon, R. 199	
grande Caraïbe	non mentionnées	Burke, L. et J. Maidens. 2004.	
Cuba		Areces, A. <i>et al.</i>	
Côtes continentales de la Mer des Caraïbes Colombie		INVEMAR	
Floride		Geselbracht <i>et al.</i> , 2005.	
Porto Rico			

Les résultats des recherches sur les courants océaniques ainsi que sur le comportement et la longévité des larves suggèrent l'existence de plusieurs unités géographiques de **connectivité biologique** dans la grande Caraïbe, qui pourraient constituer les véritables écorégions à la place de celles délimitées par le passé en l'absence de données de ce type.

Des recherches considérables sur la circulation océanique et la dispersion des larves dans la grande Caraïbe (Cowen *et al.* 2000, 2003, 2006 ; Andrade et Barton, 2000 ; Paris *et al.*, 2002, 2004, 2005, 2007 ; Thattai *et al.*, 2005, 2007 ; Ezer *et al.*, 2005 ; Sale *et al.*, 2005 ; Colin, 2004 ; Baums *et al.*, 2006 ; Cherubin *et al.*, 2007) ont apporté d'importantes informations sur la manière dont fonctionnent les barrières et les connexions biologiques et océanographiques dans cette zone (Annexe I). Malgré leurs différences de

méthodologie et d'approche, elles ne rendent pas complètement compte de tout le spectre de variabilité géographique et temporelle des conditions océanographiques et du comportement des larves. Une estimation solide des probabilités spatiales de dispersion des larves de plusieurs espèces à partir de différents sites de frai nécessiterait une résolution plus poussée et l'utilisation de modèles biophysiques (Werner et al, 2007). Les résultats de ces études suggèrent néanmoins un nouveau scénario écorégional comportant quinze unités de connectivité biologique dans la province biogéographique côtière de l'Atlantique Nord-ouest tropical (ou grande Caraïbe). Ce scénario s'éloigne donc considérablement des neuf écorégions proposées par Spalding *et al.* (2007) pour cette même province. Les principales différences de ce nouveau scénario sont que la région du Récif Méso-américain (MBRS) est partagée près de la frontière entre le Mexique et le Belize ; l'échange des larves est limité entre le Honduras et le Nicaragua, le Costa Rica et Panama, Panama et la Colombie, et entre la Colombie et le Venezuela ; l'archipel de San Andrés y Providencia joue peut-être le rôle de couloir pour le renouvellement des populations liées au récif jamaïcain ; les Petites Antilles sont reliées faiblement les unes aux autres et forment une grande unité de connectivité biologique fragmentée, de Trinité et Tobago à Porto Rico ; le Passage de Mona forme une barrière saisonnière à la dispersion entre Porto Rico et Hispaniola. Ce nouveau scénario, basé sur l'océanographie et les échanges de larves, suggère que la division en écorégions de la Mer des Caraïbes est peut-être plus complexe qu'on ne le pensait jusqu'ici (Bustamante et Paris, sous presse).

Références bibliographiques citées et autres

- Alonso, D., L.F. Ramirez; C. Segura-Quintero; y P. Castillo-Torres. 2007. Planificación ecorregional para la conservación de la biodiversidad marino costera del Caribe continental. Informe técnico final. INVEMAR-TNC, Santa Marta, Colombia, 94pp + anexos
- Andrade, C. and Barton E.D. 2000. Eddy development and option in the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res.*, 15(C11): 26,191-26
- Appeldoorn, R. and K. Lindeman. . 2003. A Caribbean-wide survey of marine reserves: spatial coverage and attributes of effectiveness. *Gulf and Caribbean Research*, 14(2), 139-154.
- Areces, A. J., J. Gerhartz, H. Alidina, R. Duttit and C. Martínez. 2004. Validación del Sistema de Areas Marinas Protegidas (SAMP) cubano mediante el análisis de brechas en su representatividad. Centro Nacional de Areas Prtoetegidas de Cuba, La Habana.
- Barnes, R.S.K. & K.H. Mann (Eds.). 1980. *Fundamentals of Aquatic Ecology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Baums I, Paris CB, Cherubin L. 2006. A bio-oceanographic filter to larval dispersal in a reef-building coral, *Limnol & Oceanogr* 51(5)
- Bohnsack, J.A. 1998. Application of marine reserves to reef fisheries management. *Aust.J. Sci.* 23 (298-304)

