

Polynésie française

I.R.D.

Institut de Recherche pour le Développement
(ex-ORSTOM)Renouvellement des eaux du lagon de Takapoto.
Evolution à moyen terme et conséquences

Jean PAGÈS (*), Vincent PRASIL (§)

Résumé

Les études sur le lagon de Takapoto ont commencé en 1974, et se sont poursuivies jusqu'en 2001. De façon constante, la salinité est plus élevée (38 – 41 ‰) à Takapoto que dans la plupart des autres lagons d'atoll (~ 36 ‰). Les concentrations en chlorophylle phytoplanctonique sont également élevées ($0,4 \pm 0,1 \mu\text{g.l}^{-1}$), tant en 1974-78 qu'en 1994-2000. La croissance des huîtres perlières (estimée par la croissance de la coquille) est plus mauvaise à Takapoto que dans la plupart des lagons, que ce soit en 1995-2001 ou en 1980-85.

L'ensemble de ces caractéristiques, constantes, est dû à un faible renouvellement des eaux, du fait de l'étroitesse des communications avec l'océan (les *hoa*). Les débits mesurés en 1975-78 dans les *hoa* sont comparables à ceux de 1997-2000. Aucune différence n'existe entre les photographies aériennes de 1972 et l'image satellitaire de 1991.

Nos observations dans 23 autres lagons d'atoll (considérés comme "normaux") indiquent que la largeur en eau "normale" pour Takapoto, pour sa superficie, serait comprise entre 3 et 8 km environ (médiane = 2.5 km) par houle faible, alors que l'ouverture minimale actuelle des *hoa* est de 0,1 km.

Abstract

The atoll lagoon of Takapoto has been studied since 1974. Successive surveys have found consistently higher salinities (38 - 41‰) in this lagoon than in most other atoll lagoons and the surrounding ocean (~ 36 ‰). The phytoplankton chlorophyll concentrations assessed in 1975-78 ($0.4 \pm 0.1 \mu\text{g.l}^{-1}$) are quite comparable to those found in 1997-2000, with a comparable spatial distribution related to dominant trade winds. Pearl oyster growth rate (shell increase rate) in Takapoto was relatively low, in 1997-2001 as in 1980-85, compared with the rates found in other, well-flushed lagoons.

These constant features are due to low water renewal rates. This condition existed already in 1974-78, as shown by *i*) consistently low flow rates into the lagoon through the few reef-flat spillways, *ii*) similarity between air-borne photographs of 1972 and a satellite view of 1991.

Our observations on 23 other atolls, which may be taken as the "norm", indicate that the "normal" aperture for Takapoto, as a function of its area, ranges between 2 and 8 km (median value of 2.5 km) of "minimum" aperture under low swell conditions, against an actual width of 0.1 km.

(*) : Centre IRD de Tahiti. B.P. 529. Papeete (Tahiti. Polynésie française)

(§) : Service de la Perliculture (ex-SRM). B.P. 9047. Motu Uta (Tahiti. Polynésie française)

1. Introduction

Les premières études sur Takapoto remontent à Août 1974, dans le cadre du programme MAB ("Man and Biosphere") (voir revue in Delesalle et al., 2001). Les observateurs qui se sont succédé relèvent tous la salinité anormalement élevée du lagon (> 40 ‰, pour un océan à 36 ‰ environ). Un programme d'étude entrepris après 1985 ("Programme Général de Recherche sur la Nacre", PGRN1, puis PGRN2 terminé en 1998) a permis la collecte de nombreuses observations, sur Takapoto et sur d'autres lagons d'atoll. A défaut d'une réelle série diachronique, nous avons ainsi (principalement entre 1994 et 2001) un ensemble d'observations qui permettent des comparaisons, selon une démarche typologique, entre la situation vers 1975-78 et celle en 1996-2000.

L'atoll de Takapoto apparaît effectivement anormalement fermé. Les faibles communications avec l'océan déterminent sa position dans un gradient de confinement avec des conséquences relativement classiques sur les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des eaux. Dans le cas précis de la perliculture, le lagon de Takapoto s'insère aussi dans une tendance générale observée sur de nombreux autres lagons. Une dégradation récente du lagon de Takapoto est ainsi peu évidente.

Nous utilisons les résultats de deux programmes d'étude: TypAtoll (Dufour & Harmelin-Vivien, 1997), et PGRN2. Le présent document reprend des articles publiés dans d'autres revues, plus orientées vers un public scientifique, et représente un essai de synthèse qui répondrait à des interrogations locales. Nous avons ainsi renoncé à l'articulation classique d'une publication. La partie traitant des méthodes devra, si nécessaire, être consultée dans divers articles (Andréfouët et al., 2001, sous presse; Pagès et al., 1997, 2001; Pagès & Andréfouët, sous presse; Pagès & Prasil, sous presse; Torrèton et al., 1997, 2000).

2. Cadre de l'étude

La région océanique de Polynésie présente des eaux oligotrophes, c.à.d. "pauvres", avec de très faibles concentrations de sels nutritifs, et donc de plancton. Ce caractère se retrouve partiellement dans les lagons d'atoll, mais avec une modulation par le temps de séjour des eaux. En particulier, la concentration du phytoplancton (estimée par celle de la chlorophylle) augmente avec le temps de séjour (voir § 4.2).

La marée présente, dans les Tuamotu du Nord et du Centre, une amplitude de 0,3 m (en vive eau), contre 0,8 m dans l'Est de l'archipel.

Les houles dominantes sont du secteur Sud, coïncidant avec la distribution des ouvertures du récif sur la plupart des atolls. Les données satellitaires corrigées indiquent une hauteur médiane réelle, H_S , de 1,1 m ($\pm 0,5$ m), avec des houles de 2 m observées dans 3,8 % du temps, et des $H_S > 2$ m dans 1,0 % des cas. La mer du vent, liée aux alizés de secteur Est, représente une énergie plus faible.

3. Conditions physiques générales de Takapoto

La structure classique d'un atoll consiste en un lagon central entouré d'une chaîne d'îlots sableux (les *motu*) séparés par des chenaux (les *hoa*) peu profonds. Une passe est parfois présente, mais non à Takapoto.

3.1. Fonctionnement hydraulique

Rappels

La source principale des entrées d'eau océanique dans un lagon est constituée par le déferlement des vagues sur le récif (voir aussi Gourlay, 1996). L'eau projetée s'accumule sur le platier, à une hauteur supérieure au niveau moyen de la mer, puis s'écoule à travers les *hoa*. Le débit vers le lagon est ainsi contrôlé, d'une part par la largeur en eau des *hoa*, d'autre part par la hauteur de la houle (voir § 3.1.2). La marée ne joue qu'un rôle mineur, sauf dans les Tuamotu de l'Est. La passe, quand elle existe, n'a d'influence qu'à peu de distance et joue un rôle réduit dans le bilan global à l'échelle du lagon entier.

En exploitant les images du satellite SPOT, nous pouvons déterminer précisément la largeur en eau des *hoa*, d'une part en conditions de houle faible (L'_{min}), d'autre part pour une forte houle (L'_{Max}) (Andréfouët et al., 2000).

3.1.1. Ouvertures vers l'océan

La plupart des observateurs mentionnent, sur Takapoto, le faible nombre de *hoa*, et de faibles sections en eau, dont une largeur réduite (et une faible profondeur). Il faut souligner que les cartes existantes, soit les cartes marines, soit celles basées sur des photographies aériennes, ne rendent qu'imparfaitement

compte de ce fait. En effet, dans les 2 cas, seules sont figurées comme émergées les zones de motu portant une végétation. Les portions dénudées, correspondant au mieux à des traces de tempêtes, sont assimilées à des *hoa* fonctionnels et/ou à des hauts-fonds. L'impression globale de larges ouvertures vers l'océan est donc erronée dans le cas de Takapoto (figure 1).

Les autres atolls étudiés fournissent une possibilité de comparaison. En effet, nous constatons que la superficie des lagons (A , en km^2) est corrélée avec plusieurs descripteurs, dont la largeur totale des *hoa*, L' , soit par houle faible (L'_{\min}), soit par houle forte (L'_{\max}) (figure 2):

$$L'_{\min} = 2,16 \cdot \exp(0,0039 \cdot A) \quad r^2 = 0,68^{(1)}$$

$$L'_{\max} = 6,32 \cdot \exp(0,0031 \cdot A) \quad r^2 = 0,69$$

Le "déficit" d'ouverture de l'atoll de Takapoto par rapport à la "norme" que représenteraient les autres atolls serait ainsi de l'ordre de **plusieurs kilomètres** (voir Annexe B).

