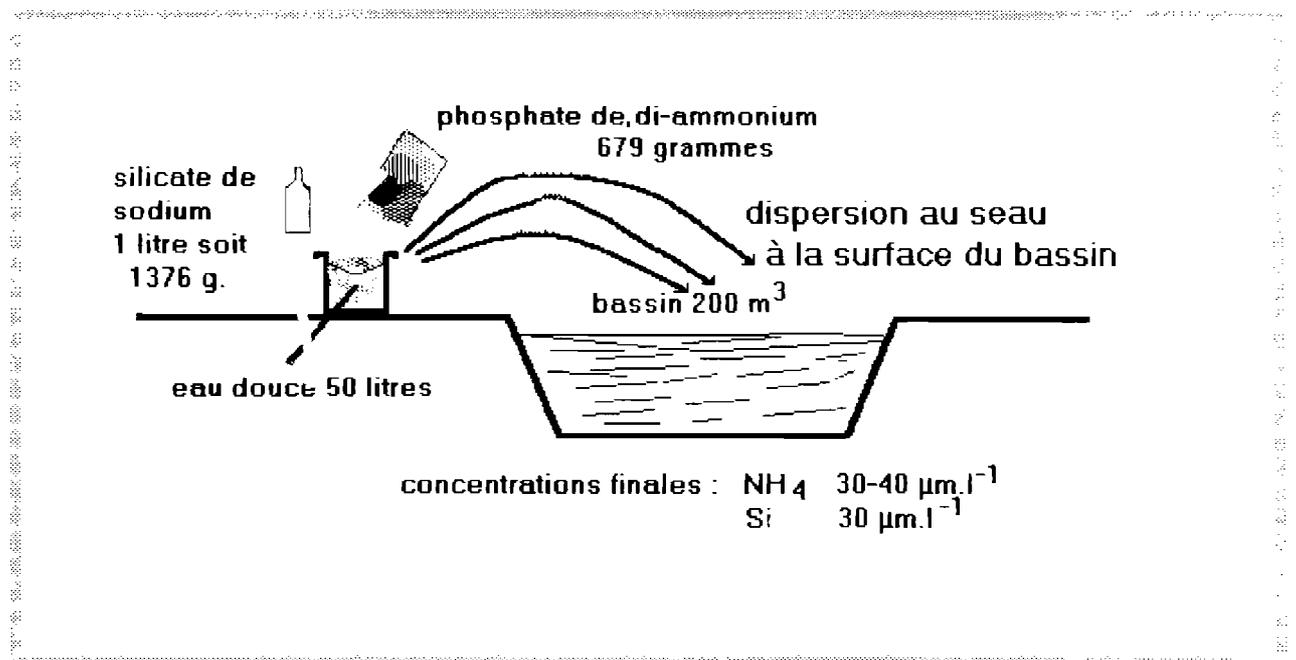


TECHNIQUES D'UTILISATION DE LA SILICE POUR LA PRODUCTION DE MASSE DES ALGUES DIATOMEES

SYNTHESE DES TRAVAUX 1989-1993

Jérôme HUSSENOT et Dominique GAUTIER



POITOU
CHARENTES

PAYS DE
LA LOIRE



INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE POUR L'EXPLOITATION DE LA MER

Adresse
Centre de Recherche en Ecologie Marine
et Aquaculture de l'Houmeau
CREMA BP 5 17137 L'HOUMEAU

DIRECTION DES RESSOURCES
VIVANTES
DEPARTEMENT DES RESSOURCES
AQUACOLES
LABORATOIRE CREMA L'HOUMEAU (CNRS-IFREMER)

AUTEUR (S) Jérôme HUSSENOT & Dominique GAUTIER		CODE : RI. DRV 94.03
TITRE Technique d'utilisation de la silice pour la production de masse des algues diatomées (synthèse des travaux 1989-1993)		Date : novembre 1993 Tirage en nombre : 80
		Nb pages : 25 Nb figures : 5 Nb photos : 0
CONTRAT Région Pays de La Loire Région Poitou-Charentes Année 1993.	La région POITOU-CHARENTES a contribue également à cette étude en la personne de D. Gautier, recrutée comme CCD dans le cadre d'une collaboration de recherche avec l'Andalousie	DIFFUSION libre <input type="checkbox"/> restreinte <input checked="" type="checkbox"/> confidentielle <input type="checkbox"/>

RESUME	
<p>Le document résume les différentes expérimentations menées au CREMA en laboratoire ou sur le terrain pour améliorer la dissolution du silicate de sodium dans l'eau de mer. Le silicium est indispensable à la culture des diatomées. Dans la préparation d'un milieu de culture cet élément est le plus coûteux parmi les différents fertilisants employés; il doit donc être utilisé avec le maximum d'efficacité. Les effets de l'agitation et de la prédilution avec un volume d'eau douce ont été testés. Les deux formes commerciales de silicate de sodium, la forme solide et la forme liquide ont été comparées. Des fiches pratiques sont proposées pour utiliser, dans le domaine de l'aquaculture marine, le mieux possible ces deux produits.</p>	
ABSTRACT	
<p>This report reviews CREMA experiments carried out in laboratory and in the field to improve sodium silicate dissolving in seawater. Silicon is an essential component in diatoms culture. Moreover, this element is one of the most expensive fertilizer used to develop a culture medium. Therefore, commercial silicate must be used with a maximum efficiency. Stirring effects and first dilution in freshwater were tested. The efficacy of various liquid and solid commercial products was compared. Technical data sheets are included to describe optimal techniques to dissolve silicate sodium products in large volume of seawater.</p>	
mots-clés :	silicium, silicate de sodium, fertilisation, culture de diatomées, aquaculture marine
key words :	silicium, sodium silicate, fertilization, diatoms culture, mariculture



SOMMAIRE

TECHNIQUES D'UTILISATION DE LA SILICE POUR LA PRODUCTION DE MASSE DES ALGUES DIATOMEES

(SYNTHESE DES TRAVAUX 1989-1993)

INTRODUCTION.....	p. 5
I. LES BESOINS POUR LA CULTURE DES DIATOMEES MARINES ET L'ETAT DES CONNAISSANCES.....	p. 6
II. LES RECHERCHES ENGAGEES POUR FACILITER LA DISSOLUTION DE LA SILICE EN EAU DE MER.....	p. 7
Prédiluer en eau douce le gel commercial de silice liquide Agiter pour économiser la quantité d'eau douce nécessaire Utiliser un silicate solide plus pratique à manipuler	
III. LA MISE EN PRATIQUE D'UN APPORT DE SILICE DANS UNE FERTILISATION DE BASSIN AQUACOLE.....	p. 8
Exemple 1 : bassin à fond plastifié de 200 m ³ pour une production de masse de <i>Skeletonema costatum</i> en culture séquentielle Exemple 2: marais naturel à fond de terre de 1000 m ³ pour un enrichissement en silice pouvant favoriser les diatomées	
IV. CONCLUSION.....	p. 10
V. REFERENCES.....	p. 11

