ETUDE D'UNE SOLUTION DE CONFINEMENT DE POLLUANTS DANS LES SEDIMENTS DU LAC ST AUGUSTIN

Rosa Galvez-Cloutier, Département de Génie Civil, Université Laval, Québec
Serge Leroueil, Département de Génie Civil, Université Laval, Québec
Yon Trentin, Département de Génie Civil, Université Laval, Québec
Gerardo Dominguez, Département de Génie Civil, Université Laval, Québec

ABSTRACT
The project aiming at rehabilitating the St Augustin lake, Québec, allowed the study of a containment solution for the pollutants present within the sediments using a calcite capping layer. Indeed the initial characterization of the sediments showed the presence of metals and phosphorus in concentrations higher than the minor effects thresholds (MET) established by the Saint-Laurent Action Centre in 1996. Releasing tests have been carried out on the sediments and showed that metals are strongly attached to the solid matrix, only phosphorus is released out in large quantities. The performance of the capping layer was then undertaken and established a strong capacity of calcite to retain metals and, the existence of a linear relation between calcite layer height and its retention capacity.

RÉSUMÉ
Le projet visant à réhabiliter le lac St Augustin a permis l'étude d'une solution de confinement des polluants contenus dans les sédiments par une couche de recouvrement. La caractérisation initiale des sédiments a en effet montré la présence de métaux et de phosphore en concentrations supérieures aux seuils d'effets mineurs (SEM) établis par le Centre d'Action Saint-Laurent 1996. Des essais de relargage effectués sur les sédiments ont cependant démontré que les métaux, fortement attachés à la matrice solide du sol, étaient peu ou difficilement relargables et que seul le phosphore est relargué en quantités importantes. L'étude de l'efficacité d'une couche de recouvrement a ensuite été menée et a établi une forte capacité de la calcite à retenir les métaux et, l'existence d'une relation linéaire entre la hauteur de la couche de calcite et son pouvoir de captage.

1. INTRODUCTION

Autrefois utilisé à des fins récréatives, le lac Saint-Augustin situé dans l'ancien 8ème arrondissement de la ville de Québec souffre d'une pollution interdisant toute activité sur le plan d'eau. L'une des principales origines identifiées de cette pollution provient des engrais utilisés en agriculture qui, après ruissellement, se retrouvent dans le lac. Cet apport en éléments nutritifs (phosphore et composés azotés) a eu pour conséquence d'accélérer au cours du temps le phénomène d'eutrophisation qui se caractérise par une prolifération algale et la détérioration de la qualité de l'eau en été. Cette biomasse peu consommable et peu recyclable sédimente, apportant de grandes quantités de matière organique contenant du phosphore et de l'azote dans les sédiments. D'autre part, la quantité de phosphore dans les sédiments ne constitue pas la seule source de contamination, la caractérisation préliminaire des sédiments a montré la présence de métaux lourds (Cd, Pb, Zn, Ni, Cu, Cr et As) qui constituent eux aussi, une source potentielle de contaminants pouvant migrer vers la colonne d'eau. De plus, l'alimentation en eau du lac, essentiellement souterraine, induit un flux d'eau des sédiments du lac vers la colonne d'eau qui, ce pourrait favoriser le relargage des contaminants vers cette dernière.
Dans le cadre du projet de ″la grande corvée du bassin versant du lac Saint-Augustin ″ visant à restaurer le plan d'eau, une technique de restauration par la méthode de recouvrement ou ″capping″ a été mise à l'étude et des expériences sur le phénomène de relargage et sur l'efficacité d'une couche de recouvrement ont été menées. La méthode de restauration par recouvrement consiste à déposer une couche de matériaux sur les sédiments afin de prévenir ou du moins limiter le phénomène de relargage des contaminants vers la colonne d'eau. Le présent article expose, après une brève présentation des expériences menées, les résultats de cette recherche.