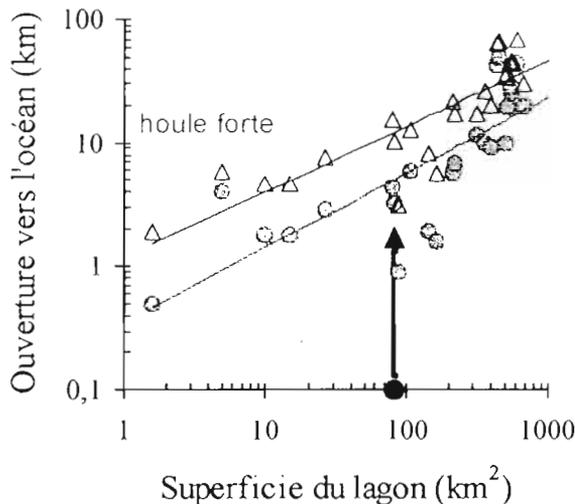


Figure 2. Corrélation entre la largeur en eau des *hoa* (par houle faible ou houle forte) et la superficie du lagon, sur un ensemble de 23 lagons d'atoll des Tuamotu.

A partir de ces régressions, la "norme" devrait être, d'après la superficie de Takapoto, comprise entre 3 et 5 km environ pour l'ouverture minimum L'_{\min} . D'après le périmètre de l'atoll, L'_{\min} "devrait" être d'environ 5 km. Enfin, à partir des caractéristiques hydrauliques et physico-chimiques du lagon, nous arrivons (annexe B) à un ensemble de valeurs "normales" pour L'_{\min} , dont la médiane est de 2,5 km (tableau II).

Nous avons comparé les photographies aériennes, prises en 1972, avec l'image SPOT de 1991. Il n'apparaît aucune différence significative entre les deux images quant à l'ouverture, ou au "débit" probable, des *hoa*. Une composante subjective est certes possible dans l'interprétation des photographies. L'état de la mer, inconnu dans les 2 cas, peut introduire une autre incertitude. L'impression globale reste cependant celle d'une identité totale des deux images.

3.1.2. Débit dans les *hoa*

Nous avons procédé, lors de nos missions, à des mesures de débit dans différents *hoa*. Nous rappellerons que le débit spécifique (q , par mètre de largeur en eau) est étroitement contrôlé par la hauteur de la houle, avec une modulation par la topographie du récif (Gourlay, 1996). Ainsi, les débits spécifiques relevés sur Takapoto sont restés $< 0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ par mètre de largeur en eau) valeur

¹ le "coefficient de détermination" r^2 estime la proportion de la variation de L' (dans ce cas) qui est expliquée (ou prédite) par A . Un r^2 de 1,0 signifierait qu'on peut prédire L' à partir de A sans aucune incertitude.

plausible vu les houles faibles ($H_s < 1$ m) lors des observations, et en comparaison avec d'autres atolls où nous avons observé des $q \sim 1,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Sur ce point, Takapoto resterait donc "normal".

En ce qui concerne les débits mesurés (valeur absolue) dans les hoa, nous arrivons à des valeurs de l'ordre de quelques $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, avec un débit total variant entre 8 et $56 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ selon les conditions de houle. Ces chiffres sont tout à fait comparables avec ceux obtenus en 1975-78, ou leur sont même supérieurs (tableau I).

L'ouverture des hoa, déterminée sur les images par satellite (SPOT) permet de calculer pour chaque atoll un débit "potentiel" en fonction de la houle (Pagès et al., 2001 c), avec 3 valeurs: débit "minimum" par houle très faible ($H_s \sim 0,2$ m), débit "maximum" par houle forte ($H_s \sim 3$ m), et débit "moyen" ($H_s \sim 1,0$ m). Nos calculs donnent pour l'ensemble de l'atoll de Takapoto un débit total minimum de $8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et un débit moyen de $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, donc en bon accord avec les mesures de terrain. Nous avons observé cette même concordance entre calculs et mesures sur d'autres atolls (Pagès et al., 2001 c).

3.1.3. Variations du niveau du lagon

Il est bien admis que l'arrivée d'un train de forte houle provoque une montée du niveau des lagons. Des relevés hebdomadaires de niveau ont été effectués par le SRM ("Service des Ressources Marines"; Service de la Perliculture actuellement) dans plusieurs lagons ("Réseau de Suivi d'Atolls Perlicoles") (voir données partielles en annexe G). Takapoto semble ainsi réagir de façon moins intense que des atolls plus ouverts, mais la montée des eaux est cependant nette (figure 3).

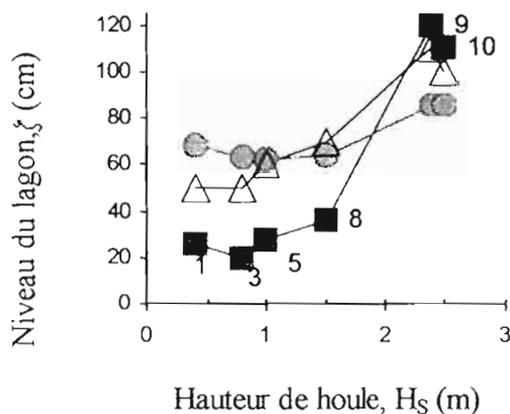


Figure 3. Surélévation du niveau de lagons lors d'épisodes de forte houle. Les mesures concernent Rangiroa (Δ), Takapoto (\bullet) et Fakarava (\blacksquare). Les chiffres sont les dates de Juin 1998 pour ce dernier atoll.

Ces variations de niveau, ramenées au temps écoulé, fournissent une estimation du débit entrant par forte houle. Le chiffre maximum observé depuis le début du suivi est de $318 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, alors que nos calculs prédisent un débit "potentiel" maximum (§ 3.1.2) de $810 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

3.1.4. Renouvellement des eaux du lagon

Au niveau de l'ensemble du lagon, nos calculs donnent un temps de séjour moyen de 268 jours (correspondant à des conditions "moyennes" de houle), avec des valeurs extrêmes de 2700 jours ($\sim 7,5$ ans) et 27 jours pour des houles très faibles ou fortes respectivement. Les études antérieures avaient avancé des temps de séjour de l'ordre de plusieurs années, qui peuvent s'expliquer:

→ calculs basés sur les débits dans les hoa: la plupart des chiffres présentés correspondent manifestement à des houles très faibles. Ce diagnostic ne nous est possible que grâce, d'une part à la répétition des missions, d'autre part à l'existence des satellites Topex/Poseidon et ERS, qui fournissent des mesures continues de houle.

→ calculs basés sur ^{137}Cs : les prélèvements destinés à cette analyse, par ailleurs très précise, auraient été réalisés dans le Sud de la portion Sud-Ouest (Badie, comm. pers.). Nous avons pu constater que cette portion est particulièrement confinée (voir ci-après).

→ calculs basés sur la salinité: l'effet des entrées d'eau océanique n'avait pas été pris en compte (voir ci-dessous et annexe A).

3.2. Circulation interne

3.2.1. Courants internes

Nous avons procédé à 2 séries de mesures "lagrangiennes".s. Les trajectoires des bouées de surface, de façon prévisible, suivirent le vent à une vitesse de l'ordre de 3 % de celle du vent (soit environ 10 cm.s⁻¹; figure 1).

Des mesures "lagrangiennes" ont été réalisées en 1977-78 (Guérédrat & Rougerie, 1978), en suivant des bouées lestées (figure 1). Nos propres mesures ont aussi été effectuées par vent de secteur Est. Le tableau ci-après donne la date, et la direction et la vitesse (en noeuds) du vent :

a	07/11/1977	N-E	5-10	g	04/03/1978	N-E	5-10
b	08/11/1977	E-SE	20	h	05/03/1978	E	5-8
c	09/11/1977	N-NE	12-15	k	07/03/1977	E	5-8
d	10/11/1977	E	5-10	m	16/03/1997	E-SE	5
e	13/11/1977	E-NE	5-10	n	25/08/2000	N-E	11
f	14/11/1977	N-NE	2-6				

Le régime de vents dominants aboutit à une accumulation des eaux (et des particules organiques en suspension) dans la portion Sud-Ouest. La présence du village sur cette même portion ne peut ainsi qu'amplifier une eutrophisation⁽²⁾ fréquente.