- Bustamante, G. and C. Paris. In press. Marine population connectivity and its potential use for the nomination of new World Heritage Sites in the Wider Caribbean. Marine Sanctuaries Conservation Series, NOAA. (Presented at the 59th Annual Meeting of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute, Belize City, November, 2006).
- Burke, L. and J. Maidens. 2004. Reef at Risk in the Caribbean. World Resources Institute, Washington DC.
- Calderon, R., T. Boucher, Bryer, Sotomayor, Kapelle. 2004. Setting biodiversity conservation priorities in Central America action site selection for the development of a first portfolio. The Nature Conservancy, Costa Rica, 32 pp.
http://conserveonline.org/docs/2004/10/First_Central_American_Conserv._Portfolio.pdf
- [Chatwin, A.](#); Huggins, A.; Kramer, P.; Wear, S.; Zenny, N.; Bustamante, G. and Jeo, R. 2004. The Greater Caribbean Marine Ecoregional Assessment. Census of Marine Life. Caribbean Regional Committee. www.intecmar.usb.ve/CoMLCaribbean/Summaries/summary_TNC.htm
- Cherubin LM, Kuchinke C, Paris CB. 2008. Ocean circulation and terrestrial runoff dynamics in the Mesoamerican region from spectral optimization of SeaWiFS data and a high resolution simulation, *Coral Reefs*, DOI 10.1007/s00338-007-0348-1, 1432-0975
- Cherubin, L. M., and P. L. Richardson, 2007. Variability of the Caribbean Current and the Amazon and Orinoco fresh water plumes. Deep-Sea Research I
- Colin, P. 2004. Connectivity in the Caribbean Region: Are small reef fishes "Living Tracers of Connectivity"? Keynote address. 57th Annual Meeting of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute, St. Petersburg, Florida, November, 2004
- Cowen RK, Paris CB, Olson DB, Fortuna JL (2003a) The role of long distance dispersal in replenishing marine populations. *Gulf and Caribbean Research* 14(2):129-13
- Cowen, R.K., C.B. Paris and A. Srinivasan. 2006. Scaling of connectivity in marine populations. *Science*, 311: 522-527
- Cowen RK, Sponaugle S, Paris CB, Fortuna JL, Lwiza KMM, Dorsey S. (2003b) Impact of North Brazil Current rings on local circulation and coral reef fish recruitment to Barbados, West Indies. In: *Interhemispheric water exchange*, GJ Goni [ed.], Elsevier Oceanographic Series, Chap 17: 443-462
- Ezer, T, DV Thattai, B Kjerfve, and WD Heyman. 2005. On the variability of the flow along the Meso-American Barrier Reef system: a numerical model study of the influence of the Caribbean current and eddies. *Ocean Dynamics*, 55(5-6):458-475.
- Fratantoni, D. M., and P. L. Richardson, 2006. Evolution and demise of North Brazil Current Rings. *Journal of Physical Oceanography*, 36, 1241-1264
- Goni, G. and W. Johns (2001) [Census of Warm Rings and Eddies in the North Brazil Current Retroflexion Region from 1992 through 1998 Using TOPEX/POSEIDON Altimeter Data](#). *Geophys. Res. Lett.*, , 28, 1-4