2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

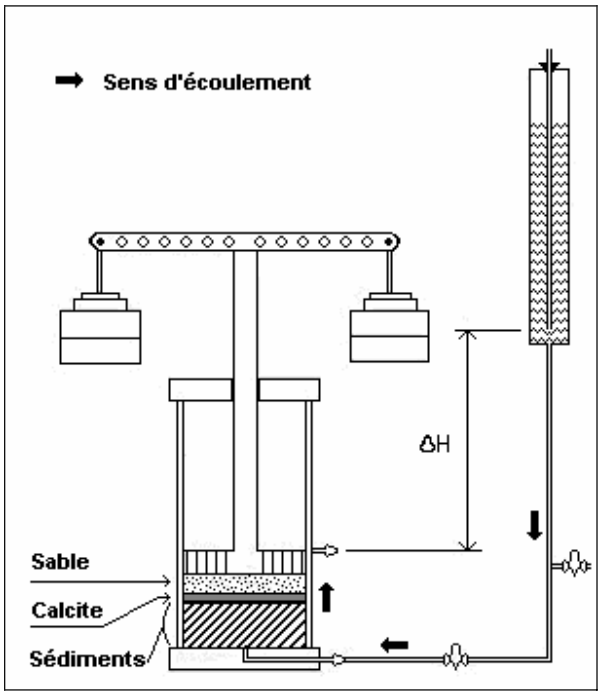
Le but du projet est, dans un premier temps d'évaluer le phénomène de relargage des contaminants (phosphore et métaux lourds) dans les eaux recueillies après avoir traversé les sédiments. Le deuxième objectif vise à déterminer la distribution géochimique des métaux dans les sédiments à différents stades de l'expérimentation afin de déterminer les mouvements éventuels des métaux entre les différentes fractions des sédiments (fraction soluble, échangeable, carbonates, matière organique, résiduel, oxydes et hydroxydes). Le troisième objectif consiste à étudier l'efficacité de rétention en phosphore d'une couche de recouvrement de 1 cm constituée de calcite sous l'influence de changements physico-chimiques tels que des changements de pH. Enfin, le dernier objectif vise à déterminer l'influence de l'épaisseur de la couche de calcite et du temps de résidence de l'eau dans les sédiments sur la qualité des eaux à la sortie de la couche de recouvrement et sur sa capacité à retenir le phosphore.

3. MATERIEL ET METHODES

3.1.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'une cellule en plexiglas de 12 cm de diamètre (Figure 1). Le socle de la cellule sert à la fois de système de fermeture et de point d'entrée d'alimentation en eau du système (flux ascendant). La partie supérieure de la cellule sert quant à elle de système de fermeture et de guide pour le piston percé servant à consolider l'échantillon. Un support de poids adapté sur la tête du piston permet d'appliquer une charge sur l'échantillon lors de la consolidation. Enfin, pour simuler un écoulement à charge (Δh) constante, une bouteille de Mariotte est reliée à la base de la cellule.

Figure 1. Schéma du dispositif expérimental



A sa base, la cellule présente une série de deux grillages et d'un géotextile permettant une meilleure répartition de l'eau à travers l'échantillon. Ensuite une couche de sédiments de 7.5 cm est déposée puis consolidée sous 5kPa ; une fois le tassement stabilisé, la couche de sédiments a une hauteur d'environ 5 cm, conformément aux essais œdométriques réalisés préalablement. Dans le cadre de cette étude, un géotextile de 1,4 mm (non-tissé) de référence 140 N de la compagnie Mirafi avec ouverture des pores de 212 µm a été placé sur le sol afin d'empêcher la contamination de la couche de recouvrement par les particules fines. Enfin, une épaisseur de 1 cm de calcite puis deux centimètres de sable servant de couche de stabilisation ont été appliqués.

3.1.2 Matériaux utilisés

Les sédiments

Les sédiments ont été prélevés à 42 stations d'échantillonnage réparties sur la totalité du lac grâce à une benne preneuse Ekman de 4 litres. Les sédiments utilisés lors des essais on été composés en mélangeant 29 des 42 échantillons prélevés afin d'obtenir un échantillon représentatif des sédiments du lac St-Augustin. L'échantillon obtenu a été tamisé pour éliminer les fragments les plus grossiers tels que branches, feuilles, coquilles d'escargots et autres. Les caractéristiques des échantillons ainsi obtenus ainsi que leurs concentrations des contaminants sont présentées dans tableau 1 et 2.