3.2.2. Temps de séjour

Sur un ensemble de 23 lagons d'atoll, nous avons pu mettre en évidence une corrélation hautement significative entre le temps de séjour des eaux (au niveau du lagon entier) et la concentration en matière organique dissoute (MOD). La MOD naturelle résulte de l'ensemble des processus biologiques, et il est assez logique que sa teneur augmente au cours du temps. Nous disposons ainsi d'un estimateur (au moins semi-quantitatif) de la distribution du temps de séjour des eaux à l'intérieur d'un lagon (voir annexe C).

Dans le cas précis de Takapoto, nos relevés (portant sur 10 stations, et répétés à 4 reprises) permettent de dresser une carte certes approximative, mais plausible, des temps de résidence. Nous constatons en effet, en accord avec les dérives dues au vent, une augmentation nette du temps de résidence dans la portion Sud-Ouest du lagon.

4. Conséquences physiques et biologiques

4.1. Salinité

La détermination de la salinité est fréquemment réalisée sans objectif bien défini, en perdant de vue le fait que ce paramètre est d'abord une conséquence du confinement, et non une variable forçante. Au niveau du fonctionnement biologique d'un écosystème, la salinité sera ainsi le plus souvent un parmi les "multiples stressors" liés au confinement. Dans une autre optique, la salinité peut permettre une estimation assez précise du temps de séjour d'une masse d'eau, mais seulement dans des conditions bien définies où les seuls échanges d'eau se font avec l'atmosphère (voir annexe A). Dans le cas des lagons d'atoll, la mesure de la salinité n'a donc qu'une valeur indicative.

Dans le cas précis de Takapoto, les salinités mesurées sur l'année 1981-82 sont de ~ 38 ‰ (Mizuno, 1984). Entre Décembre 1974 et Novembre 1975, elles restent entre 39,5 et 39,8 ‰ (Magnier & Wauthy, 1976; Ricard et al., 1978). En 1976-77, elles atteignent 40 - 41 ‰ (Guérédrat &

² "eutrophisation": sur-abondance, ou excès, de biomasse. La prolifération des algues planctoniques ou non, est souvent la conséquence d'apports excessifs de substances nutritives.

Rougeric,), dépassant ainsi les fluctuations "prévisibles exceptionnelles" (39,2 à 41,5 ‰) de Magnier & Wauthy (*op. cit.*). Le suivi hebdomadaire réalisé en 2000-2001 (voir annexe G) et les mesures de 1997-1999 donnent des salinités de l'ordre de 38 - 39 ‰. Nous pouvons en conclure que les conditions de renouvellement de l'eau ne se sont pas dégradées (bien au contraire !) entre 1974-77 et 2000.

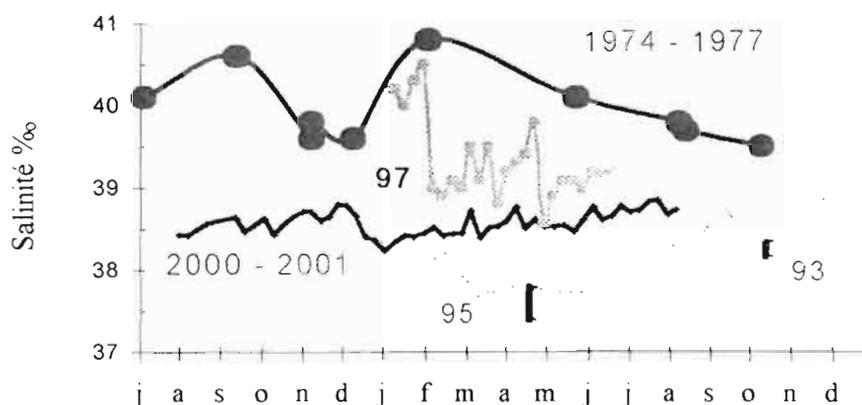


Figure 4 . Variations de la salinité du lagon de Takapoto au cours du temps. Les suivis hebdomadaires récents (1997 et 2000-2001) ont fourni des valeurs encadrées par celles trouvées entre 1974-77 (mesures ponctuelles) et 1981 (suivi décadaire). Des relevés ponctuels existent aussi en 1993 et 1995 (barres verticales).

Nos relevés hebdomadaires montrent que les variations détaillées de salinité ne peuvent être justifiées seulement à partir de la pluviométrie Pagès et al., 2001 b). Nous devons inclure dans le bilan les entrées d'eau océanique (détectables par les variations du niveau du lagon). Nous pouvons ainsi comprendre les chiffres de temps de séjour avancés dans des études antérieures, qui n'avaient pas pris en compte les entrées (moyennes, ou effectivement mesurées) d'eau océanique.

4.2. Phytoplancton

Rappels

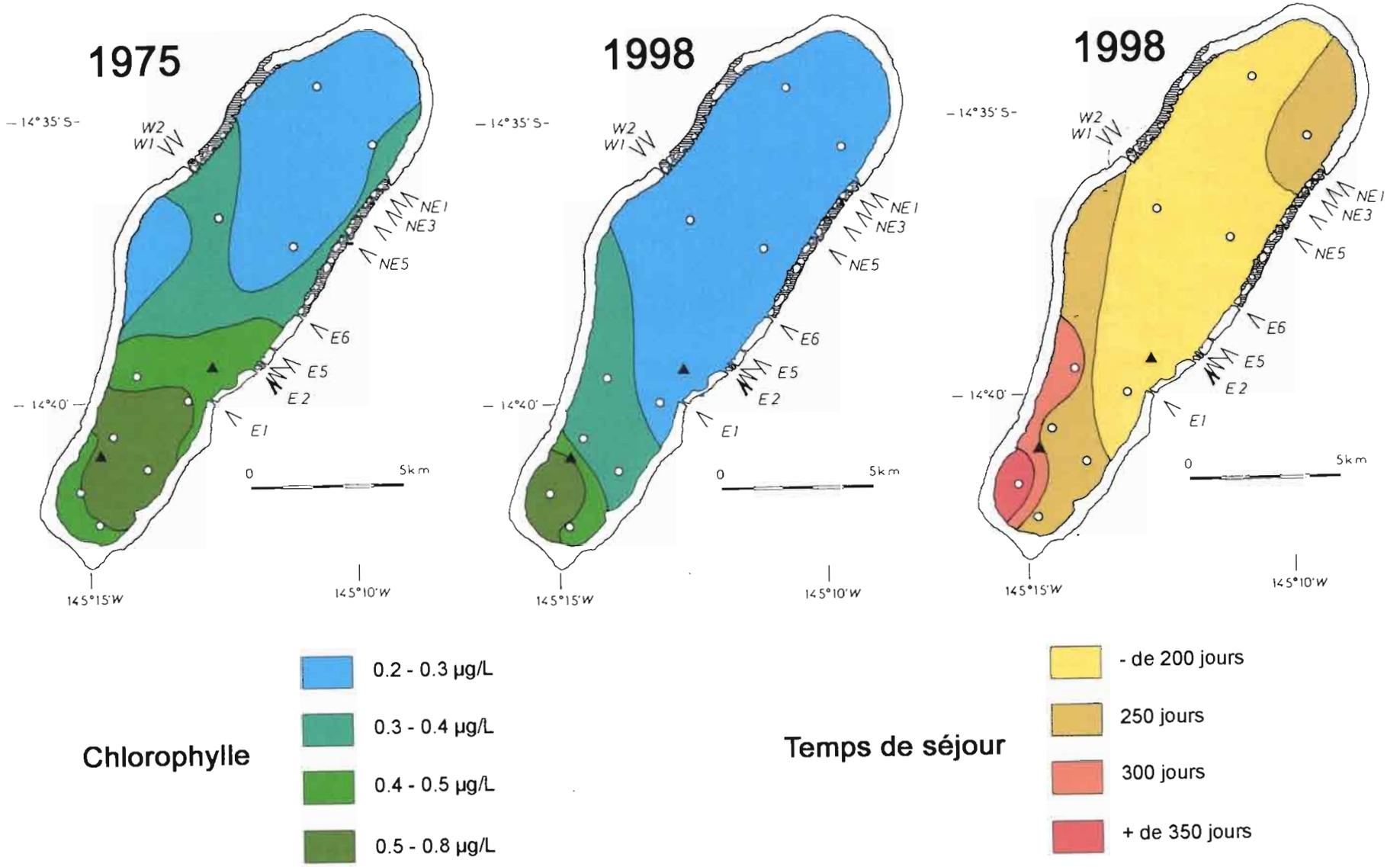
Les algues unicellulaires (microscopiques) planctoniques représentent classiquement le premier maillon de la "chaîne alimentaire". Leur abondance donne une estimation très globale de la "richesse" d'une masse d'eau. Parmi les diverses méthodes de détermination de cette abondance, le dosage de la chlorophylle est une des méthodes les plus courantes, aussi du fait de sa simplicité et de sa sensibilité.