- Hillary, A. and L. Max (eds.) 2003. Heritage Sites of Biodiversity Value: filling critical gaps and promoting multi-site approaches to new nominations of tropical coastal, marine and small island ecosystems. World Heritage Papers 4, Proceedings of the World Heritage Marine Biodiversity Workshop, Hanoi, February 25-March 1, 2002: http://whc.unesco.org/documents/publi_wh_papers_04_en.pdf
- Kramer, P.A. and Kramer, P.R. (ed. M. McField). 2002. Ecoregional Conservation Planning for the Mesoamerican Caribbean Reef. Washington, D.C., World Wildlife Fund.
- Miller, Kenton. 1996. *Balancing the Scales: Guidelines for Increasing Biodiversity's Chances Through Bioregional Planning*. World Resources Institute.
- Paris, C.B., R.K. Cowen, K.M.M. Lwiza, D Wang, D. B. Olson. 2002. Multivariate objective analysis of the coastal circulation of Barbados, West Indies: implication for larval transport. *Deep-Sea Research*, I (49): 1363–1386
- Paris, C.B., and R. Cowen. 2004. Direct evidence of a biophysical retention mechanism for coral reef fish larvae. *Limnol. Oceanogr.*, 49(6): 1964–1979
- Paris CB, Cowen RK, Lwiza KMM, Wang DP, Olson DB (2002) Objective analysis of three-dimensional circulation in the vicinity of Barbados, West Indies: Implication for larval transport. *Deep Sea Research*.49: 1363-1386
- Paris, C.B., R.K. Cowen, R. Claro, K. C. Lindeman. 2005. Larval transport pathways from Cuban snapper (Lutjanidae) spawning aggregations based on biophysical modeling. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 296: 93-106
- Paris CB, Perez-Perez M, Kool J, Aldana-Arnada D. 2008. Segregation of conch (*Strombus gigas*) populations in Mexico, *Marine Sanctuary Conservation Series*, This Issue
- Richardson, P. L. 2005. Caribbean Current and eddies as observed by surface drifters. *Deep-Sea Research II*, 52, 429-463
- Roberts, Callum. 1997. 'Connectivity and Management of Caribbean Coral Reefs' in *Science*. Vol.178, P. 1454-1457, 21 November 1997.
- Roberts, C. M., J. A. Bohnsack, F. Gell; J.P. Hawkins and R. Goodridge. 2001. Effects of marine reserves on adjacent fisheries. *Science* 30, 294(5548):1920 – 1923.
- Sale, P., R.K. Cowen, B.S. Danilowicz, G.P. Jones, J.P. Kritzer, K.C. Lindeman, S. Planes, N. Polunin, G.R. Russ, Y.J. Sadovy and R.S. Steneck. 2005. Critical science gaps impede use of no-take fishery reserves. *Trends in Ecology and Evolution*..20(2): 74-80.
- Sheng, J. and L. Tang. 2003. A numerical study of circulation in the Western Caribbean Sea. *J. Physical Oceanography*, 3: 2040-2069

- Spalding, M.D., H.E. Fox, G.R. Allen; N. Davidson; Z.A. Ferdaña, M. Finlayson; B.S. Halpern; M.A. Jorge; A. Lombana, S.A. Lourie, K.D. Martin, E. McManus, J. Molnar, C.A. Recchia, and J. Robertson. Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization of Coastal and Shelf Areas. *Bioscience*, 57(7): 573-583. (additional pictures and data at www.nature.org/meow July, 2007)
- Sullivan Sealey, K. and G. Bustamante. 1999. Setting geographic priorities for marine conservation in Latin America and the Caribbean. The Nature Conservancy, Arlington, Virginia, 125pp, http://conserveonline.org/workspaces/MarCons_LAC.
- Tait, R.V. 1981. *Elements of Marine Ecology: An Introductory Course*. 3rd Edition. Butterworths, London.
- Thattai, D. V., Ezer, T., and Kjerfve, B. 2005. On the sensitivity of the West Caribbean Sea circulation to tides, wind and mesoscale ocean eddies: A three-dimensional ocean model study. *Ocean Dynamics*.
- UNEP/CBD/COP/8/INF/34. 2006. Global coastal and marine biogeographic regionalization as a support tool for implementation of CBD Programmes of Work. Conference of the Parties to the Convention on biological diversity, Curitiba, Brazil, 20-31 March, 2006. Items 23 and 27.1 of the provisional agenda. February, 2006.
- Watlinton, R.A. and M.C. Donoso. 1996. 'Ocean Features Influencing Small Island Circulation Patterns: Case Studies' in *Small Islands: Marine Science and Sustainable Development*. Coastal and Estuarine Studies, Volume 51, Pages 56-70. The American Geophysical Union.
- Werner F.E., RK Cowen, and C.B Paris (2007) Coupled biophysical models: Present capabilities and necessary developments for future studies of population connectivity, *Oceanography*, 20(3):54-69