Tableau 1. Caractéristiques des sédiments

Paramètres	Unités	Valeur
Teneur en eau	%	160
Texture		Limono-sableux
Matière organique	%	11,2*
Limite de liquidité	%	38,8 – 58,8
Indice de plasticité	%	4,5 – 13,1
Couleur		Grisâtre foncée
Densité relative des grains		2,56*
Indice des vides		4,27*
Porosité	%	81*
Perméabilité	cm/s	$4x10^{-7}$*

*Valeur moyenne

Tableau 2. Concentration moyenne des contaminants dans les sédiments

Paramètre	Cd	Pb	Cu	Zn	P total
Concentration moyenne mg/Kg	0,9	42	28	150	1220

La Calcite

La couche de recouvrement considérée est constituée de roche calcaire possédant un diamètre moyen de 2 mm et un coefficient d'uniformité de 15.5. Cette roche, comme le montre le tableau suivant, possède des concentrations en métaux lourds significatives surtout en ce qui concerne le Cd et le Pb (Tableau 3). Plusieurs lavages acides réalisés sur cette même roche ont démontré un fort attachement des métaux à la roche calcaire faisant ainsi d'elle une barrière chimique prometteuse, tout du moins en ce qui concerne les métaux.

Tableau 3. Analyse chimique de la roche calcaire

Matériau	**Cd**	**Cu**	**Pb**	**Zn**	**P extractible**
	Concentration mg/kg				
Roche Calcaire	2,0	7,5	40,5	11,5	6,1

Le sable

Le sable utilisé dans la couche de recouvrement constitue la barrière physique qui permettrait dans des conditions de terrain de limiter le phénomène de bioturbation et de stabiliser les couches sous-jacentes. En absence de bioturbation et de perturbations au niveau de la couche de recouvrement en laboratoire, la couche de sable a été rajoutée afin de se rapprocher de ce qui pourrait être réalisé sur le terrain. Le sable utilisé dans cette simulation est un sable de 0,6 mm de diamètre moyen avec un coefficient d'uniformité de 4.

Les eaux de percolation

Afin de simuler la situation sur le terrain, nous avons utilisé de l'eau d'origine souterraine, échantillonnée dans un puits artésien localisé en bordure nord du lac. L'eau recueillie a été stockée dans des conteneurs en PEHD (polyéthylène haute densité) de 20 litres et conservée en laboratoire dans une chambre froide à 4 ºC. Les concentrations en contaminants dans cette eau sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4. Caractéristiques de l'eau souterraine

pH	[P] mg/l	[Cd] mg/l	[Cu] mg/l	[Pb] mg/l	[Zn] mg/l
9,0 - 9,4	60	<0,3 *	<0,3 *	<0,5 *	<0,3 *

* Sous le seuil de détection

3.1.3 Les essais de lixiviation

Quatre pH ont été utilisés lors des essais de lixiviation afin d'évaluer la solubilité des contaminants et simuler des changements possibles dans les conditions physico-chimiques. Après percolation d'un certain nombre de volumes de pores, la mobilité des contaminant a été évaluée en mesurant la concentration en phosphore et en métaux dans l'eau percolée. Le relargage et la mobilité du phosphore et des métaux seront illustrés par des courbes d'élution et de rétention. Le volume relatif percolé ou, volume des pores, sert ici comme référence de temps et de volume d'eau écoulé. Le Tableau 5 résume les conditions d'essais réalisés.