La concentration en chlorophylle est exprimée en micro-grammes par litre ($\mu\text{g chl.L}^{-1}$). A titre indicatif, une concentration de $1 \mu\text{g chl.L}^{-1}$ est une valeur forte pour les lagons d'atoll. Elle correspond à $\sim 100 \mu\text{g}$ de carbone organique par litre, soit $0,1 \text{ g par m}^3$. L'ensemble du lagon de Takapoto contiendrait ainsi de l'ordre de 85 tonnes de carbone organique particulaire sous forme de phytoplancton (~ 300 tonnes en poids humide).

Par rapport à l'eau océanique, oligotrophe, qui contient moins de $0,1 \mu\text{g chl.L}^{-1}$, les lagons "normaux" présentent des concentrations de l'ordre de $0,2$ à $0,4 \mu\text{g chl.L}^{-1}$, tandis qu'une teneur de $1 \mu\text{g chl.L}^{-1}$ est très élevée. Nos relevés à Takapoto (4 missions) donnent une moyenne globale de $0,42 (\pm 0,096) \mu\text{g chl.L}^{-1}$. Une compilation de l'ensemble des mesures effectuées depuis 1975 (Delesalle et al., 2001) donne une moyenne de $0,41 \mu\text{g chl.L}^{-1}$, confirmant la relative "richesse" de Takapoto par rapport aux autres lagons, mais surtout la stabilité, ou la pérennité, de cet état.

La répartition spatiale des concentrations doit cependant être considérée. Tant nos relevés que les anciennes mesures (Ricard et al., 1978) montrent des concentrations systématiquement plus élevées dans la portion Sud-Ouest (figure 5), avec des pics occasionnels à $>0,8 \mu\text{g chl.L}^{-1}$. Il est difficile d'affirmer qu'il ne s'agit que d'accumulation (passive, par le vent). Une croissance sur place reste possible, au vu des longs temps de séjour des eaux. Quoi qu'il en soit, cette portion reste souvent nettement plus "riche" que le reste du lagon, ce qui peut entraîner un dépôt de matière organique.

Figure 5. Distribution spatiale des concentrations de chlorophylle en 1974-75 (Badie et al., 1978) et en 1997-99, et des temps de séjour (d'après Ays) en 1997-99.



4.3. Perliculture

Il semblerait évident que la croissance des huîtres perlières soit fonction de la quantité de nourriture disponible. Les huîtres étant des filtreurs, une concentration élevée de chlorophylle (ou de matière organique) planctonique devrait être favorable. En ne considérant que cet aspect quantitatif, un modèle récent (Pouvreau & Prasil, 2001) basé sur le suivi de plusieurs populations d'huîtres montre l'effet favorable de fortes concentrations de matière organique, et un effet défavorable des matières inertes en suspension.

Cependant, une autre série de mesures, couvrant un plus large éventail de conditions, dans un plus grand nombre de lagons, aboutit à des conclusions apparemment opposées (Pagès & Prasil, sous presse). En effet, nous avons constaté une meilleure croissance des huîtres dans les eaux bien renouvelées, à faible concentration en chlorophylle (figure 6).

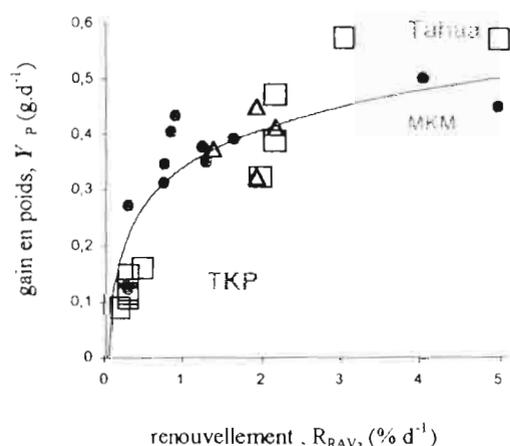


Figure 6. Augmentation du taux de croissance en poids (en g par jour) en fonction du taux de renouvellement des eaux (en % par jour), dans les lagons d'atoll (●) et dans ceux d'îles hautes (▲) en 1997-99. Les observations de Mizuno (1985; □) avaient déjà montré les mauvaises croissances de Takapoto (TKP) par rapport aux maximums de Makemo (MKM) ou Tahaa.

Nous n'avons pas détecté de corrélation significative ni avec la température de l'eau, ni avec sa salinité. Nous proposons que les eaux oligotrophes, "pauvres", contiennent des micro-organismes (ciliés, flagellés, etc) en faible nombre, mais dont la composition chimique fournit aux huîtres des éléments-traces (vitamines, acides gras essentiels, etc) particulièrement bénéfiques.

Il faut par ailleurs souligner que les taux de croissance mesurés à Takapoto entre 1994 et 2001 (Pouvreau & Prasil, 2001; Pagès & Prasil, sous presse) ne sont pas nettement plus mauvais que ceux qui avaient été mesurés en 1982-85 sur une population d'huîtres sauvages (Cheffort, 1985) et sur plusieurs milliers d'huîtres d'élevage (Mizuno, 1980, 1981, 1982, 1985). Nous avons ainsi une confirmation indirecte de la stabilité de ce lagon sur une période de près de 20 ans.

4.4. Effets probables d'une modification de l'hydraulique

Notre approche comparative est basée sur l'hypothèse que tous les lagons sont soumis à des lois générales (physico-chimiques et biologiques) et que la variable forçante principale est le renouvellement de l'eau, comme dans une culture continue⁽³⁾. Les corrélations observées entre T_{RAV} et les caractéristiques des eaux valident a posteriori cette hypothèse. Nous pouvons ainsi admettre que chaque lagon représente un état stable correspondant à une ouverture donnée. La modification de l'ouverture devrait entraîner un réajustement.

Les régressions observées sont, pour la plupart, des formes "puissance". Les changements seront alors importants, quantitativement, pour de faibles modifications initiales (voir annexe F), et s'atténueront pour des modifications de plus en plus importantes. Le "coût marginal" s'accroît.

³ des micro-organismes peuvent être cultivés soit "en batch" (développement, palier puis décroissance, et mort, dans un volume constant de milieu nutritif isolé de l'extérieur), soit en "culture continue", avec renouvellement permanent (à volume constant) par du milieu nutritif neuf. Le taux de croissance, et la concentration, sont alors directement fonction du "taux de dilution" (Monod, 1949), équivalent à notre taux de renouvellement. Dans le cas de compétition entre plusieurs micro-organismes, le résultat de la compétition (= composition spécifique) dépend aussi du taux de dilution.

Les régressions observées sont, pour la plupart, des formes "puissance". Les changements seront alors importants, quantitativement, pour de faibles modifications initiales (voir annexe F), et s'atténueront pour des modifications de plus en plus importantes. Le "coût marginal" s'accroît.

La durée nécessaire à l'adaptation est plus malaisée à estimer. ce qui peut sembler de simples problèmes de terminologie ("temps de résidence", "temps de renouvellement", etc) correspond à des réalités. Un ordre de grandeur est cependant fourni par T_{RAV} , qui correspond à des conditions "moyennes" de houle, et qui évolue (logiquement) en parallèle avec les autres caractéristiques du lagon (annexe F).

L'importance de la modification à apporter à l'ouverture des *hoa* ne peut donc être déterminée qu'en recherchant un compromis entre d'une part l'importance des changements souhaitée, d'autre part le coût de l'opération.

5. Conclusions

La comparaison du lagon de Takapoto avec une série de 23 autres lagons d'atoll permet de constater que Takapoto représente un cas assez extrême dans une tendance générale, où le temps de séjour des eaux (ou le régime hydraulique) contrôle leurs caractéristiques, et le fonctionnement général de l'écosystème. La comparaison des observations récentes avec des mesures effectuées en 1975-78 (donc avant les cyclones de 1983) montre que les caractéristiques des eaux n'ont pas varié de façon significative. De même, les débits dans les *hoa* ne sont pas, actuellement, systématiquement plus faibles qu'en 1975. Cette constance des paramètres mesurés n'exclut pas une accumulation de substances peu favorables, ou nocives (mais non mesurées auparavant) au cours du temps.