VI. ANNEXES.....	p. 13
A. COMPTES RENDUS DES EXPERIENCES	
A1. EXPERIENCE 1 : EFFET DE LA PREDILUTION DU GEL DE SILICE DANS L'EAU DOUCE SUR LA DISSOLUTION DE LA SILICE EN EAU DE MER.....	p. 14
A2. EXPERIENCE 2 : EFFET DE L'AGITATION ET DE L'AERATION SUR LA DISSOLUTION DU SILICATE DE SOUDE LIQUIDE EN BACS D'EAU DE MER DE 300 LITRES.....	p. 16
A3. EXPERIENCE 3 : ESSAI DE DISSOLUTION DU GEL DE SILICE PAR AGITATION MECANIQUE (TRANSFERT D'ECHELLE : BASSIN DE 200 M3).....	p. 18
A4. EXPERIENCE 4 : DISSOLUTION DU METASILICATE DE SOUDE SOLIDE : EFFET DE LA PREDILUTION EN EAU DOUCE.....	p. 21
B. FICHES PRATIQUES	
FICHE PRATIQUE POUR STIMULATION S-1. SILICATE DE SODIUM EN SOLUTION AQUEUSE (GEL DE SILICE).....	p. 24
FICHE PRATIQUE POUR STIMULATION S-2. METASILICATE DE SODIUM SOLIDE.....	p. 25
VII. GLOSSAIRE.....	au dos de la couverture

REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être mené grâce à la participation de nos collègues Marcel Guillaut, Lucette Joissard, Catherine Legrand, Françoise Mornet, Anna-Maria Spanò et d'étudiants en stage, qui n'ont pas ménagé leurs efforts pour nous épauler. Nous les remercions sincèrement.

Les mots pouvant présenter une difficulté de compréhension sont écrits, lors de leur première apparition dans le texte en **caractères spéciaux**. Ils sont expliqués dans un glossaire situé au dos de la couverture.

INTRODUCTION

Les éléments essentiels à la synthèse du phytoplancton marin sont l'azote **N** (azote ammoniacal, nitrites, nitrates), le phosphore **P** (phosphates) et le silicium **Si** (silicates SiO_4^{2-}). Ces éléments minéraux sont appelés les **nutriments**. Le rapport des nutriments (N : P : Si) peut influencer la composition phytoplanctonique (Officer & Ryther, 1980) en ce qui concerne la dominance d'une des deux grandes catégories de microalgues, à savoir les **diatomées** et les **flagellés**. Des chercheurs norvégiens (Egge & Aksnes, 1992) ont démontré dans des expérimentations en **mésocosmes**, que la concentration de silicate jouait un rôle régulateur dans la compétition des peuplements phytoplanctoniques, en favorisant les diatomées tant que la concentration en silicate dépassait $2 \mu\text{M}$ (lire: micromoles par litre). En effet la silice est nécessaire à la construction de l'enveloppe siliceuse (le frustule), particulière à ce groupe de microalgues. Les diatomées ont une vitesse de croissance très rapide et sont généralement une source de nourriture de qualité pour les animaux filtreurs, alors que ceci n'est pas toujours le cas pour les flagellés (Officer & Ryther, 1980 ; Rodhouse et al., 1983). En aquaculture de mollusques filtreurs (e.g., huîtres, palourdes), les diatomées sont souvent cultivées pour nourrir les larves et les juvéniles. Pour ce qui nous concerne, à savoir les productions de masse en grands volumes, *Skeletonema costatum* est une diatomée particulièrement intéressante, par sa vitesse de croissance et sa dominance sur les autres espèces de diatomées, durant la plus grande partie de l'année, sous réserve de certaines conditions hydrologiques, (Roden & O'Mahony, 1984). Elle est présente sur les côtes européennes de l'Atlantique, et, pour les besoins de la conchyliculture, des cultures en grands volumes ont déjà été développées en France sur eau de forage en Pays de La Loire (Baud & Bacher, 1990), et expérimentées sur eau de mer enrichie en Poitou-Charentes (Gautier, 1993 ; Gautier et al., 1993a). Toutes ces cultures sont de type discontinu (**culture séquentielle** sur 3 à 5 jours), avec utilisation des cellules lorsque l'on approche de la phase stationnaire de croissance. Une partie de la culture sert alors à ensemercer un nouveau cycle dans un nouveau bassin nettoyé et enrichi. Sur cette même espèce, des expérimentations ont débuté, en 1993, au CREMA, pour mettre en place une **culture semi-continue**, où la production quotidienne de cellules sera exportée et remplacée par de l'eau de mer, enrichie des 3 nutriments essentiels.

Il est donc important pour ces cultures de diatomées de distribuer efficacement ces 3 éléments. S'il n'y a pas de problèmes particuliers pour l'azote et le phosphore, en revanche l'élément silicium, qui existe sous forme de 2 produits chimiques pour l'industrie : le **silicate de soude liquide** (dit aussi "gel de silice") et le **métasilicate de soude solide** en fins cristaux (cf fiches pratiques en annexe) présente une plus ou moins bonne solubilité dans l'eau de mer, selon les conditions de salinité, de pH et d'agitation de l'eau. D'autre part, ce composé est celui pour lequel le coût est le plus élevé, parmi les 3 nutriments essentiels. Nous avons donc cherché à optimiser l'utilisation des produits commerciaux par des choix d'utilisation et des techniques de dissolution adaptés.

I. LES BESOINS POUR LA CULTURE DES DIATOMÉES MARINES ET L'ÉTAT DES CONNAISSANCES

Il est avantageux de cultiver une diatomée en chaîne comme l'espèce *Skeletonema costatum*. Sa qualité nutritive est bonne pour le grossissement des filtreurs, c'est une espèce bien connue et souvent déjà employée (De Pauw et al., 1983,1984 ; Chrétiennot-Dinet et al., 1986 ; Baud & Bacher, 1990). C'est l'algue fourrage par excellence dans nos milieux. En effet sa vitesse de croissance est supérieure aux autres espèces, ce qui lui permet de dominer, notamment dans des systèmes à renouvellement d'eau importants (Roden & O'Mahony, 1984). Cette caractéristique donne l'avantage à *S. costatum* dans une culture extérieure en grands volumes où l'eau de mer de renouvellement n'est pas filtrée à une maille suffisante pour éliminer les espèces concurrentes.

Pour évaluer le besoin en nutriments de *S. costatum*, et en particulier le **rapport molaire** d'assimilation N/P/Si, la consommation des nutriments en fonction du nombre de cellules produites a été apprécié en cultures extérieures; le rapport N/P/Si est proche de 10/1/4 (Froissard, 1993). Un rapport N/Si de 1, préconisé par Redfield et al. (1963) pour les diatomées semble excessif, et il apparaît suffisant de se situer à 2-2,5. Mais pour obtenir un rapport déterminé d'azote, de phosphore et de silicium solubilisé dans la colonne d'eau, il faut connaître les capacités de dissolution des produits employés. Peu de problèmes se posent pour les deux premiers nutriments, bien que la dissolution des granules d'engrais ne soit pas tout à fait identique dans l'eau douce et dans l'eau de mer (attention, le taux d'azote ou de phosphore indiqué sur un sac correspond à la dissolution dans l'eau douce). Pour le silicate de sodium, il existe en plus une véritable précipitation colloïdale dans l'eau de mer uniquement, qui est évitée en laboratoire, lors de la préparation des milieux de culture de phytoplancton, en agitant très fortement lors de l'apport de silicate. Voilà pourquoi il nous a été nécessaire, avant même toute expérimentation de culture d'algues, de préciser le taux de dissolution effectif du silicate de sodium selon différentes procédures. Au début de nos travaux sur ce sujet, nous avons interrogé des scientifiques utilisateurs, et notamment le Dr Doering de l'Université de Rhode Island (USA) qui a utilisé lors d'expérimentations en mesocosmes (Doering et al., 1989), un

silicate solide à 9 molécules d'eau. Il nous a alors précisé que la prédilution dans l'eau douce et l'agitation lui permettaient d'éviter la formation d'un précipité. Au pH habituel de l'eau de mer (i.e., 8,2), le silicium dissous se trouve à 95% sous la forme d'acide orthosilicique, Si(OH)_4 , et 5% sous forme ionisée SiO(OH)_3^- (Ivanoff, 1972). La teneur en silicate réactif est effectuée par une mesure colorimétrique simple par réaction avec le molybdate d'ammonium et par mesure du complexe bleu formé à 660nm (Aminot & Chaussepied, 1983).

