

Constructions cyanobactériennes calcaires dans les rivières de Haute-Normandie: perspectives de gestion

FREDERIC PITOIS¹, ALAIN JIGOREL² & PAUL FERLIN³

¹ 36 rue de Piré, 35000 Rennes, France
fred.pitois@laposte.net

² INSA de Rennes, GCGM-Géologie, 20 avenue des Buttes de Coësmes,
CS 14315, 35043 Rennes cedex, France,

³ DIREN Haute-Normandie, 1 rue Dufay, 76100 Rouen, France

Résumé La précipitation de calcite à la surface des films cyanobactériens benthiques est à l'origine du colmatage des fonds de nombreuses rivières calcaires dans le nord ouest de la France. L'intensité du phénomène dépend essentiellement de la composition du film et de l'hospitalité du milieu pour la microflore incrustante. Les études menées depuis 10 ans ont permis d'identifier les seuils d'apparition et de développement optimal de la microflore incrustante (conditions trophiques, température, éclairage, granulométrie des fonds, profondeur et vitesse du courant). Une grille d'évaluation de l'intensité du concrétionnement intégrant les paramètres déterminants a été validée par des mesures in situ. Elle permet de connaître dès le printemps et avec une incertitude raisonnable, le taux de précipitation prévisible par site et par an. Elle est aussi un outil d'aide à la gestion qui permet d'évaluer les conséquences sur le milieu des travaux d'entretien couramment pratiqués dans les cours d'eau affectés par le phénomène.

Mots clés calcite, cyanobactéries, entretien des cours d'eau, rivières calcaires

Management perspectives of the calcareous cyanobacterial build-ups in the hardwater rivers of Haute-Normandie (France)

Abstract Calcite precipitation on cyanobacterial benthic films is the cause of the cementing of many calcareous river beds in northwest France. The extent of this phenomenon depends both on the composition of the film and on how favourable the local conditions are to the encrusting microflora. The surveys carried out over the past 10 years have determined the thresholds at which the phenomenon appears and those allowing the most favourable development of the encrusting microflora (trophic conditions, temperature, exposure to light, grain size of the river bed, depth and speed of current). An assessment grid for the intensity of the phenomenon, which takes into account the determining factors, has been confirmed by on site measurements. As early as the spring, this grid makes it possible to forecast with a reasonable degree of error the precipitation rate for each site during the course of the coming year. It is also a useful tool for the management of the regular maintenance work carried out on the rivers affected by this phenomenon.

Key words calcite; management of the rivers; hardwater rivers

INTRODUCTION

Les précipitations calcaires d'origine microalgale affectent toutes les rivières qui drainent des bassins présentant un sous-sol calcaire. Dans le bassin de la Seine, les services du Ministère de l'Environnement avaient recensé 47 cours d'eau concernés en 1996. Les études menées sur 11 rivières du bassin de Seine (Pitois *et al.*, 2001) et 56 rivières de Bourgogne (Freytet & Plet, 1991, 1996) montrent que les précipitations les plus intenses sont dans plus de 90% des cas dues à une association caractéristique de cyanobactéries (*Phormidium incrustatum*, *Schizothrix fasciculata*) et chlorophycées (*Gongrosira incrustans*). Ces organismes constituent des films denses sur tous les substrats stables, et la précipitation biochimique de calcite se fait à la surface des gaines polysaccharidiques entourant les cellules. Leur croissance en microlaminations superposées est à l'origine de la structure caractéristique des stromatolites. Dans les conditions optimales, les taux de précipitation peuvent atteindre 1600 à 3000 g m⁻² an⁻¹, soit des épaisseurs de 2 à 3 mm.

Parmi les types de constructions couramment rencontrés, les planchers lisses formés dans les tronçons rectilignes des rivières par la cimentation des sédiments grossiers du fond, présentent le plus fort impact écologique, notamment en raison de l'appauvrissement généralisé de la qualité des habitats. Celui-ci se traduit par une diminution de la diversité et de la biomasse des invertébrés benthiques. Le développement des hydrophytes est limité par l'induration des sédiments qui empêche l'installation des mats racinaires et des rhizomes, mais facilite l'extension des algues filamenteuses. Dans les rivières à Salmonidés, la cimentation progressive des radiers et frayères diminue les surfaces propices à la reproduction. Enfin, les curages et scarifications mécaniques effectués pour "restaurer" le milieu se traduisent souvent par un recalibrage du cours d'eau qui modifie profondément les conditions hydrosédimentaires et amplifie l'intensité du phénomène.