Nous avons relevé que les quelques rares *hoa* de Takapoto semblent avoir un fonctionnement normal. La proposition de "normaliser" le régime hydraulique de l'ensemble du lagon, en élargissant les ouvertures vers l'océan, peut paraître élémentaire. Nous avons souligné l'ampleur matérielle de l'entreprise (ouvrir la couronne sur **2,5 km** !). Il reste à examiner les risques collatéraux **possibles** de tels travaux, dont le moindre n'est pas celui de flambées de ciguatera (voir annexe E).

Si un élargissement des *hoa* était décidé (et ceci n'est plus du ressort des scientifiques), il serait regrettable que la réaction du lagon ne soit pas suivie. Des relevés hebdomadaires furent pratiqués pendant plusieurs années, et sont donc réalisables. La communauté scientifique internationale profiterait autant de telles observations que la perliculture, que ce soit sur Takapoto ou dans l'ensemble de la Polynésie.

Références bibliographiques

- Andrefouët S., Claereboudt M., Matsakis P., Pagès J., Dufour P. 2001 - Typology of atoll rims in Tuamotu archipelago (French Polynesia) at landscape scale using SPOT-HRV images. *Int. J. remote Sensing*, 22: 987-1004.
- Andrefouët S., Pagès J., Tartinville B. - Water renewal time for classification of atoll lagoons in the Tuamotu archipelago (French Polynesia). *Coral Reefs*, 20:396-408.
- Bagnis R, 1984 - Dégradations et nuisances. in: *Les écosystèmes lagunaires de Polynésie Française. Etat des connaissances. Vol. 1: Contributions. Centre ORSTOM Tahiti: 210-252*
- Cheffort N, 1988 - Les caractéristiques biologiques du stock naturel d'huîtres perlières (*Pinctada margaritifera*, L. 1758) dans l'atoll de Takapoto (Tuamotu, Polynésie française). *Mém D.A.A. E.N.S.A.R. / O.R.S.T.O.M: 66 p.*
- Delesalle B, Sakka A, Legendre L, Pagès J, Charpy L, Loret P. 2001 - The phytoplankton of Takapoto Atoll (Tuamotu Archipelago, French Polynesia): time and space variability of biomass, primary production and composition over 24 years. *Aquat Living Resour 14: 175-182*
- Dufour P, Andrefouët S, Charpy L, Garcia N, 2001- Atoll morphometry controls lagoon nutrient regime. *Limnol Oceanogr 46:456-461*
- Dufour P, Harmelin-Vivien M, 1997 - A research program for a typology of atoll lagoons: strategy and first results. *Proc. 8th Int Coral Reef Symp (Panama), 1: 843-848*
- Gourlay MR, 1996 - Wave set-up on coral reefs. 2. Set-up on reefs with various profiles. *Coast Eng 28: 17-55*
- Guérédrat J-A, Rougerie F, 1978 - Etude physico-chimique et planctologique du lagon de l'atoll de Takapoto. (contr. 75.380 Serv. Pêche Polynés. franç./ORSTOM), *Notes Doc. Océanogr. ORSTOM Nouméa, 1 (1978) 39 p + fig.*
- Magnier Y, Wauthy B, 1976 - Esquisse hydrologique du lagon de Takapoto (Tuamotu). *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr., XIV/4: 279-287*
- Mizuno K, 1984 - Etude de la greffe de l'huître perlière à lèvres noires (*Pinctada margaritifera*). *EVAAM, Aquacult n° 9: 34 p.*

- Monod J, 1949 - La technique de culture continue. Théorie et applications. *Ann. Inst. Pasteur*, 79: 390-410
- Pagès J, Andréfouët S, 2001 - A reconnaissance approach for hydrology of atoll lagoons. *Coral Reefs*, 20: 409-414.
- Pagès J, Prasil V (sous presse) - Effect of water confinement upon pearl-oyster growth rate: Food quality vs quantity. *Proc 9th Int Coral Reef Symp (Bali)*, Moosa K (ed)
- Pagès J, Torréton JP, Seinpéré R, 1997 - Dissolved organic carbon in coral-reef lagoons, by high temperature catalytic oxidation and UV spectrometry. *CR Acad Sci, Paris, Ser IIa* 324: 915-922
- Pagès J, Andréfouët S, Delesalle B, Prasil V, 2001 - Hydrology and trophic state in Takapoto Atoll lagoon: comparison with other Tuamotu lagoons. *Aquat Living Resour* 14/3: 183-193
- Pouvreau S, Prasil V (2001) Growth of the black-lip pearl oyster, *Pinctada margaritifera*, at nine culture sites of French Polynesia: synthesis of several sampling designs conducted between 1994 and 1999. *Aquat Living Resour* 14: 155-163
- Ricard M., Badie C., Renon J.-P., Simeon C., Sournia A., 1978 - Données sur l'hydrologie, la production primaire et le zooplancton du lagon de l'atoll fermé de Takapoto (Archipel des Tuamotu, Polynésie Française). *Rapp. CEA- R-4918. Serv. Doc. CEN, Saclay (1978): 89 p.*
- Torréton JP, Pagès J, Dufour P, Cauwet G. 1997 - Bacterioplankton carbon growth yield and DOC turnover in some coral reef lagoons. *Proc 8th Int Coral Reef Symp (Panama)*, Lessios HA (ed), Allen Press, New-York. 1: 947-952
- Torréton JP, Talbot V, Garcia N, 2000 - Nutrient stimulation of bacterioplankton growth in Tuamotu atoll lagoons. *Aquat Microb Ecol* 21: 125-137

Tableau I: Mesures dans les *hoa* de Takapoto.

Secteurs Est, Nord-Est et Ouest

Les débits négatifs représentent un courant sortant

<i>hoa</i>	largeur en eau m	profond. de l'eau m	courant $m.s^{-1}$	débit entrant $m^3.s^{-1}$	date	reference
E1	20	0.6	0.5	<i>6.0</i>	1975-78	1
"	35	0.15	0.06	0.3	Mar. 17, 1997	3
"	35	0.5	0.5	7.1	Aug. 15, 1998	"
"	35	0.4	0.65	8.5	Aug. 16, 1998	"
"	38	0.3	0.46	4.8	Jul. 10, 1999	"
"	42	0.35	0.5	7.3	Aug. 25, 2000	"
E2	80	0.7	1.5	<i>84.0</i>	1975-78	1
"	80	0.2	0.3	<i>4.8</i>	Aug. 75	2
"	80	0.25	0.12	2.0	Mar. 17, 1997	3
"	85	0.5	0.4	18.3	Aug. 15, 1998	"
"	100	0.3	0.95	28.8	Jul. 10, 1999	"
"	100	0.35	1.1	36.3	Aug. 25, 2000	"
E3	30	1.0	0	0	Mar. 17, 1997	"
E4	35	0.6	0	0	"	"
E5	20	0.5	0	0	"	"
E6	40	0.6	0	0	"	"
NE1	10	0.2	-0.5	-1.0	Aug. 13, 1998	"
"	52	0.1	0.74	3.9	Jul. 09, 1999	"
"	55	0.1	0.47	2.6	Aug. 23, 2000	"
NE2	30	0.2	0.66	4.0	Aug. 23, 2000	"
NE3	60	0.15	0.64	5.8	Aug. 23, 2000	"
W1	20	0.6	1.0		1975-78	1
"	20	0.5	0.01	0.1	Mar. 17, 1997	3
"	18	0.8	0.33	4.8	Mar. 21, 1997	"
"	6	0.1	0.7	0.3	Aug. 23, 2000	"
	Aug. 23, 2000	"				
W2	~3	0.2	0	0	Mar. 17, 1997	"
Total	maximum observé			<i>110.7</i>	1975-78	1
"	moyen			9.5	1975	2
"	"			2.4	Mars 1997	3
"	"			26.4	Août 1998	"
"	"			37.5	Juillet 1999	"
"	"			56.3	Août 2000	"

En italique, chiffre recalculé d'après les données des auteurs

References : (1) : Guérédrat & Rougerie, 1978 ; (2) : Ricard et al., 1978 ; (3) cette étude.