II. LES RECHERCHES ENGAGEES POUR FACILITER LA DISSOLUTION DE LA SILICE EN EAU DE MER

De 1989 à 1993, il a été effectué au CREMA un certain nombre d'expériences qui permettent de préciser les conditions optimales pour dissoudre le silicate de sodium. Jusqu'en 1992 seul le produit liquide a été utilisé (cf fiche pratique S1) ; ensuite il est apparu qu'un métasilicate de sodium cristallisé (à 5 molécules d'eau, cf fiche pratique S2) existait en conditionnement industriel. Bien que sous forme solide, sa dissolution en eau brassée était très satisfaisante (Gautier et al., 1993a).

Prédiluer dans l'eau douce le gel commercial de silice liquide.

Il a été tout d'abord déterminé en laboratoire, les effets d'une prédilution dans de l'eau douce du gel de silice commercial. Le travail (annexe A1) a montré que si le gel est directement versé dans l'eau de mer, moins de 30% est solubilisé même avec agitation forte. Le rapport de dilution (volume de silicate à volume d'eau douce) doit être de 1/50 pour dépasser 80% de solubilisation du composé distribué. Nous l'avons nous-mêmes appliqué lors d'expérimentations en mésocosmes naturels effectuées de 1990 à 1992 (Legrand et al., 1991 ; Hussenot et al., 1992 ; Gautier et al., 1993b). Pour des bassins de 200m³, il faut 50 litres d'eau douce pour apporter 30 μM de Si dans l'eau. Mais cela est difficilement compatible avec la fertilisation de grands bassins.

En pratique, on utilisera donc une prédilution du gel de 1/10 qui ne nécessite que 10 litres d'eau douce pour un bassin de 200 m³ et permet d'obtenir tout de même près de 80 % de dissolution de la silice.

Agiter pour économiser la quantité d'eau douce nécessaire

Des études sur l'effet de l'agitation (cf annexes A2 et A3) ont montré que ce volume d'eau douce pouvait être considérablement diminué en injectant la solution (gel de silice + eau douce) dans le sillage d'un agitateur à turbine. Une agitation forte localisée dans un coin du bassin est suffisante ; les aérateurs aquacoles AIRE-O2 conviennent parfaitement. Le volume d'eau douce peut alors être réduit d'un facteur 10. Pour de grands bassins à fond de terre, de plusieurs milliers de mètres cube, cette solution semble la plus pratique et la plus efficace. Le taux de dissolution obtenu est de plus de 80 %.

Utiliser un silicate solide plus pratique à manipuler, (applicable à des bassins en dur, sans sédiment)

Des observations, en bassin de 200 m³ et en laboratoire, (Gautier et al., 1993a) ont permis de vérifier qu'un produit solide pouvait aussi être utilisé pur dans un bassin à fond inerte. La dissolution plus lente, peut s'étaler sur plusieurs jours si le mouvement de l'eau est faible, mais atteint 80 % en 24 h. Cela ne posera pas de problème pour des bassins à parois plastifiées. Par contre, ce produit n'a pas été utilisé jusqu'à présent pour des bassins de terre, par crainte des interactions avec le sédiment. Il faudrait essayer de situer l'engrais sur un support en subsurface ou sur un plateau subflottant ; mais la poudre de métasilicate risque par contre de se solidifier en bloc, ce qui pourrait ralentir considérablement sa dissolution. Nous déconseillons donc son utilisation pour des bassins de terre, mais la recommandons absolument pour des bassins plastifiés. Son utilisation sous forme solubilisée, par dilution dans de l'eau douce, est probablement une possibilité d'emploi pour les bassins de terre. Malgré tout, nous préférons utiliser dans ce cas le gel de silice, plus facile à diluer dans l'eau douce, et d'un coût inférieur.

III. LA MISE EN PRATIQUE D'UN APPORT DE SILICE DANS UNE FERTILISATION DE BASSIN AQUACOLE.

Deux exemples-type de fertilisation sont expliqués dans ce chapitre :

- Le premier concerne un bassin à fond plastifié de 200 m³ pour une production de masse de *Skeletonema costatum* en culture séquentielle, comme peut la pratiquer dorénavant l'écloserie IFREMER de Ronce-les-Bains.

- Le deuxième concerne un marais naturel à fond de terre de 1000 m³, que l'on désirerait enrichir en silice pour tenter de favoriser la multiplication des diatomées indigènes.

exemple 1 : bassin à fond plastifié de 200 m³ pour une production de masse de *Skeletonema costatum* en culture séquentielle

Le choix du fertilisant-silicium pour cet objectif est le métasilicate de sodium solide (fiche pratique S2).

Il est très facile à utiliser puisque 80% des silicates sont solubilisés par simple épandage des cristaux ;

Il est peu important que la dissolution se fasse totalement et immédiatement ; une partie peut se dissoudre seulement au bout de 24 heures sans inconvénient, puisque les apports d'engrais ne se font que tous les 2 ou 3 jours.

Le bassin faisant 200 m³, il n'est pas indispensable d'agiter en permanence la culture, mais par contre il est indispensable d'apporter le silicate au moment du remplissage pour profiter du brassage important due au refoulement de la pompe d'alimentation en eau de mer. Dans des bassins plus

petits (e.g., 20m³), une agitation permanente de la culture est nécessaire. Elle peut s'effectuer par un bullage approprié qui va favoriser la remise en suspension des cellules de phytoplancton, et la dissolution des cristaux de silicate qui seraient encore présents à la fin du remplissage.

Procédure de fertilisation

1. évaluer le volume du bassin en mètres cube, à son niveau d'utilisation : **V**
2. calculer la quantité de silicate à apporter par mètre cube :
$$S = \text{concentration en Si souhaitée } (\mu\text{M}) \times 28,1 \div 0,1325$$
3. regarder dans la fiche pratique le taux de dissolution du produit pour les conditions d'utilisation [ici $t_d = 0,8$]
4. calculer la quantité totale à épandre : $(V \times S) \times (1+t_d)$ [ici $1+t_d = 1,25$]
5. distribuer à la volée le produit pesé dans la zone de plus forte agitation, durant le remplissage.

exemple 2: marais naturel à fond de terre de 1000 m³ pour un enrichissement en silice pouvant favoriser les diatomées

Le choix du fertilisant-silicium pour cet objectif est le silicate de soude en solution (fiche pratique S1).

Il est épandu comme nous l'avons fait dans l'expérimentation en grands volumes (cf manip 3).

Il est très important que la dissolution se fasse immédiatement en totalité, car nous avons vu que le précipité formé ne se dissout pratiquement pas par la suite. Les tout premiers essais d'épandage du gel de silice pur, par projection manuelle, n'avaient donné aucun enrichissement; et un précipité blanchâtre était très visible.