Tableau 5. Conditions d'essais selon le pH de l'eau et le nombre de V_r percolés

Essai / pH de l'eau souterraine	Volume relatif percolé $Vr = 458ml$					Total essais
	1 Vr	2 Vr	3 Vr	4 Vr	8 Vr	
pH 2	0	0	0	0	1	1
pH 3	1	1	1	1	0	4
pH 7,4	1	1	1	1	0	4
pH 9	1	1	1	1	0	4
Total essais	3	3	3	3	1	13

3.1.4 Evaluation de l'efficacité de la couche de calcite

L'efficacité de la couche de recouvrement a ensuite été évaluée en comparant les concentrations en phosphore et métaux à la sortie de la couche de sédiments et celles obtenues après percolation à travers la couche de calcite. Enfin, différentes hauteurs de couches de calcite ont été testées pour voir l'influence de la hauteur sur le pourcentage de rétention, le pourcentage de rétention représentant le rapport entre la quantité de phosphore retenue par les différentes hauteurs de calcite et la quantité de phosphore relargué dans la cellule témoin. Les différents essais réalisés sont résumés au Tableau 6. Lors de ces derniers essais, seule l'efficacité de la couche de calcite a été testée, la cellule ne contenant que des sédiments consolidés et une couche de calcite, l'eau du robinet à été utilisée pour mobiliser le phosphore des sédiments.

Tableau 6. Hauteur de calcite dans chaque cellule

Cellule n°	1(témoin)	2	3	4
Hauteur de calcite (cm)	0	4.5	5.5	7.5
Nombre d'essais	2	2	2	2

3.1.5 Paramètres mesurés et méthodes d'analyse

La capacité d'échange cationique.

La méthode utilisée pour mesurer la CEC est celle proposée par de Hendershott *et al.* (1993). Elle permet d'évaluer la capacité d'échange cationique et anionique des sédiments à différents pH. Le protocole consiste à saturer les sites avec des ions calcium puis à les relarguer à l'aide de chlorure de potassium. La mesure du calcium (par absorption atomique) relargué permet de calculer la capacité d'échange cationique et anionique en méq/100 grammes.

Distribution géochimique des métaux dans les sédiments.

A la fin de chaque essai l'échantillon de sédiments a été tranché horizontalement en trois (3) sections (bas, milieu et haut) de 1,5 cm d'épaisseur qui ont été analysées par la méthode d'extraction séquentielle sélective (Galvez-Cloutier et Dubé, 1998) afin de déterminer la distribution des métaux dans la couche. La mesure de la teneur en métaux lourds a ensuite été réalisée à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique.

Teneur en métaux lourds dans l'eau percolée.

La teneur en métaux lourds dans l'eau a directement été obtenue à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique.

Teneur en phosphore total dans l'eau percolée.

La détermination en phosphore total a été réalisée selon la méthode standardisée SM 424 C et E^{9} (AWWA, 1985) et après digestion préalable des échantillons.

4. RESULTATS

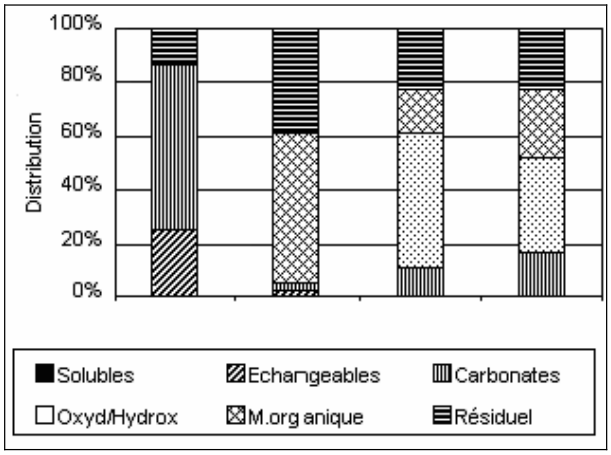
4.1.1 Relargage des métaux dans la colonne d'eau

Une première série de mesures en métaux a été réalisée sur les eaux de surface et sur les eaux souterraines qui alimentent le lac. Cette première mesure n'a pas permis de déceler des concentrations significatives en métaux dans l'eau de surface. Ces résultats tendent à montrer que les métaux ne sont pas ou peu relargables.