La complexité des paramètres en jeu et l'évolution actuelle de la réglementation communautaire en matière de qualité des milieux naturels ont conduit la DIREN de Haute-Normandie à promouvoir le développement d'un outil simple pour caractériser le phénomène et faciliter la prise de décision dans le cadre des politiques de gestion des cours d'eau.

INTERET D'UNE GRILLE D'EVALUATION DU RISQUE DE CONCRETIONNEMENT CALCAIRE

La Directive Habitats (92/43/CEE, JOCE 1992) précise que "la biodiversité et la gestion raisonnée des milieux naturels deviennent des priorités européennes, notamment dans les cours d'eau d'intérêt piscicole". Le phénomène de précipitations carbonatées d'origine biologique touche avant tout, sur le territoire français, les rivières '*des étages planitiaires à montagnard avec végétation du Ranonculion fluitantis et du Callitricho-Batrachion*', considérées comme "Habitats Naturels d'Intérêt Communautaire" (Directive 92/43/CEE, annexe 1). La plupart des rivières concernées par les précipitations calcaires font aussi l'objet d'une proposition de classement au titre de Natura 2000.

En terme d'hospitalité piscicole, la cimentation des fonds grossiers (graviers et cailloux) entraîne une réduction de la surface des frayères (notamment pour *Salmo salar*, annexes 2 à 5 de la Directive), des zones de résidence et de chasse de *Cottus gobio* (annexe 2 de la Directive), et une diminution de la diversité et de la surface des habitats disponibles pour les invertébrés benthiques qui constituent une part importante du régime alimentaire de ces deux espèces (Pitois *et al.*, 2003). La mise en place de plans de gestion des milieux affectés par le phénomène nécessite l'implantation de réseaux de suivi spécifiques, ainsi que le développement d'indicateurs de qualité du milieu conformes aux propositions de la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE, JOCE 2000).

Il était donc nécessaire de développer un outil de notation des fonds qui prennent en compte d'une part le niveau de risque d'apparition et de développement des constructions carbonatées biogènes et d'autre part la qualification de l'état écologique du milieu vis à vis des espèces sensibles. L'utilisation conjointe des aspects prédictifs et qualificatifs permet alors: de cartographier le risque, tronçon par tronçon, à l'échelle de tout un cours d'eau sans nécessairement disposer de stations de mesure directe dans chaque site sensible, de prévoir la classe de risque dans chaque site sensible dès le printemps, donc très en amont de la période de reproduction des salmonidés, et enfin, de disposer d'un outil pour définir des politiques de gestion et prévoir les conséquences de modification des conditions du milieu (écoulements, dynamique sédimentaire, travaux sur la ripisylve...).

CONCEPTION ET VALIDATION DE LA GRILLE D'ÉVALUATION

La grille d'évaluation du risque est relativement complexe dans sa conception car elle est déterminée par des conditions qui sont tantôt nécessaires, tantôt indifférentes, tantôt limitantes (annexe). Les paramètres régionaux et locaux retenus sont les teneurs en nitrates et phosphates, la température des eaux, le débit moyen d'étiage, l'importance du couvert arboré et du couvert hydrophytique. Par ailleurs le phénomène apparaît ou s'amplifie essentiellement en fonction de la nature et de la texture des fonds, tandis que l'hydromorphologie de la rivière est un facteur déterminant pour la vitesse de concrétionnement. L'indice qui permet d'évaluer les potentialités de concrétionnement doit prendre en compte toutes les conditions favorables et défavorables du site.