Tableau II. Largeur minimum des *hoa* (en km) nécessaire pour ramener Takapoto à la "norme" des lagons d'atoll, selon différents paramètres.

paramètre	selon L'_{min}/A selon $L'_{min}/\Sigma L$	
	T_{RAV}	1,3-1,5
R_{av}	2,5-3,0	2,0-2,5
$S\text{‰}$	5-6	9
A_{254}	5	4
B_{tot}	6	2,5
Y_{FI}	2,5	5 - 6

Annexe A: Salinité et temps de séjour

Une masse d'eau de mer isolée, et soumise aux seuls échanges avec l'atmosphère, verra évoluer sa salinité, S , au cours du temps en fonction de sa profondeur (Z), du taux d'évaporation (E) et de la pluviométrie (P) selon l'équation

$$S_t = S_0 \cdot \exp\left\{\frac{(E - P)}{Z} \cdot t\right\}$$

Ainsi, si l'évaporation sur la période t a été supérieure à la pluie, la salinité augmentera. En théorie, si E et P sont constants et connus précisément, le temps t peut être déterminé à partir de S_0 , S_t et Z .

Cette équation n'est valide que si toutes les conditions ci-dessus sont vérifiées. Un apport latéral d'eau (à quelque salinité qu'elle soit) oblige à une analyse différente (cas classique du "bassin terminal"). Dans le cas précis des lagons d'atoll, une démarche analytique perd fortement de son intérêt.

Annexe B: Hydraulique et biologie. Essai d'estimations quantitatives

La corrélation entre superficie des lagons et largeur cumulée des hoas fournit une estimation de la largeur "normale" de hao que "devrait" présenter Takapoto. Les différentes équations de régression donnent, pour l'ouverture minimale correspondant à une superficie de 81 km², des chiffres compris entre 3,0 et 5,0 km. Il en va de même pour l'ouverture maximale, et nous pouvons ainsi fournir une estimation de l'ordre de grandeur de l'anomalie, et donc des travaux qui seraient nécessaires.

ouverture totale		réelle	"norme"
minimale	houle faible	0,1 km	3 - 5 km
maximale	houle forte	1,7 km	8 - 12 km

La détermination d'une plage de valeurs, et non d'un chiffre unique, provient de notre emploi de régressions statistiques, qui déterminent un intervalle de confiance. Ainsi la relation entre L'_{\min} et A fournit une largeur L'_{\min} "normale" de 4,7 km, mais avec des bornes de confiance de 1,8 et 12,8 km, à partir de la régression:

$$\ln(L'_{\min}) = (0,495 \pm 0,104) \cdot \ln A - (0,616 \pm 0,532) \quad r^2 = 0,560$$

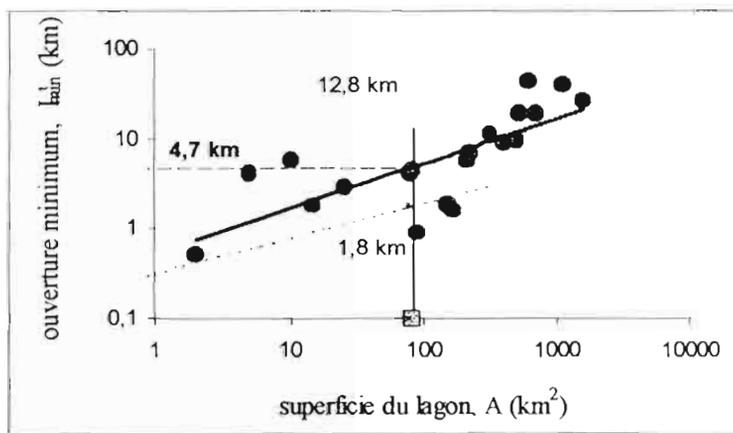


Figure . Intervalle de confiance (à 95 %) de la relation entre l'ouverture et la superficie.

La relation exponentielle présentée antérieurement (p. 3) entre L'_{\min} et A avait un coefficient de détermination plus élevé. Le problème de l'intervalle de confiance demeurera cependant. De même, il existe une bonne corrélation, pour les autres atolls, entre L'_{\min} et le périmètre ΣL :

$$\ln(L'_{\min}) = (0,993 \pm 0,221) \cdot \ln(\Sigma L) - (2,213 \pm 0,908) \quad r^2 = 0,528$$

qui amène à une valeur "normale" de l'ordre de 5 km (mais avec des bornes à 0,9 et 30 km !).

Au vu de ces chiffres, fort élevés à l'échelle humaine, et surtout locale, la question se pose d'estimer les conséquences probables de travaux moins ambitieux : Ne suffirait-il pas de draguer 100 m, ou 300 m, pour obtenir une amélioration, sans aller jusqu'à "normaliser" le lagon ? Nous pouvons utiliser les tendances observées sur les autres atolls pour déterminer les équations qui lient le fonctionnement hydraulique d'un lagon, et spécialement l'ouverture minimale, aux caractéristiques des eaux. Ces régressions (voir Annexe F) nous permettent de déterminer indirectement quelle ouverture minimale devrait amener des caractéristiques "normales" des eaux, la "norme" étant ici la moyenne sur tous les autres lagons (tableau II).

Cette démarche ne permet pas, naturellement, de s'affranchir du problème des bornes de confiance (non présentées ici) mais permet de confirmer l'ordre de grandeur des ouvertures "minimales" qui semblent nécessaires pour ramener Takapoto à la "norme" des autres lagons d'atoll.

Annexe C. Temps de séjour des eaux et propriétés in situ

Nous avons calculé le temps de séjour moyen de l'eau dans plusieurs lagons d'atoll, à partir d'un ensemble de mesures de terrain, d'estimations satellitaires et de mesures de houle. Nous définissons ainsi, au niveau d'un atoll entier, un temps de séjour moyen (T_{RAV}) correspondant à des conditions moyennes de houle.

Parallèlement, nous avons procédé à des mesures sur les caractéristiques de l'eau. La concentration en chlorophylle phytoplanktonique (B, en $\mu\text{g chl.L}^{-1}$) augmente avec le temps de séjour. D'autres auteurs avaient déjà relevé ce point, à partir d'une compilation de divers travaux antérieurs. Nous avons pu confirmer cette tendance à partir de l'ensemble homogène (aussi quant aux méthodes) de nos 22 lagons d'atoll (Andréfouët et al., sous presse). Cette augmentation de la chlorophylle, indicatrice d'une biomasse planctonique plus forte, est prévue par la théorie (cultures continues). Elle s'accompagne d'une modification qualitative des organismes phytoplanktoniques, et de l'ensemble du "réseau trophique" (~"chaîne alimentaire").

Nous avons également constaté une augmentation de la concentration en matière organique dissoute (MOD) naturelle avec le temps de séjour des eaux (Pagès & Andréfouët, sous presse). Cet effet, qui porte sur un paramètre assez rarement mesuré, est mentionné parfois de manière indirecte, ou implicite, par quelques auteurs. Bien que non prévisible par la théorie, cette accumulation de MOD au cours du temps reste plausible. Nous observons ainsi une bonne corrélation entre un estimateur de la MOD (l'absorption de la lumière ultra-violette à 254 nm, A_{254}) et le temps de séjour moyen, T_{RAV} .

Si nous admettons que les processus sont comparables quelle que soit l'échelle spatiale, la corrélation entre temps de séjour T_{RAV} et chlorophylle (B) d'une part, MOD d'autre part doit permettre de déterminer la distribution des temps de séjour à l'intérieur d'un lagon. Dans le cas présent de Takapoto, nous avons appliqué, pour calculer le temps de séjour T_R des diverses masses d'eau, les deux équations (tirées de plusieurs régressions):

$$T_R = 260 + 425,5 \cdot \ln(A_{254})$$

$$T_R = -1736 \cdot B^3 + 2230 \cdot B^2 - 300 \cdot B + 3$$

Le calcul à partir de B donne systématiquement des T_R plus faibles que ceux dérivés de A_{254} . La carte de la figure 4.C est basée sur ces derniers. Dans les deux cas, les chiffres de T_R ne sauraient être pris comme absolus, puisque issus d'une régression, et donc obligatoirement affectés d'un intervalle de confiance. Il est donc impératif de les considérer comme des ordres de grandeur, donnant une distribution relative, et au mieux semi-quantitative, des temps de séjour des eaux à l'intérieur du lagon.

Annexe E. Risques potentiels induits par des aménagements

La modification du régime hydraulique d'un lagon comporte obligatoirement des risques. Il est difficile de prédire quels effets biologiques peuvent résulter d'un renouvellement plus actif dans le lagon de Takapoto, au-delà des changements indiqués par notre approche comparative.