Un aérateur à hélice oblique est disposé dans le bassin de 1000 m³, du côté du bassin d'où provient le vent dominant, de préférence fixé à un ponton pour permettre l'accès et le support de la solution diluée de silicate. Un tube d'injection permet de verser le liquide juste au niveau de l'hélice.

Procédure de fertilisation

1. évaluer le volume du bassin en mètres cube, à son niveau d'utilisation : **V**
2. calculer la quantité de gel de silice à apporter par mètre cube :
$$S = \text{concentration en Si souhaitée } (\mu\text{M}) \times 28,1 \div 0,129$$
3. regarder dans la fiche pratique le taux de dissolution du produit pour les conditions d'utilisation [ici $t_d = 0,8$]
4. calculer la quantité totale à épandre : $(V \times S) \times (1+t_d)$ [ici $1+t_d = 1,25$]

5. mettre en route l'aérateur et la petite pompe immergée permettant d'injecter le liquide.

IV. CONCLUSION

Malgré la précipitation du silicate de soude dans l'eau de mer, différents moyens simples de dissolution des produits commerciaux ont été mis au point. Les solutions les plus intéressantes sont données pour des bassins artificiels de moyens volumes et pour des bassins de terre de grandes dimensions.

La solubilisation du produit solide et du produit liquide est généralement, de 80 % dans nos expériences. Dans cette hypothèse, le coût d'un apport de 30 μM de silice dans un bassin de 200 m³ est de 4,60 F avec le gel de silice prédilué, et de 6,40 F avec le métasilicate solide pur. Il paraît néanmoins possible d'améliorer encore les rendements par des moyens plus efficaces de brassage de l'eau :

- dans le cas d'un grand bassin à fond inerte (200 m³ et plus), le remou de l'eau de remplissage, dans le cas d'un pompage, peut suffire. On aura par contre intérêt à installer un bullage permanent dans un bassin plus petit.

- dans le cas de grands bassins naturels, l'emploi d'un aérateur type AIRE-O₂, le temps de l'injection, paraît la technique la plus efficace.

Les fertilisations par la silice trouvent aujourd'hui différentes applications en aquaculture.

Tout d'abord, la silice apportée conjointement avec des nutriments azotés et phosphorés, permet la production en masse de diatomées. Ce type de culture peut être réalisé en bassins artificiels de 20 à 200 m³. La technique est aujourd'hui appliquée à la production de *Skeletonema costatum* utilisée comme algue-fourrage par les écloséries-nurseries de bivalves. La description de ce type de culture fera l'objet d'un prochain document technique du CREMA.

Une application à l'enrichissement des claires ostréicoles pourrait être envisagée dans les années à venir ; des essais à l'échelle pilote sont prévues en 1994 au CREMA, pour faire suite à des expérimentations fines sur les mécanismes, qui ont permis de définir les normes de renouvellement d'eau et d'apports en sels nutritifs. Ce système nécessite une restructuration des bassins et des réseaux pour individualiser les bassins de phytoplancton, des claires contenant les huîtres à affiner. Un hectare de claires demanderait approximativement un volume de 1 200 m³ de culture d'algue et une circulation quotidienne de 600 m³ d'eau par jour.

D'autres types d'aquaculture pourraient utiliser la fertilisation en silice, notamment les élevages intensifs qui produisent de l'azote et du phosphore minéral en quantité. Le rééquilibrage du rapport N/P/Si est intéressant à envisager dans les élevages associés en cascade. Le bassin intensif (e.g., poisson, crevette) fonctionnerait comme un bioréacteur à phytoplancton pour un élevage secondaire

de mollusques filtreurs. La gestion des bassins intensifs primaires pourrait être améliorée par le bloom des diatomées, favorisé par l'ajout de silicium aux productions azotées et phosphorées.

V. REFERENCES

- Aminot A., & Chaussepied M., 1983. Manuel des analyses chimiques en milieu marin. Cnexo, Brest, 395pp.
- Baud J.P. & Bacher C., 1990. Use of a saline ground water for intensive rearing of *Ruditapes philippinarum* juveniles in a nursery system. *Aquaculture*, 88:157-178.
- Chrétiennot-Dinet M.J., Robert J.M., Hiss E., 1986. Utilisation des "algues-fourrage" en aquaculture. *Année Biologique*, 25(2):97-119.
- De Pauw N., Verboven J., Claus C., 1983. Large-scale microalgae production for nursery rearing of marine bivalves. *Aquacultural Engineering*, 2:27-47.
- De Pauw, N., Morales J., Persoone G., 1984. Mass culture of microalgae in aquaculture systems: progress and constraints. *Hydrobiologia*, 116/117:121-134.
- Doering P.H., Oviatt C.A., Beatty L.L., Banzon V.F., Rice R., Kelly S.P., Sullivan B.K., Frithsen J.B., 1989. Structure and function in a model coastal ecosystem: silicon, the benthos and eutrophication. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 52:287-299.
- Egge J.K. & Aksnes D.L., 1992. Silicate as regulating in phytoplankton competition. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 83:281-289.
- Froissard S., 1993. Production intensive de la diatomée marine : *Skeletonema costatum* en cultures semi-continues monospécifiques en milieu extérieur. Application de la production phytoplanktonique à l'affinage automnal de *Crassostrea gigas*. Rapport de stage. Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes, CREMA L'Houmeau, 46pp.
- Gautier D., 1993. Mass production of microalgae by mineral fertilization in marine ponds of the French Atlantic coast: a state of the art. Séminaire sudeuropéen "Aquaculture et zones humides littorales", Lisbonne, 5-6 juillet 1993. (communication écrite)
- Gautier D., Ledu C., Hussenot J., Gerard A., 1993a. Production en masse de *Skeletonema costatum* en bassins extérieurs par fertilisation minérale : étude d'un cycle estival. Rapports Internes IFREMER de la DRV.93-033 RA-L'Houmeau/La Tremblade, 35pp.
- Gautier D., Blanchard G., Hussenot J., Rincé Y., Bertrand F., Joassard L., Mornet F., 1993b. Mass production of natural phytoplankton in nutrient enriched ponds: effect of mixing by aeration. World Aquaculture '93, From discovery to commercialization, abstract of contributions EAS Special Publication 19:3.
- Hussenot J., Castel J., Fardeau J.C., Feuillet-Girard M., Gautier D., Legrand C., Martin J.L., Pirastru L., Ravail B., Rincé Y., Sautour B., 1992. Stimulation de la productivité naturelle par enrichissements minéraux et organiques : étude en mésocosmes naturels. Rapports internes de

la Direction des Ressources Vivantes de l'IFREMER DRV.92-15-RA/CREMA-L'HOUMEAU, 97 pp.

- Ivanoff A., 1972. Introduction à l'océanographie. Propriétés physiques et chimiques des eaux de mer. Tome I, Vuibert Publ., Paris. 208 pp.
- Legrand C., J. Hussenot, Y. Rincé, L. Joassard, F. Mornet, L. Pirastru, 1991. Mass production of microalgae in salt pond (L'Houmeau-France) with farm fertilizer (di-ammonium phosphate) in addition with silicon. E.A.S. Special Publication: Aquaculture and the environment, 14:187-188
- Officer C.B. & Ryther J.H., 1980. The possible importance of silicon in marine eutrophication. Mar. Ecol. Prog. Ser., 3:83-91.
- Redfield A.C., Ketchum B.H., Richards F., 1963. The influence of organisms on the composition of seawater. In: Hill M.N. (ed.) The sea, Vol II. John Wiley, New York, p. 26-77.
- Rhodhouse P.G., Roden C., Somerville-Jachlin M.E., 1983. Nutritional value of microalgal mass cultures to the oyster *Ostrea edulis* L. Aquaculture, 32:11-18.
- Roden C.M. & O'Mahony K.W., 1984. Competition as a mechanism of adaptation to environmental stress in outdoor cultures of marine diatoms. Mar. Ecol. Prog. Ser., 16:219-227.