Annexe I : Principales interactions biologiques et physiques en Mer des Caraïbes

Pénétration des eaux de l'Atlantique dans le Bassin des Caraïbes :

- Des gyres cycloniques et anticycloniques passent au nord du 15^{ème} parallèle, traversant l'Arc Antillais (par les passages d'Anegada et de Sainte-Lucie et au nord de Trinité) à différentes saisons et se dirigeant toutes vers le nord par le centre de la zone caraïbe.
- Il semble qu'une grande partie de ces tourbillons prenne naissance dans la région équatoriale, à la rétroflexion du Courant du Nord-Brésil, progresse ensuite vers le nord-ouest, et que certains de ces tourbillons parviennent à s'insinuer en Mer des Caraïbes à travers les interstices entre les Petites Antilles. Une fois en Mer des Caraïbes, ils se reforment et reprennent leur route vers le nord-ouest.
- En moyenne, un tourbillon met environ 10 mois pour aller des Petites Antilles au Déroit du Yucatán, avec des délais extrêmes entre 7 et 17 mois. Les tourbillons se dissipent cependant presque tous au niveau de la Dorsale du Nicaragua, en se heurtant aux hauts-fonds et aux bancs.

Goni et Johns (2001), Paris *et al.* (2002), Cowen *et al.* (2003b), Fratantoni et Richardson (2006)

Circulation dans le Bassin des Caraïbes :

- Les tourbillons cycloniques dans le Golfe du Honduras, nés près de la Dorsale du Nicaragua, se propagent vers l'ouest le long de la côte hondurienne. Ces tourbillons jouent un rôle important dans le processus de connectivité et les transports biologiques associés.
- Des tourbillons empruntent le passage des Îles du Vent et longent le bassin des îles Caïman, pour ressortir six mois plus tard par le Déroit du Yucatán.
- Dans l'ouest de la Mer des Caraïbes (du système récifal de la Barrière Mésocéanique [MBRS] à l'ouest de Cuba), la circulation moyenne se caractérise par un flux de sud-est à nord-ouest accompagné parfois de cinq tourbillons d'un diamètre de 50 à 150 km chacun le long de la côte hondurienne, dans le Golfe du Honduras, et par la propagation d'un tourbillon anticyclonique de 300 km de diamètre au sud-est du Déroit du Yucatán. Un tourbillon de moyenne échelle parcourt environ 220 km en 30

Richardson (2005), Thattai *et al.* (2005), Cherubin et Richardson (2008), Cherubin *et al.* (2008)

jours. Il peut donc lui falloir entre 10 et 12 mois pour traverser tout l'ouest de la Mer des Caraïbes, du sud-est au nord-ouest.

Dispersion des larves marines :

- Bien que les larves soient potentiellement capables de se disperser sur de longues distances, les indices d'un transport limité dans la phase pélagique s'accumulent. Les distances de dispersion significatives du point de vue écologique sont de l'ordre de 50 à 100 km pour la plupart des espèces, avec une rétention locale relativement forte.
- Le gyre de Panama-Colombie constitue une large circulation qui limite la communication entre le Bassin de Colombie et le bassin des îles Caïman.
- La rétention des larves est favorisée dans la Mer des Caraïbes. Pour que certains sites situés en aval supportent une pression de pêche importante (prélèvement de 40 % de la population, par exemple, chaque année), le recrutement de la population locale doit être complété dans la même proportion à partir de sources en amont (taux de recrutement avant pêche).