4.1.2 Distribution géochimique des métaux dans les sédiments

La première caractérisation des sédiments a permis de déterminer les concentrations totales en métaux sans indiquer de quelle manière ils étaient répartis dans les sédiments. L'extraction séquentielle sélective permet, par l'ajout de réactifs d'agressivité croissante, d'extraire les métaux associés à chaque compartiment (hydroxydes, oxydes, carbonates etc.). Une première extraction a été réalisée afin de déterminer la distribution originelle des métaux dans les sédiments (Figure 2). Les résultats montrent des distributions particulières a chaque métal. On peut cependant noter quelques particularités : une rétention totale des métaux lourds par les phases solides des sédiments puisque la fraction soluble est nulle pour tous les métaux ; le Cd, qui possède une bonne affinité avec les carbonates, est le seul métal possédant une affinité importante avec la fraction échangeable. On peut aussi noter la forte affinité du cuivre (57% environ) pour la matière organique puisque la majorité de ce métal s'y trouve associé.

Figure 2. Distribution géochimique des métaux

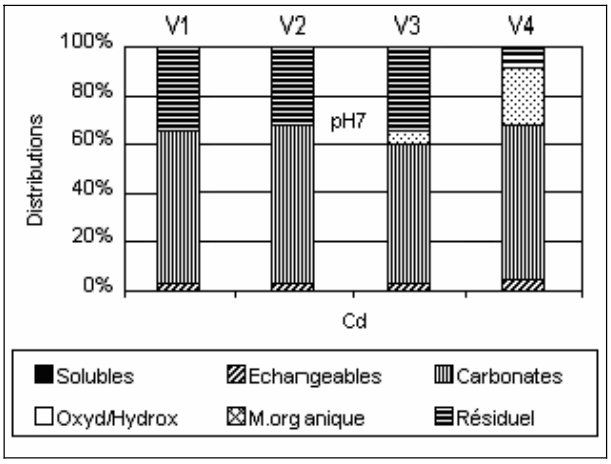


4.1.3 Influence du pH sur la distribution géochimique des métaux

La figure 3 montre les principaux résultats obtenus sur la distribution géochimique des métaux dans les sédiments à différents volumes percolés à un pH de 7.

De tels résultats ont été obtenus pour différents pH et différents volumes d'eau écoulés. Les premiers résultats ont montré que la concentration en métaux restait essentiellement la même indépendamment du pH comme le montre la Figure 4.

Figure 3. Influence du volume écoulé sur la distribution géochimique du Cd



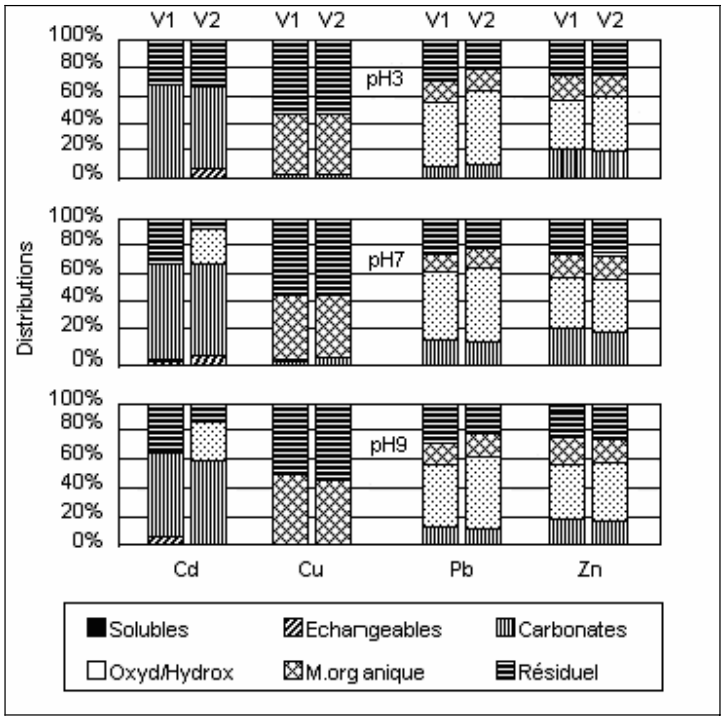
Pour la majorité des métaux étudiés, la distribution géochimique est quasi identique mis à part pour le Cd. Comme le présente la Figure 4, aucun métal n 'est associé à la fraction soluble ; seul le Cd est associé à une faible fraction échangeable. Ce dernier voit ses fractions résiduelles et carbonates baisser. En parallèle, on constate l'apparition d'une fraction oxydes/hydroxydes et une augmentation de la fraction échangeable indiquant que lors d'un possible relargage de Cd, il reste aux autres phases du sol (i.e. oxydes/hydroxydes) une capacité de rétention assurant une rétention totale du Cd même lors de changements dans les conditions de pH.