Cette grille a été établie en deux temps:

- Recherche des seuils minima et maxima au-delà desquels la flore incrustante ne peut pas s'implanter sur le fond. De nombreux travaux (Borchardt 1994ab; Dodds 1991; Dodds & Gudder, 1992; Kjeldsen, 1996; Sheath & Cole, 1992; Pitois, 1999) montrent que la microflore incrustante se développe dans un domaine restreint défini par les conditions hydrologiques plus ou moins contraignantes. Lorsque le milieu n'est pas favorable au développement du benthos, les fonds sont colonisés exclusivement par des espèces pionnières (bactéries et cyanobactéries coccoïdes, diatomées des genres *Navicula* et *Cocconeis*), et lorsque le milieu est propice aux algues filamenteuses épilithes classiques comme *Cladophora glomerata* et *Vaucheria geminata*, le développement de la microflore incrustante est entravé par l'ombrage et le dépôt des sédiments détritiques fins.

- Détermination des niveaux de risque : au sein du domaine propice à la croissance de la flore incrustante, les taux de précipitation annuels mesurés depuis 1995 ont été regroupés en cinq classes (Tab 1) en fonction du temps nécessaire pour cimenter un fond naturel grossier (gravelo-caillouteux), avec comme paramètres de contrôle, la texture des sédiments des fonds, la profondeur et la vitesse du courant.

La fiabilité de la grille de notation a été évaluée en comparant la distribution des classes de taux de précipitation prédits et des taux de précipitations mesurés *in situ* dans 3 stations de 1996 à 1998, puis 10 stations de 1999 à 2003. Toutes ces stations ont été équipées selon le protocole décrit par Pitois *et al.* (2001): les substrats (quartzite de 25–40 mm) sont fixés sur le fond chaque année en avril et les facteurs abiotiques (température, éclaircissement, couverture hydrophytique, nature granulaire des fonds, profondeur, vitesse du courant) sont mesurés en juillet. En novembre, les taux de précipitation annuels sont déterminés par attaque acide (HCl 16%) des dépôts carbonatés présents sur les substrats et pesée différentielle.

La distribution des résultats (Fig. 1) montre une correspondance comprise entre 58 et 100% selon les classes de risque. Elle varie de 64 à 100% pour les classes les plus élevées (cimentation des fonds en moins de 2 ans).

Table 1 Correspondance entre les niveaux de risque et les taux de précipitation calcaire.

niveau de risque	taux de précipitation	vitesse de cimentation	note
1	<20 g m ⁻² an ⁻¹	n.a.	conditions trop contraignantes (site de référence)
2	<200 g m ⁻² an ⁻¹	négligeable	risque faible pour le milieu
3	200 à 600 g m ⁻² an ⁻¹	>5 ans	site à surveiller en cas d'étiage pluriannuel
4	600 à 1200 g m ⁻² an ⁻¹	2–5 ans	risque élevé, plancher en formation
5	>1200 g m ⁻² an ⁻¹	1–2 ans	risque maximal, plancher actif

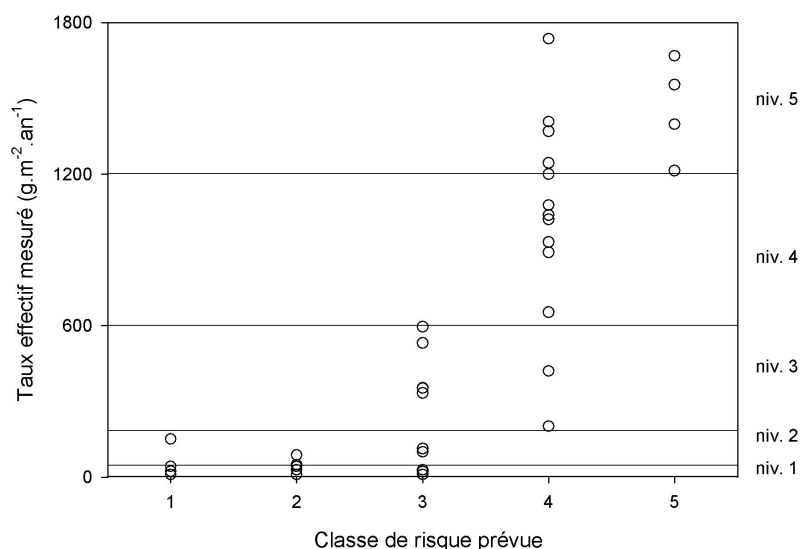


Fig. 1 Correspondance entre les classes de risque prévues et les taux de précipitation mesurés.