ANNEXES

A. COMPTES RENDUS DES EXPERIENCES

A1 EXPERIENCE 1 : EFFET DE LA PREDILUTION DU GEL DE SILICE EN EAU DOUCE SUR LA DISSOLUTION DE LA SILICE EN EAU DE MER

A2 EXPERIENCE 2 : EFFET DE L'AGITATION ET DE L'AERATION SUR LA DISSOLUTION DU SILICATE DE SOUDE LIQUIDE EN BACS D'EAU DE MER DE 300 LITRES.

A3 EXPERIENCE 3 : ESSAI DE DISSOLUTION DU GEL DE SILICE PAR AGITATION MECANIQUE (TRANSFERT D'ECHELLE : BASSIN DE 200M3).

A4 EXPERIENCE 4 : DISSOLUTION DU METASILICATE DE SOUDE SOLIDE : EFFET DE LA PREDILUTION EN EAU DOUCE.

COMPTE-RENDU D'EXPERIENCE SUR LA DISSOLUTION DE LA SILICE

EXPERIENCE 1 : EFFET DE LA PREDILUTION DU GEL DE SILICE EN EAU DOUCE SUR LA DISSOLUTION DE LA SILICE EN EAU DE MER.

Participants : C. Legrand, L. Joassard et F. Mornet.

Date : novembre 1989.

1. Objectif

Tester différents taux de prédilution du gel de silice en eau douce pour ensuite faciliter la dissolution de la silice dans l'eau de mer. Le meilleur compromis entre efficacité et possibilité de manipuler des volumes d'eau douce sur le terrain est recherché.

2. Conditions d'expérience

2.1. Apport en silice

produit : silicate de soude liquide (densité: 1,37 ; teneur en dioxyde de silicium SiO_2 : 27%).

solutions mères : produit pur, dilutions au $1/10^e$, $1/50^e$, $1/100^e$, $1/200^e$, $1/500^e$ et $1/1000^e$ dans de l'eau distillée.

taux dilution du gel en eau douce	volume de la solution apporté (μl)	Vsolution/ Veau de mer	concentration finale théorique (μM)
0	4,89	1/20450	29,56
1/10	49	1/2041	30,14
1/50	244	1/410	30,14
1/100	488	1/205	30,3
1/200	1000	1/100	30,93
1/500	2440	1/41	30,34
1/1000	4880	1/20	30,26

2.2. Conditions expérimentales

lieu : laboratoire
volumes récepteurs : Erlen-Meyers de 1 litre
température : 20°C
salinité : 36 g.kg^{-1}
pH : 8,2
lumière : naturelle

agitation : mécanique par barreau magnétique

filtration de l'eau de mer : Whatman GF-F

chlorophylle *a.* : 0 µg/l

analyses : des prélèvements ont été filtrés sur Whatman GF-F environ 1 heure après l'injection de la solution mère, puis les échantillons ont été conservés au réfrigérateur avant l'analyse à l'autoanalyseur Skalar.

3. Résultats

Une précipitation importante apparaît avec l'utilisation du gel pur, mais décroît en fonction du taux de prédilution jusqu'à disparaître à partir de 1/200.

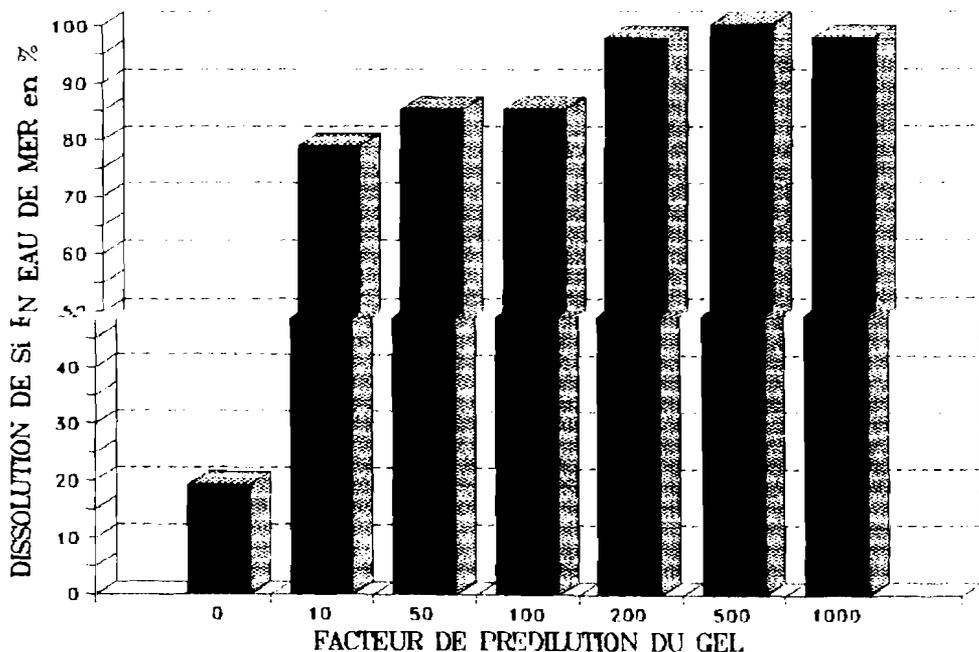


Figure 1 : taux de dissolution immédiate (après 1 heure) de la silice dans l'eau de mer en fonction du taux de prédilution de la solution mère.

Le résultat confirme la très faible solubilité du gel pur dans l'eau de mer (à peine 20%). Nous observons l'efficacité de la prédilution du gel de silice. Toutefois, la dissolution totale de la silice dans l'eau de mer demande une prédilution dans l'eau douce au 1/200^e au moins. Les prédilutions au 1/10^e, 1/50^e et 1/100^e donnent des résultats comparables (79 à 85% de dissolution).

4. Conclusion

L'expérience confirme qu'il est indispensable de prédiluer le gel de silice dans l'eau douce avant de fertiliser un bassin d'eau de mer. Pour obtenir une dissolution totale de la silice, une prédilution au 1/200^e est nécessaire. Pour un apport de 30 µM de silice dans un bassin de 200 m³, cela représente 200 litres d'eau douce. En pratique, il nous paraît plus opportun d'utiliser une prédilution au 1/10^e nécessitant 10 litres d'eau douce. On considèrera dans ce cas un taux de dissolution de la silice de 80% environ.

COMPTE-RENDU D'EXPERIENCE SUR LA DISSOLUTION DE LA SILICE

EXPERIENCE 2 : EFFET DE L'AGITATION ET DE L'AERATION SUR LA DISSOLUTION DU SILICATE DE SOUDE LIQUIDE EN BACS D'EAU DE MER DE 300 LITRES.

Participants : J. Hussenot, C. Legrand, L. Joassard, M. Guillaut et F. Mornet.

Date : 29 mars 1990.