- On observe des niveaux considérables d'autorecruement dans les populations de vivaneaux cubaines, en particulier dans les régions du sud et du centre-nord. Les larves des populations de vivaneaux du centre-nord de Cuba se retrouvent en majorité dans le sud des Bahamas (et notamment sur le banc de Cay Sal). Un léger décalage dans les pics de frai entre espèces entraîne cependant une forte variabilité interspécifique du recrutement.

- Selon des données sur la présence de plus de vingt-cinq espèces de poissons de récif (*Elacatinus* [un petit gobie récifal], poisson-ange bleu, pastenague jaune, hamlets) et d'autres sur les suivis de bouées dérivantes dans la Mer des Caraïbes, il existe dans les Bahamas Centrales une discontinuité entre les bancs de Little Bahama et Central Bahama, ainsi qu'entre les îles du sud-est des Bahamas et Turk et Caïcos ; une autre discontinuité s'observe au large de la péninsule de Guajira (Colombie), ainsi qu'une séparation entre la Colombie et le Panama. Un point de divergence est également identifié près de la frontière entre le Mexique et le Belize, et de fortes circulations locales dans le Golfe du Honduras et le sud de Cuba et des îles Caïman. Enfin, un mécanisme de « filtrage » du flux génétique d'*Acropora palmata*, un corail constructeur

Cowen *et al.*
(2000), Paris et
Cowen (2004),
Cowen *et al.*
(2003a)

Paris et Cowen
(2004), Cowen
et al. (2003)

Paris *et al.*,
(2005)

Colin (2004),
Baums *et al.*
(2006)

de récifs, est décrit dans le Passage de Mona, entre la République Dominicaine et Porto Rico.

- D'après la modélisation biophysique de la dispersion des larves, les populations marines de la région semblent fortement structurées ;
 - L'ouest et l'est de la Mer des Caraïbes sont relativement isolés l'un de l'autre sur un méridien de rupture centré vers 67°-70°O, de l'ouest de Porto Rico à Aruba au sud, au large de la côte vénézuélienne ; cette séparation peut créer une barrière écologique entre la région du gyre de Colombie et l'ouest de la Mer des Caraïbes.
 - Le nord-est de la Mer des Caraïbes (Porto Rico et îles Sous-le-Vent) est relativement isolé du reste de la région est.
 - Les îles Sous-le-Vent présentent un fort autorecrutement et constituent un point d'absorption des échanges de larves entre nord et sud dans les Îles du Vent.
 - Des échanges circulent vers l'ouest le long des Îles du Vent méridionales et le long de la côte d'Amérique du Sud, formant le couloir vénézuélien.
 - Les Bahamas et les îles Turk et Caïcos forment une enclave très interconnectée mais isolée en grande partie du reste de la région caraïbe, hormis de faibles échanges avec la région centre-nord de Cuba et Haïti.
 - Les côtes du Belize et du Honduras sont faiblement isolées du nord du MBRS mais fortement isolées des îles bordant la côte orientale du Nicaragua, qui peuvent aussi former une enclave très interconnectée et isolée.
 - Hispaniola et la Jamaïque forment une zone de brassage entre plusieurs régions.
 - Deux écorégions, celles des Îles du Vent et de la partie mexicaine de la Mer des Caraïbes avec le Banc de Campêche, semblent avoir un recrutement plus limité que d'autres (en dessous du niveau nécessaire au renouvellement des populations).
 - L'autorecrutement à l'échelle de la Mer des Caraïbes varie de 9 % (au large du Mexique) à près de 57 % (au large de la Colombie, à proximité du gyre semi-permanent de Panama-Colombie).
 - Les populations de coquillages du nord du Yucatán sont isolées des eaux mexicaines de la Mer des Caraïbes, et la contribution du Mexique au recrutement larvaire (qu'il s'agisse de poissons ou de coquillages) dans le sud de la Floride est relativement faible.

Cowen *et al.*
(2006), Paris *et al.* (le présent article)