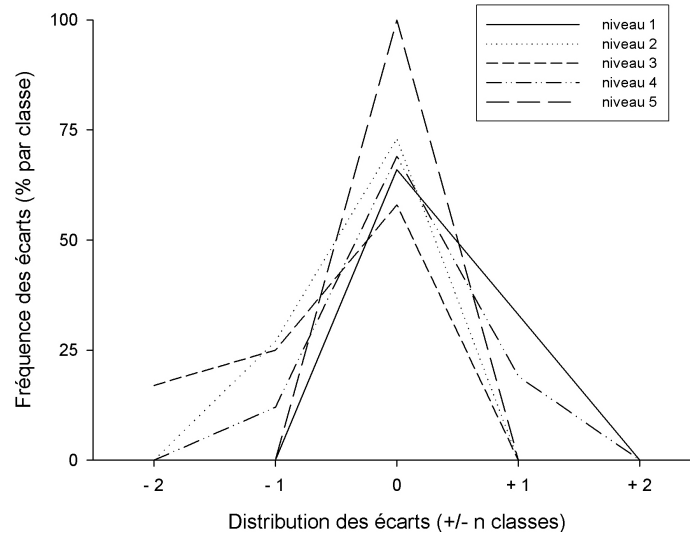


Fig. 2 Distribution relative des écarts entre classes de risque prévues et mesurées.

La distribution des écarts (Fig. 2) montre de plus que:

- pour les classes les plus faibles (niveau < 3) comme pour les plus fortes (niveau > 3), les écarts n'excèdent pas +/- 1 classe pour 15% des résultats
- pour les classes moyennes intermédiaires (niveaux 2 et 4), le niveau de risque prévu a été majoritairement sur-évalué (18% des cas, contre 7% de sous-évaluation). Ce résultat est plutôt en accord avec l'objectif de détermination de seuils d'alerte dans le cadre de la surveillance de la qualité du milieu.
- pour la classe intermédiaire (niveau 3), qui désigne des stations susceptibles de basculer rapidement vers une colonisation rapide des fonds par la flore incrustante, le niveau de risque a toujours été sur-évalué, ce qui va encore dans le sens de la prévention. Les écarts entre les évaluations et les mesures pouvaient toujours être attribués à des variations accidentelles (souvent d'origine anthropique) de facteurs abiotiques imprévisibles lors des mesures de terrain

APPLICATIONS POSSIBLES

La mise en place d'un réseau de surveillance permet d'évaluer *a priori* les modifications des fonds qui peuvent contrarier le développement ou le maintien des espèces sensibles. Cet outil prédictif associé aux modèles hydrauliques courants, devient alors un outil de diagnostic dans le cadre d'études préalables à l'aménagement des cours d'eau, ou un outil permettant de connaître les causes possibles d'extension du phénomène au cours des années passées.

En partant d'une hypothèse schématique fréquente en Haute-Normandie (cours d'eau large de 5 m, profondeur de 0.3 m à l'étiage, soit une surface de 1.5 m² et un rayon hydraulique de 0.14), il est possible d'estimer la vitesse moyenne du courant (Fig. 3(a)) par la formule de Manning, pour des sinuosités comprises entre 1 (chenal rectiligne recalibré) et 1.5 (cours naturel sinueux de faible énergie spécifique) correspondant à des pentes variant de 0.3 (chenal droit) à 0.2% (chenal sinueux).