1. Objectif

Après avoir défini le taux de prédilution du gel de silice en eau douce, on a cherché à améliorer la dissolution de la silice dans l'eau de mer par agitation mécanique ou bullage.

2. Conditions d'expérience

2.1. Apport en silice

produit : silicate de soude liquide (densité: 1,37; teneur en dioxyde de silicium SiO₂: 27%).

solutions mères : dilutions au 1/10^e et au 1/50^e dans de l'eau déminéralisée.

taux dilution du gel en eau douce	volume de la solution apporté (ml)	Vsolution/ Veau de mer	concentration finale théorique (µM)
1/10	14,7	1/20408	30
1/50	73,2	1/4098	30

2.2. Conditions expérimentales

lieu : hall d'aquaculture
volumes récepteurs : bacs de résine de 300 litres
température : 10-11°C
salinité : 34 g.kg⁻¹
pH : 8-8,1
lumière : naturelle atténuée
agitation : mécanique par hélice montée sur moteur électrique, et par bullage d'air
filtration de l'eau de mer : non
chlorophylle a : 1-2µg/l

analyses : des prélèvements ont été filtrés sur Whatman GF/C avant l'injection de la solution mère, puis après 3, 10, 15, 30 minutes, 1, 2, 3 et 24 heures. Les échantillons ont été ensuite conservés au réfrigérateur avant l'analyse à l'autoanalyseur Skalar.

3. Résultats

Tableau 1 : taux de dissolution immédiate (après 1 heure) et après 24 heures (considéré comme le temps utile dans le cadre d'une culture semi-continue de phytoplancton) de la silice en eau de mer (en % de l'apport théorique).

	sans agitation		bullage		hélice
	-----		-----		-----
	1/10 ^c 1/50 ^e		1/10 ^c 1/50 ^e		1/10 ^c 1/50 ^e
	-----		-----		-----
après 1h	29 #		63 75		82 86
après 24h	35 #		71 78		80 75
précipitation	***		*** *		* *

résultats erronés, *** importante, * faible

Sans agitation, la dissolution de la silice en eau de mer s'avère très faible, autour de 30%. Avec l'utilisation d'un système d'agitation, on obtient un taux de dissolution de la silice comparable aux résultats obtenus en petits volumes, soit autour de 80%. L'agitation mécanique apparaît un peu plus efficace que le bullage, avec un taux de dissolution supérieur de 5 à 10%.

4. Conclusion

L'expérience montre l'intérêt d'agiter le milieu pour faciliter la dissolution de la silice en eau de mer. Un système de bullage peut être appliqué en bassins de culture de 200 m³. On considèrera dans ce cas un taux de dissolution de la silice de 75% environ. La technique pourrait sans doute être améliorée en développant un système d'agitation mécanique temporaire à utiliser au moment de l'épandage des fertilisants.

COMPTE-RENDU D'EXPERIENCE SUR LA DISSOLUTION DE LA SILICE

EXPERIENCE 3 : ESSAI DE DISSOLUTION DU GEL DE SILICE PAR AGITATION MECANIQUE (TRANSFERT D'ECHELLE : BASSIN DE 200M3).

Participants : J. Hussenot, M. Guillaut, F. Mornet, A.M. Spanó

Date : 24 octobre 1991

1.Objectif

Rechercher une technique de terrain de solubilisation de la silice liquide pour de grands volumes, réduisant les quantités d'eau douce à apporter dans la phase de pré-dissolution.

2.Conditions d'expérience

2.1 Apport en silice

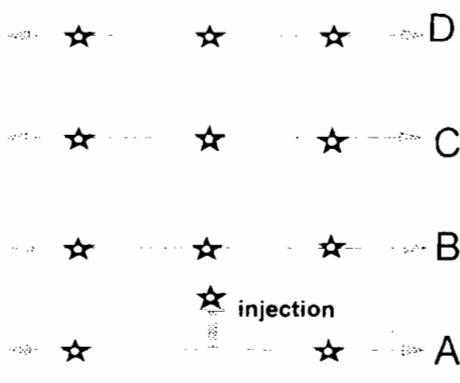
produit : silicate de soude liquide densité 1,37 contient 27% de SiO₂
solution mère : dilution 1/5^e (1l de silicate + 4l d'eau douce)
débit d'injection : 3 litres/min. avec une pompe caravane immergeable

Un système d'injection de la solution mère dans le sillage d'un aérateur à turbine (type AIRE-O2 modèle 2Cv) a été fabriqué pour cet essai.

2.2 Conditions expérimentales

lieu : bassin P8 du CREMA
volume récepteur (V_R) : 200m³
température : 10,4°C-11,0°C
salinité : 31,5 g.kg⁻¹
pH : 8,3-8,4
lumière : naturelle
volume du silicate pur : 1 litre
volume d'eau douce : 4 litres
volume du fertilisant prédilué (V_p) : 5 litres
rapport V_p / V_R : 1/40.000
concentration théorique finale : +30µM
agitation : durant 5 minutes dont 1'40 pour l'injection de la silice
filtration de l'eau de mer : non
analyses des silicates : filtration et autoanalyseur Skalar

Un état des concentrations de silicate et du pH a été fait avant et après l'essai de dissolution sur 24 stations (4 radiales et 2 profondeurs) selon la figure 1.



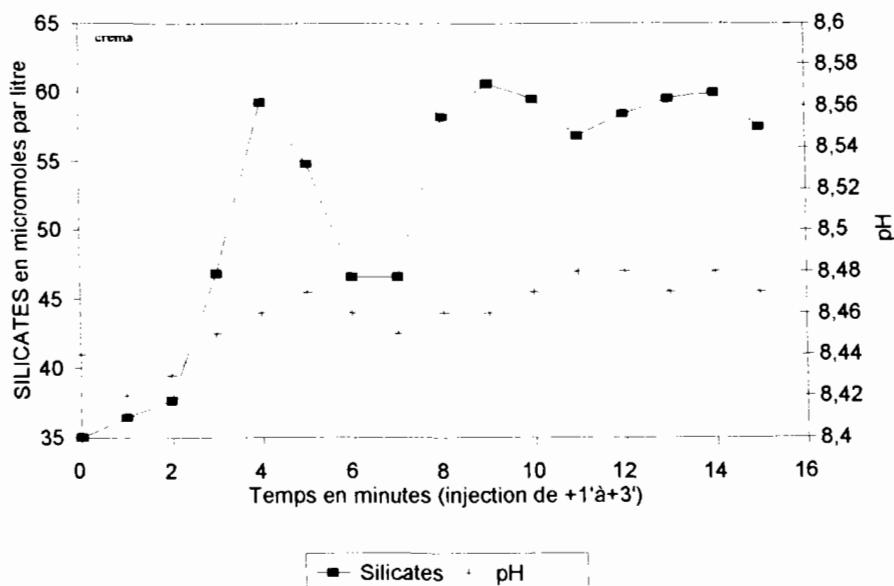
Une station (mi-profondeur), située à l'opposé de la zone d'injection de la silice a été suivie, minute par minute sur les 2 mêmes paramètres, durant un quart d'heure.