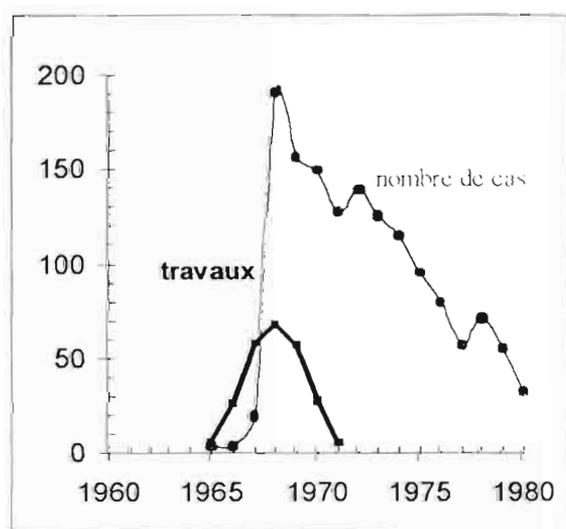
Perliculture

En l'absence de données, nous ne pouvons faire aucune extrapolation quant au collectage de larves d'huîtres. La littérature fournit certes des chiffres de récolte de nacre (Intes, 1985; Intes & Coeroli, 1985). Il est évident que la production d'un lagon n'est pas seulement fonction du stock naturel existant, mais aussi de l'effort, lui-même dépendant de plusieurs facteurs. La seule relation que nous ayons consisté en une corrélation **négative** entre superficie du lagon et production moyenne (en tonnes de nacre par an) : le lagon de Haraiki devant être mis à part. Cette relation, bien que statistiquement significative ($r^2 = 0,404$, $n = 18$; $P < 0.01$), ne peut guère être justifiée en termes de fonctionnement biologique. Nous pouvons plutôt soupçonner un artefact lié aux modalités d'exploitation par l'homme: distances plus importantes, profondeurs plus grandes, clapot du vent plus fréquent, etc. La production n'est pas liée à l'effectif de la population "officielle", mais nous n'avons aucun chiffre pour l'effort de pêche.

Ciguatera

Il est bien admis, au moins par une bonne part de la population, que des flambées de ciguatera peuvent être provoquées par des travaux importants d'aménagement. Ainsi, l'archipel des Gambier aurait été particulièrement touché par la ciguatera après les travaux d'installation d'une base arrière de l'armée.

Un autre exemple est fourni par l'atoll de Hao. Bien que l'importance des agressions diverses soit difficile à chiffrer précisément, le calendrier de la flambée de ciguatera dans ce lagon est assez éloquent (Bagnis, 1984).



Calendrier des aménagements portuaires (unités arbitraires) et des cas de ciguatera (nombre par an) sur l'atoll de Hao. Graphique repris de Bagnis (1984).

Il ressort de ces données chiffrées que l'amortissement d'une flambée de "gratte" peut durer plus de 15 ans dans un lagon aux eaux pourtant bien renouvelées.

Dans le cas précis de Takapoto, nous pouvons supposer qu'un dragage des hoas ne créerait pas de surfaces réellement "neuves" en quantité importante. Cependant, les surfaces dures, enfouies depuis longtemps sous des graviers, ne portent sans doute pas le même film biologique (bactéries, micro-algues benthiques, petits invertébrés, etc) que des substrats de pleine eau. Le risque de ciguatera n'est donc pas nul.

Annexe F

Régressions entre morphométrie du lagon et caractéristiques des eaux

Nous désignons par L'_{min}/A le rapport entre l'ouverture minimale et la superficie (en $m \cdot km^{-2}$) et par $L'_{min}/\Sigma L$ le rapport entre L'_{min} et le périmètre de l'atoll (exprimé en %). Parmi les caractéristiques du lagon ou des eaux, nous considérons:

T_{RAV}	temps de résidence moyen des eaux, en jours
R_{AV}	taux de renouvellement, en % par jour
$S\text{‰}$	salinité, en g par kg (en fait, "practical salinity unit")
A_{254}	concentration en matière organique dissoute
B_{tot}	concentration en chlorophylle
Y_H	taux de croissance en hauteur des huîtres ($cm \cdot yr^{-1}$)

Le lagon de Taiaro est à éliminer dans la plupart des cas. Les régressions (voir fichier NormHoa.xls) s'établissent à:

$$x = L'_{min} / A$$

		r^2
T_{RAV}	$y = 58.08 \cdot \exp(-0.0067 \cdot x)$	0.76
	$y = 2002 \cdot (x)^{-1.183}$	0.77
R_V	$y = 1.409 \cdot \exp(0.0067 \cdot x)$	0.88
	$y = 0.052 \cdot (x)^{-1.151}$	0.75
$S\text{‰}$	$y = 37.34 \cdot (x)^{-0.0052}$	0.30
A_{254}	$y = 0.702 \cdot \exp(-0.0005 \cdot x)$	0.31
	$y = 0.905 \cdot (x)^{-0.0854}$	0.31
B_{tot}	$y = 0.324 \cdot \exp(-0.001 \cdot x)$	0.28
	$y = 0.501 \cdot (x)^{-0.165}$	0.40
Y_H	$y = 2.296 \cdot (x)^{0.0885}$	0.40
	$y = 2.295 + 0.252 \cdot \ln x$	0.40

$$x = L'_{min} / \Sigma L$$

		r^2	
T_{RAV}	$y = 66.5 \cdot \exp(-0.0684 \cdot x)$	0.47	
	$y = 105.5 \cdot (x)^{-0.747}$	0.27	
R_{AV}	$y = 0.955 \cdot \exp(0.0733 \cdot x)$	0.69	
	$y = 0.71 \cdot (x)^{0.73}$	0.32	
$S\text{‰}$	$y = 37.8 \cdot (x)^{-0.0152}$	0.72	avec Taiaro
	$y = 37.86 - 0.594 \cdot \ln x$	0.72	avec Taiaro
$S\text{‰}$	$y = 37.08 \cdot (x)^{-0.007}$	0.46	sans Taiaro
	$y = 37.09 - 0.259 \cdot \ln x$	0.46	sans Taiaro
A_{254}	$y = 0.74 \cdot \exp(-0.0073 \cdot x)$	0.40	
	$y = 0.866 \cdot (x)^{-0.124}$	0.43	
B_{tot}	$y = 0.335 \cdot \exp(-0.0146 \cdot x)$	0.48	
	$y = 0.393 \cdot (x)^{-0.1804}$	0.27	
Y_H	$y = 2.626 \cdot (x)^{0.0668}$	0.35	
	$y = 2.684 + 0.186 \cdot \ln x$	0.34	

Ces équations permettent de calculer l'évolution de telle ou telle caractéristique des eaux qui résulterait d'une ouverture relative déterminée. Dans le tableau ci-après, nous avons reporté les valeurs prises par différentes caractéristiques en fonction de la largeur L'_{min} , et ce suivant les équations ci-dessus:

* les colonnes A-G pour les équations où $x = L'_{min}/L$ (en %), les colonnes H-N pour $x = L'_{min}/A$ (en m par km^2).

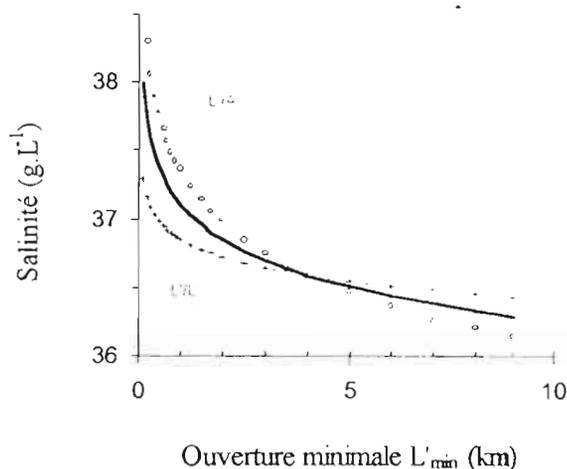
* les colonnes correspondent aux différentes caractéristiques:

A	L'_{min}/L	H	L'_{min}/A
B, I	T_{RAV}	E, L	A_{254}
C, J	R_{RAV}	F, M	chl
D, K	$S\text{‰}$	G, N	Y_H