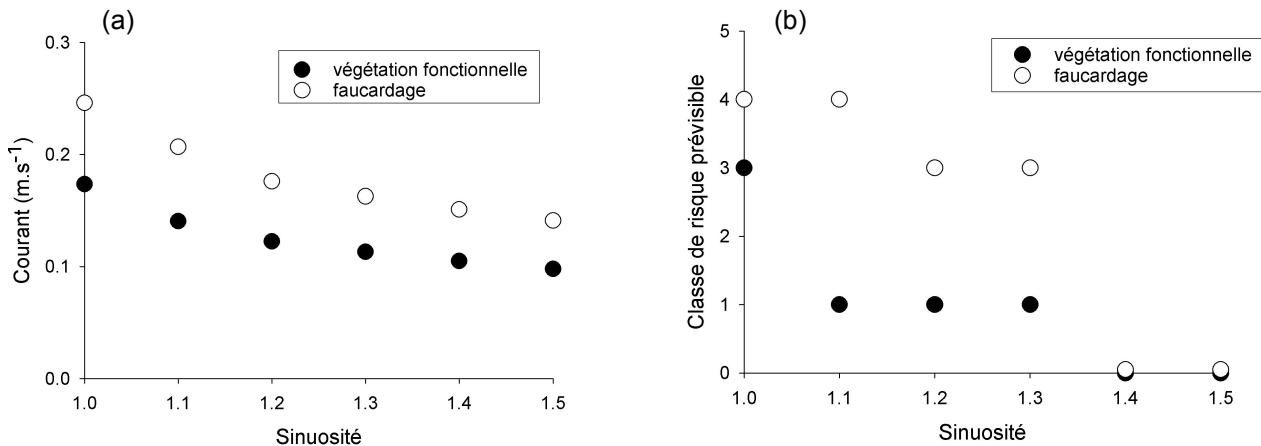


Fig. 3 Evolution de la vitesse moyenne du courant: (a) et des classes prévisibles de risque; (b) en fonction de la sinuosité du lit et de la présence de végétation aquatique.

A partir de cette vitesse calculée et des hypothèses d'évolution de la rugosité du chenal (reprofilage des berges, suppression des obstacles naturels...), on peut déterminer le niveau de risque prévisible sur l'échelle de 1 à 5 présentée plus haut (Fig. 3(b)) en fonction de la présence d'une hydroflore fonctionnelle naturelle (typiquement 70% de recouvrement des fonds) ou d'une pratique de faucardage à blanc couramment mise en oeuvre par les riverains pour accroître la capacité d'écoulement.

Il apparaît alors que:

- pour les sinuosités supérieures à 1.3 (pente inférieure à 0.23%), le faucardage n'a pas d'impact net sur le phénomène. Le courant ($<0.15 m \cdot s^{-1}$) est suffisamment faible pour maintenir le risque à un niveau négligeable ($< \text{niv. } 2$)
- pour les sinuosités comprises entre 1.3 et 1.1 (pentes de 0.27 à 0.23%), le faucardage seul, en permettant au courant d'atteindre le seuil de $0.2 m \cdot s^{-1}$, explique l'augmentation du risque de 2 à 3 classes, soit une évolution d'un niveau négligeable vers une cimentation des fonds en 2 ans.
- pour les tronçons droits, le maintien d'une hydroflore fonctionnelle permet de conserver un niveau de risque tolérable mais à surveiller en cas d'étiage pluriannuel.

CONCLUSION

En permettant de prévoir l'évolution d'un phénomène très complexe, la grille d'évaluation proposée apparaît utile pour les gestionnaires. Elle justifie le développement de réseaux de surveillance spécifiques capables de fournir des résultats fiables avant le début de la période critique pour la reproduction des salmonidés. Elle est aussi un outil de diagnostic utile pour déterminer la pertinence et l'impact de certains usages et modes d'entretien. Elle peut compléter, dans le cadre des études préalables aux aménagements des rivières, les modèles permettant le calcul des débits minima à maintenir pendant l'étiage. Elle permet également de connaître les évolutions de la surface piscicole utile en fonction des débits réservés.

ANNEXE—GRILLE D’EVALUATION DU RISQUE

1ère étape—Caractérisation des conditions locales

N.NO ₃ < 1 mgN L ⁻¹ : 0	N.NO ₃ > 1 mgN L ⁻¹ : +	
P.PO ₄ < 5 :gP L ⁻¹ : -	P.PO ₄ > 5 :gP L ⁻¹ :+	
T _{MJ} < 12°C: -	12°C < T. des eaux Minimales en Juin < 15°C: +	T _{MJ} > 15°C: 0
Q _{ME} < 1 m ³ s ⁻¹ : 0	1 m ³ s ⁻¹ < Débit Moyen d’Etiage < 4 m ³ s ⁻¹ : +	Q _{ME} > 4 m ³ s ⁻¹ : 0
CA < 30%: 0	30% < Couvert Arboré < 60% +	CA > 60%: -
CH < 30%: +	30% < Couvert Hydrophytique < 60 % : 0	CH > 60%: -