3. Résultats

dissolution immédiate (15min.) : 83%
 dissolution totale (~24 heures) : non mesurée
 précipitation durant l'épandage : non visible

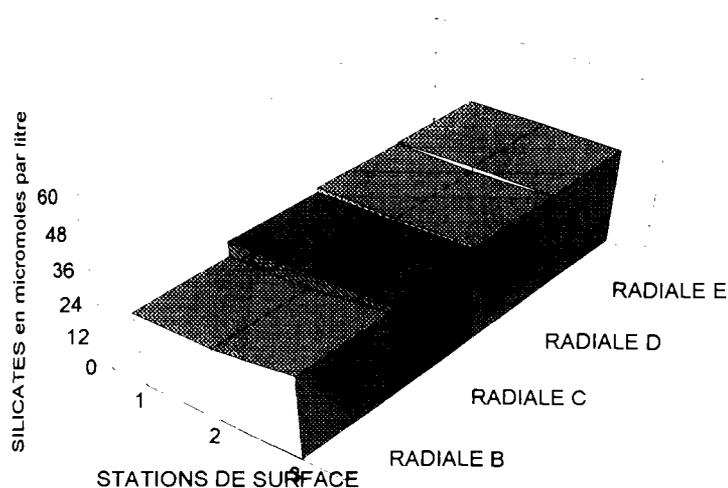
La figure 2 montre que l'augmentation du pH et de la silice est synchrone au cours du temps. L'effet de l'enrichissement élève le pH de 0,06 unité et la concentration en silice de 25 μ M. Il semble que l'arrêt de l'agitateur (à +6') crée une modification des masses d'eau au point fixe. Cinq minutes après l'arrêt de l'agitateur (à +11'), l'homogénéisation du bassin paraît s'être réalisée.

figure 2: essai d'injection-agitation
 bassin de 200m³ 24/10/91

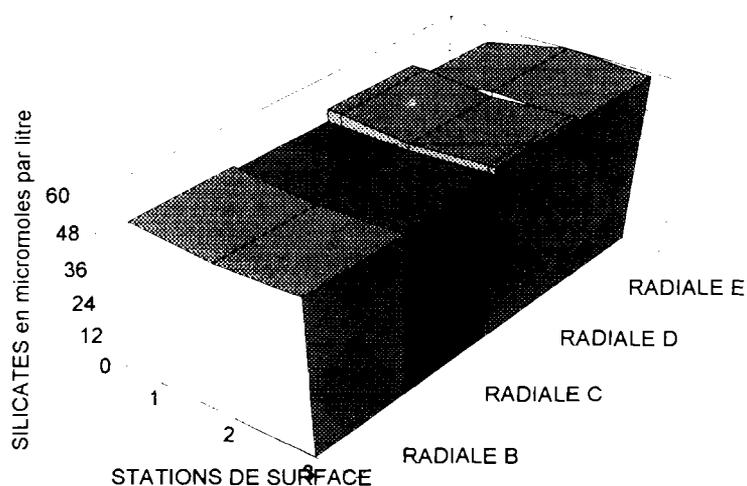


La figure 3 présente la répartition des silicates dans le bassin avant l'injection et 15' après l'injection. L'homogénéité des stations permet de calculer par simple moyenne des échantillons la concentration finale du bassin. L'apport réel de la fertilisation a été de 25 μM pour un apport théorique (dissolution totale) de 30 μM . Le taux de dissolution est satisfaisant, avoisinant 84 %.

DISSOLUTION DE LA SILICE ETAT ZERO
ESSAI 24/10/91 PAR INJECTION/AGITATION



DISSOLUTION DE LA SILICE ETAT FINAL
ESSAI 24/10/91 PAR INJECTION/AGITATION



4. Conclusion

La dissolution de la silice sous forme liquide peut s'effectuer efficacement par une agitation locale puissante, sans nécessiter une mise en mouvement de toute la masse d'eau. La prédissolution de la liqueur commerciale peut être réduite à 1/5^e dans ce cas. Exemple : il suffira de 20 litres d'eau douce pour fertiliser à +30 μM un bassin de 1000 m³.

COMPTE-RENDU D'EXPERIENCE SUR LA DISSOLUTION DE LA SILICE

EXPERIENCE 4 : DISSOLUTION DU METASILICATE DE SODIUM SOLIDE: EFFET DE LA PREDILUTION EN EAU DOUCE.

Participants : D. Gautier et F. Mornet.

Date : 5-14 février 1993.

1. Objectif

Après avoir mesuré expérimentalement un taux de dissolution du métasilicate solide, utilisé pur, d'environ 70% à $18\mu\text{M}$ en eau de mer (Gautier et al., 1993a), on a voulu tester l'effet de la prédilution du métasilicate en eau douce et comparer les résultats avec le gel de silice.

2. Conditions d'expérience

2.1. Apport en silice

produit : métasilicate de sodium pentahydraté solide ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; teneur théorique en silice: 13,25%), et silicate de soude liquide (cf expériences précédentes).

solutions mères : métasilicate pur et en dilution au $1/10^e$ et au $1/50^e$; gel de silice en dilution au $1/50^e$ dans de l'eau déminéralisée.

taux de prédilution en eau douce	volume ou poids apporté	Vsolution/ Veau de mer	concentration finale théorique (μM)
solide pur	50,9 mg	-	30
solide 1/10	0,5 ml	1/16000	29,47
solide 1/50	2,5 ml	1/3200	29,23
gel 1/50	2 ml	1/4000	31,58

2.2. Conditions expérimentales

lieu : salle thermorégulée
volumes récepteurs : flacons polycarbonate de 8 litres
température : 17°C
salinité : 35 g.kg^{-1}
pH : 8,1-8,2
lumière : obscurité
agitation : par bullage d'air au centre
filtration de l'eau de mer : filtre Whatman GF/F
concentration en chlorophylle a : $0\ \mu\text{g/l}$

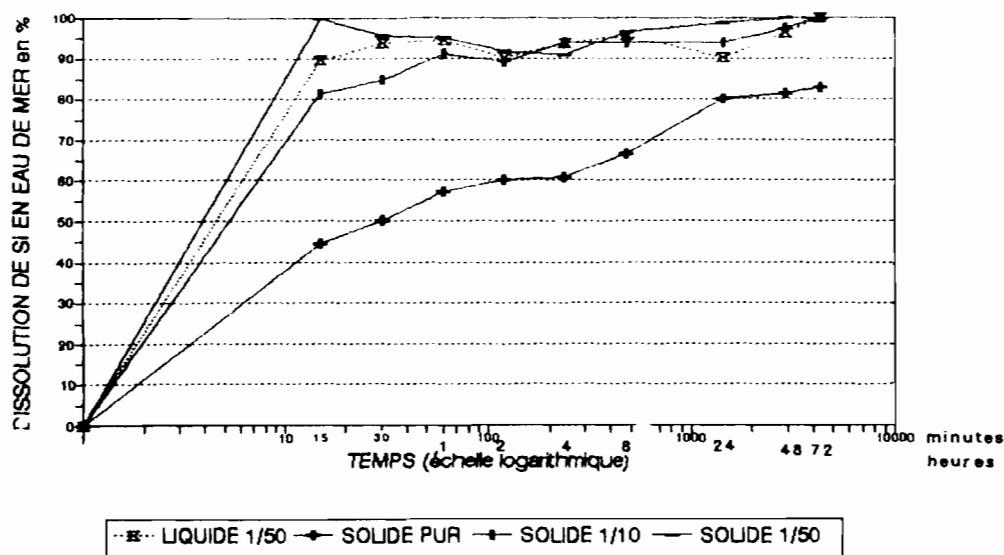
analyses : des prélèvements ont été filtrés sur Whatman GF/C avant l'injection de la silice, puis après 15, 30 minutes, 1, 2, 4, 8, 24, 48 et 72 heures. Les échantillons ont été ensuite conservés au congélateur avant l'analyse à l'autoanalyseur Skalar.