Les deux lignes en gras donnent (en 2 exemplaires) les valeurs de chaque caractéristique pour la moyenne des lagons, et pour Takapoto. Les plages de valeurs "normales" sont ombrées. On trouve en regard, dans la première colonne, l'ouverture minimale (en km) qui donnerait cette valeur pour le lagon de Takapoto.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
L'm	moy.	50	2,58	36,4	0,65	0,28	3,09			50	2,58	36,4	0,65	0,28	3,09
km	TKP	268	0,37	38,6	1,02	0,41	2,38			268	0,37	38,6	1,02	0,41	2,38
0,1	0,2	341	0,2	38,7	1,1	0,33	2,36	1,2	1560	0,07	37,3	0,89	0,48	2,34	
0,2	0,4	203	0,37	38,3	1,0	0,33	2,48	2,5	687	0,15	37,2	0,84	0,43	2,49	
0,3	0,6	150	0,50	38,1	0,9	0,33	2,54	3,7	426	0,24	37,1	0,81	0,40	2,58	
0,4	0,8	121	0,6	37,9	0,9	0,33	2,59	4,9	303	0,33	37,0	0,79	0,38	2,64	
0,5	1,0	102	0,7	37,8	0,9	0,33	2,63	6,2	233	0,42	37,0	0,77	0,37	2,70	
0,6	1,3	89,3	0,8	37,7	0,8	0,33	2,67	7,4	187	0,52	37,0	0,76	0,36	2,74	
0,7	1,5	79,6	0,9	37,6	0,8	0,33	2,69	8,6	156	0,62	36,9	0,75	0,35	2,78	
0,8	1,7	72	1,0	37,5	0,8	0,33	2,72	9,9	133	0,73	36,9	0,74	0,34	2,81	
0,9	1,9	66	1,1	37,4	0,8	0,33	2,74	11,1	116	0,83	36,9	0,74	0,34	2,84	
1,0	2,1	61	1,2	37,4	0,8	0,32	2,76	12,3	102	0,94	36,9	0,73	0,33	2,87	
1,3	2,6	51,6	1,4	37,2	0,8	0,32	2,80	15,4	79	1,22	36,8	0,72	0,32	2,93	
1,5	3,1	45	1,6	37,1	0,8	0,32	2,83	18,5	63	1,50	36,8	0,71	0,31	2,97	
1,8	3,6	40,1	1,8	37,1	0,7	0,32	2,86	21,6	53	1,79	36,7	0,70	0,30	3,01	
2,0	4,2	36,3	2,0	37,0	0,7	0,32	2,89	24,7	45	2,09	36,7	0,69	0,29	3,05	
2,5	5,2	30,8	2,4	36,9	0,7	0,31	2,93	30,9	35	2,71	36,7	0,68	0,28	3,11	
3,0	6,3	26,8	2,7	36,8	0,7	0,31	2,97	37,0	28	3,34	36,6	0,66	0,28	3,16	
3,5	7,3	23,9	3,0	36,7	0,68	0,30	3,00	43,2	23	3,98	36,6	0,66	0,27	3,20	
4,0	8,3	21,6	3,3	36,6	0,67	0,30	3,03	49,4	20	4,65	36,6	0,65	0,26	3,24	
4,5	9,4	19,8	3,6	36,5	0,66	0,29	3,05	55,6	17	5,32	36,6	0,64	0,26	3,28	
5,0	10,4	18,3	3,9	36,5	0,65	0,29	3,07	61,7	15	6,01	36,55	0,64	0,25	3,31	
6,0	12,5	16	4,5	36,4	0,63	0,28	3,11	74,1	12	7,41	36,51	0,63	0,25	3,36	
7,0	14,6	14,3	5,0	36,3	0,62	0,27	3,14	86,4	10	8,85	36,48	0,62	0,24	3,41	
8,0	16,7	12,9	5,5	36,2	0,61	0,26	3,17	98,8	9	10,32	36,46	0,61	0,23	3,45	
9,0	18,8	11,8	6,0	36,1	0,6	0,25	3,19	100	8	11,82	36,4	0,61	0,23	3,48	

Il faut remarquer que, dans tous les cas, la modification de l'ouverture n'aurait pas un effet linéaire. En effet, les corrélations observées entre L'_{min} et les propriétés de l'eau (dans les différents lagons étudiés) correspondent à des équations non linéaires.



Evolution probable de la salinité en fonction de l'importance des travaux dans les hoa. La largeur minimale, L' , est ramenée soit à la superficie du lagon (L'/A ; +), soit à son périmètre (L'/L ; o). La courbe épaisse (moyenne géométrique) représente l'évolution la plus plausible.

Si nous admettons que les mêmes causes entraînent les mêmes effets, une modification de l'ouverture des *hoa* de Takapoto devrait avoir des effets parallèles, avec un "rendement" qui décroîtrait avec l'importance des modifications. Ainsi, la diminution de la salinité devrait être de moins en moins rapide pour une ouverture de plus en plus importante. La salinité "normale", de l'ordre de 36 ‰, n'est pratiquement pas accessible (diminution asymptotique).

Annexe G. Suivi de salinité en 2000-2001 à Takapoto

date	salinité	salinité	salinité	salinité	pluie mm	niveau cm
	océan	hoa	site 1	site 2		
02/08/00	36,307	38,292	38,305		20	54
09/08/00	36,240	38,510	38,299		0	55
16/08/00	36,206	38,546	38,378		1	50
23/08/00	36,268	38,400	38,438		27	49
13/09/00	36,030	38,677	38,516		107	99
20/09/00		38,512	38,342		119	64
27/09/00	36,108	36,981	38,433		10	61
04/10/00		38,325	38,509		1	56
11/10/00	36,078	38,168	38,304		30	63
18/10/00	36,066	38,611	38,434		0	55
25/10/00	35,988	38,640	38,522		4	50
02/11/00		38,685	38,584		31	46
08/11/00	36,072	38,641	38,589		21	42
16/11/00	36,059	38,611	38,478		105	52
22/11/00	36,050	36,984	38,524		74	48
29/11/00	35,947	38,647	38,672		13	47
06/12/00	36,167	38,563	38,655		257	44
13/12/00	35,867	38,719	38,537		268	45
20/12/00		38,122	38,279		667	67
27/12/00	35,832	38,273	38,242		248	61
03/01/01	35,472	38,260	38,110		120	58
10/01/01	35,867	38,202	38,216			
17/01/01	35,855	38,442	38,296	38,355		
24/01/01	35,828	38,480	38,280	38,337		
31/01/01		38,309	38,327	38,272		
07/02/01	36,137	37,451	38,403	38,324		
14/02/01	35,891	38,369	38,298	38,383		
21/02/01	35,867	38,401	38,319	38,367		
28/02/01		38,448	38,327	38,430		
07/03/01		38,034	38,640	38,620		
14/03/01		38,203	38,310	38,310		
21/03/01	36,066	38,449	38,427	38,616		
28/03/01	36,007	38,660	38,454	38,517		
04/04/01	36,051	37,926	38,521	38,469		
11/04/01	36,050	38,468	38,683	38,494		
18/04/01	36,001	38,398	38,433	38,406		
25/04/01	36,015	38,473	38,537	38,437		
02/05/01	36,015	38,485	38,457	38,666		
09/05/01	36,047	38,425	38,449	38,421		
16/05/01		38,457	38,469	38,568		
23/05/01		38,430	38,355	38,399		
30/05/01		38,233	38,494	38,486		
06/06/01		37,694	38,653	38,407		
13/06/01		38,359	38,490	38,486		
20/06/01		37,544	38,541	38,601		
27/06/01		38,466	38,662	38,442		
04/07/01		37,750	38,582	38,522		
11/07/01		38,577	38,613	38,601		
18/07/01		37,928	38,712	38,609		
25/07/01		38,660	38,732	38,617		
01/08/01		38,323	38,565	38,557		
08/08/01		38,541	38,618	38,617		

date	salinité océan	salinité hoa	salinité site 1	salinité site 2	pluie mm	niveau cm
29/08/01	36,125	36,817	38,785	38,853		
05/09/01	36,221	38,713	38,849	38,807		
12/09/01	36,096	38,629	38,813	38,841		
19/09/01		38,795	38,853	38,853		
26/09/01		38,793	38,893	38,929		
03/10/01		38,464	38,989	38,941		
10/10/01	36,112	38,888	38,962	38,897		
17/10/01		37,341	38,999	38,960		
24/10/01	36,006	38,757	38,825	38,871		
31/10/01		38,568	39,017	38,990		
07/11/01	35,752	38,789	38,855	38,842		



Institut de Recherche
pour le Développement

Jean PAGÈS, Vincent PRAZIL, Elzbieta LAUBE-LENFANT, Renaud FICHEZ
Facteurs physiques du milieu dans les lagons des Tuamotu

Jean PAGÈS, Vincent PRAZIL
Renouvellement des eaux du lagon de Takapoto.
Évolution à moyen terme et conséquences

Jean PAGÈS, Vincent PRAZIL,
Milieu lagonaire et croissance des huîtres perlières
Effet du renouvellement des eaux

OCÉANOGRAPHIE
Notes et Documents N° 47
2002