On somme les conditions rencontrées par paramètre pour obtenir une première note:

- conditions nécessaires: +
- conditions indifférentes: 0
- conditions limitantes: -

trois possibilités sont retenues:

- au moins 5 conditions nécessaires (noté C+)
- au moins 2 conditions limitantes (noté C-)
- autres combinaisons: résultat indifférent (noté Co)

2ème étape - Note intermédiaire: Nature des fonds

Cond. régionales & locales	C+	C-	Co
Cailloux ou Planchers	3	0	2
Graviers ou Nodules	2	0	1
Limons et/ou Sables	1	-1	-1

3ème étape—Coefficient hydromorphologique: Ecoulements locaux

Profondeur (cm)	Courant (cm.s ⁻¹)			
	15	40	60	80
10	0	+1	0	0
20	-1	+2	+1	0
30	-1	+1	+2	0
40	-1	-1	+1	+1

4ème étape—Niveau de risque

On calcule le niveau de risque (de 1 à 5) avec la formule: Risque = Note intermédiaire + Coeff. Hydromorphologique.

Remerciements Cette étude a été financée par le Ministère de l'Environnement et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie.

RÉFÉRENCES

- Borchardt, M. A. (1994a) Effects of flowing water on nitrogen- and phosphorus-limited photosynthesis and optimum N:P ratios by *Spirogyra fluviatilis* (Carophyceae). *J. Phycol.* **30**, 418–430.
- Borchardt, M. A. (1994b) Phosphorus uptake kinetics of *Spirogyra fluviatilis* (Carophyceae) in flowing water. *J. Phycol.* **30**, 403–417.
- Borchardt, M. A. (1996) Nutrients. In: *Algal Ecology* (ed. by J. R. Stevenson, M. L. Bothwell, & R. L. Lowe), 183–227. Academic Press, New York, USA.
- Dodds, W. K. (1991) Factors associated with dominance of the filamentous green alga *Cladophora glomerata*. *Water Res.* **25**, 1325–1332.
- Dodds, W. K. & Gudder, D. A. (1992) The ecology of *Cladophora*. *J. Phycol.* **28**, 415–427.
- Freytet P. & Plet A. (1990) Les formations stromatolitiques (tufs calcaires) récentes de la région de Tournus (Saône et Loire). *Géobios* **24**(2), 123–139.
- Freytet, P. & Plet, A. (1996) Modern freshwater microbial carbonates: the *Phormidium stromatolites* of southeastern Burgundy (Paris Basin, France). *Facies* **34**, 219–238.
- Kjeldsen, K. (1996) Regulation of algal biomass in a small lowland stream: field experiments on the role of invertebrate grazing, phosphorus and irradiance. *Freshwater Biol.* **36**, 535–546.
- Parlement Européen (1992), Directive 92/43/CEE concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages. *Official J. European Community* **206**, 7–50.
- Parlement Européen (2000), Directive 2000/60/CE établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. *Official J. European Community* **327**, 1–72.
- Pitois, F. (1999) Constructions carbonatées biogènes en rivière: dynamique de développement d'un mat cyanobactérien incrustant, Thèse d'Université, Université de Rennes 1, Rennes, France.
- Pitois, F., Jigorel, A. & Bertru, G. (2001), Colonization dynamics of an encrusting cyanobacterial mat in a hardwater river (Eaulne, France). *Geomicrobiol. J.* **18**, 139–155.
- Pitois, F., Jigorel A. & Bertru, G. (2003) Development of cyanobacterial build-up and evolution of river bed morphology in the chalk stream Eaulne (Upper Normandy, France). *Biodivers. Conserv.* **12**, 621–636.
- Sheath, R. G. & Cole, K. M. (1992) Biogeography of stream macroalgae in North America. *J. Phycol.* **28**, 448–460.