3. Résultats

Tableau 1 : taux de dissolution immédiate (après 1 heure) et après 24 heures (considéré comme le temps utile dans le cadre d'une culture semi-continue de phytoplancton) de la silice en eau de mer (en % de l'apport théorique).

	solide pur	solide 1/10	solide 1/50	gel 1/50
après 1h	55	90	95	95
après 24h	80	95	98	90
précipitation	oui	non	non	non

Figure 1: cinétique de la dissolution de la silice en eau de mer pour un apport théorique de 30 μ M.



Nous n'observons pas de différence significative entre solide et gel prédilués au 1/50^e. Les prédilutions du solide au 1/10^e et au 1/50^e donnent des résultats très comparables. Par contre, le solide pur se dissout lentement avec un maximum de 85% avec ce type d'agitation légère.

4. Conclusion

Il apparaît possible d'utiliser le métasilicate solide pur pour fertiliser un bassin de culture à fond inerte (béton ou bache plastique) avec un taux de dissolution de 80% en 24 heures. Pour un bassin naturel, le métasilicate solide peut être utilisé comme le gel de silice en prédilution au 1/10^e avec un taux de dissolution d'environ 90% en 1 heure. Dans ce cas, on préférera néanmoins l'utilisation du gel qui revient moins cher, se conserve mieux et se dilue plus facilement dans l'eau douce.

B. FICHES PRATIQUES

FICHE PRATIQUE STIMULATION S-1

SILICATE DE SODIUM EN SOLUTION AQUEUSE (GEL DE SILICE)

CREVAL/C. nrs-Iremer/1 novembre 1993

REFERENCE COMMERCIALE : **SILICATE DE SOUDE 38/40° Bé**

FABRICANT : **INCONNU**

GROSSISTE : **LANGLOIS CHIMIE, rue Pied de Fond 79000 NIORT**

(ne fait pas la vente au détail)

FORMULE ET NOM SCIENTIFIQUE : **Na₂SiO₃+H₂O Silicate de sodium**

MASSE ATOMIQUE : sans objet

DENSITE : **1,37**

pH : **11,5**

TENEUR THEORIQUE EN Si : **12,9%** (27,5% de SiO₂)

PRIX INDICATIF DU PRODUIT AU Kg (tarif grossiste en francs français hors taxes) : **112,80 F** le bidon de 40 kg soit **2,82 F/kg**

PRIX DU KG DE SILICIUM : **21,86 F/kg**

TAUX MOYEN DE DISSOLUTION : **80%**

PRIX PAR KG DE Si DISSOUTE : **27,33 F/kg**

CALCUL DU VOLUME DE PRODUIT A UTILISER POUR OBTENIR UNE CONCENTRATION MOLAIRES DONNEE DANS UN VOLUME CONNU :

$$\text{Produit (en litres)} = \text{Concentration } (\mu\text{M}) \times \text{Volume (m}^3) \times 0,000199$$

TECHNIQUE DE DISSOLUTION CONSEILLÉE :

type de bassin : **naturel en terre**

type de volumes : **grands (de quelques centaines à quelques milliers de m³)**

type de culture : **semi-continue, ou seulement orientation de la production naturelle**

mode de distribution en petits volumes : **agitation forte durant l'épandage**

mode de distribution en grands volumes : **épandage au seau à la volée ou mieux : dispositif mécanique (aérateur)**

besoin en eau douce : **dilution de 1/5^e avec agitation mécanique ou de 1/10^e sans agitation**

STOCKAGE :

aucune recommandation particulière. Produit très stable en bidons fermés

FICHE PRATIQUE STIMULATION S-2

METASILICATE DE SODIUM SOLIDE

CREMA (Cnis-Ifremer) novembre 1993

REFERENCE COMMERCIALE : **METASILICATE DE SODIUM**

FABRICANT : **SIMET-RHONE POULENC, Charly sur Marne**

GROSSISTE : **LANGLOIS CHIMIE, rue Pied de Fond 79000 NIORT**

(ne fait pas la vente au détail)

FORMULE ET NOM SCIENTIFIQUE : **Na₂SiO₃ , 5H₂O Méta silicate de sodium pentahydraté**

MASSE ATOMIQUE : **212,14 g/mol**

TENEUR THEORIQUE EN S : **13,25%**

PRIX INDICATIF DU PRODUIT AU Kg (tarif grossiste en francs français hors taxes) : **200,00 F** le sac de 50 kg soit **4,00 F/kg**

PRIX DU KG DE SILICIUM : **30,19 F/kg**

TAUX MOYEN DE DISSOLUTION : **80% en utilisation solide**

(100% utilisé sous forme dissoute dans 10 fois son poids en eau)

PRIX PAR KG DE Si DISSOUTE : **37,74 F/kg**

CALCUL DU POIDS DE PRODUIT A UTILISER POUR OBTENIR UNE CONCENTRATION MOLLAIRE DONNEE DANS UN VOLUME CONNU :

$$\text{Produit (en kilogrammes)} = \text{Concentration } (\mu\text{M}) \times \text{Volume (m}^3\text{)} \times 0,000265$$

TECHNIQUE DE DISSOLUTION CONSEILLÉE :

type de bassin : **fond dur (béton ou bâche plastique)**

type de volumes : **petits et moyens (de quelques dizaines à quelques centaines de m³)**

type de culture : **séquentielle à semi-continue**

mode de distribution en petits volumes : **agitation forte durant l'épandage et 8 heures qui suivent**

mode de distribution en grands volumes : **épandage du produit brut cristallisé à la volée dans le courant d'eau de remplissage**

besoin en eau douce : **néant**

STOCKAGE : **de préférence dans un endroit sec ; satisfaisant en sacs neufs non perforés car l'humidité favorise la formation de blocs compacts**

GLOSSAIRE

culture semi-continue : le principe est de maintenir l'algue dans sa phase de production maximale (croissance exponentielle), en prélevant chaque jour une partie de la biomasse, sans atteindre la phase stationnaire de la culture.

culture séquentielle : ("batch culture" en anglais), le principe est d'utiliser la biomasse totale à son niveau maximal, c'est-à-dire en phase stationnaire après quelques jours.

diatomées : nom commun des algues phytoplanctoniques de la classe des Bacillariophycées, caractérisées par leur symétrie et leur enveloppe siliceuse, le frustule ; microalgues très utilisées en aquaculture pour leur qualité nutritive.

flagellés : nom commun de plusieurs groupes d'algues caractérisées par des cellules munies d'un ou plusieurs flagelles ; contrairement aux diatomées, les flagellés sont généralement de plus faible qualité nutritive, et certaines espèces sont mêmes toxiques.

mésocosmes : enceintes expérimentales de volume moyen (de 1 à 1000m³ d'après l'UNESCO).

μM : abréviation de "micromoles par litre" aussi notée μmoles.l⁻¹.

nutriments : éléments minéraux indispensables à la croissance des algues, qui les assimilent sous forme dissoute (synonyme = sels nutritifs).

rapport molaire : la mole est une unité arbitraire exprimant un nombre de molécules d'un composé chimique, comme par exemple un nutriment. Le rapport molaire est le rapport de concentration entre deux nutriments, exprimé en micromoles par litre.