En ce qui concerne les autres métaux, on peut constater que le Pb a une affinité particulière avec la fraction oxydes/hydroxydes avec (47%). Le Cu quant à lui est associé aux fractions résiduelles et matière organique à hauteur de 95%. Enfin, le Zn est principalement associé aux fractions carbonates et oxydes/hydroxydes à hauteur de 57%.

4.1.4 Influence des volumes relatifs écoulés sur la distribution géochimique des métaux.

La Figure 3 montre l'influence du nombre de volumes d'eau écoulés sur la distribution des métaux dans les différentes fractions du sol à pH 7. Dans le cas du Cd, la fraction résiduelle diminue lorsque le volume écoulé augmente ; à l'inverse, la fraction oxydes/hydroxydes augmente. Les autres métaux ne subissent pas de changements significatifs dans leurs distributions comme le montre la Figure 4 pour les deux premiers volumes d'eau percolés.

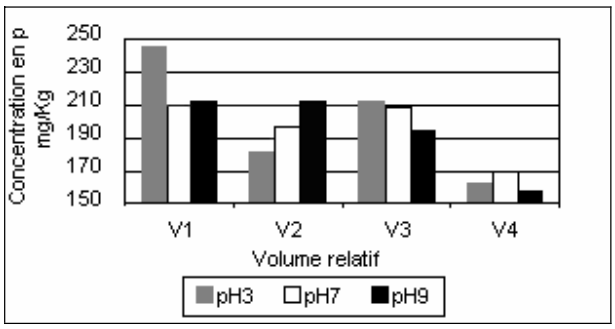
Figure 4. Distribution géochimique des métaux en fonction du pH et des volumes de vides percolés



4.2 Evaluation du relargage en phosphore

L'eau percolée a été récupérée et des analyses en phosphore ont été réalisées pour les différents pH et pour des volumes écoulés différents. La Figure 5 montre que la concentration en phosphore relargué en fonction du pH est très variable et ne permet pas de dégager de tendance entre le phosphore relargué et les différents pH testés En revanche, sur cette même figure, on observe une nette diminution de la quantité de phosphore relarguée avec l'augmentation du volume écoulé, ces résultats traduisent la perte de phosphore au fur et à mesure que la quantité d'eau percolée augmente.

Figure 5. Variation de la concentration en P en fonction du pH et des volumes relatifs écoulés



4.2.1 Evaluation de la capacité de rétention de la couche de calcite

4.2.2 Evaluation de l'influence du pH et du volume écoulé sur la rétention des métaux lourds par la calcite

L'analyse de la roche calcaire après les essais de lixiviation n'ont pas réellement montré d'augmentation de la concentration de métaux au delà de la concentration naturelle déterminée lors de la caractérisation de la roche calcaire, confirmant qu'il n'y a pas eu relargage des métaux provenant des sédiments. Tel qu'attendu, les concentrations en métaux dans les eaux percolées à toujours été sous la limite de détection. Par conséquent, la couche calcaire n'as pas été nécessaire pour la rétention des métaux, mais elle reste une bonne barrière apportant une sécurité supplémentaire.

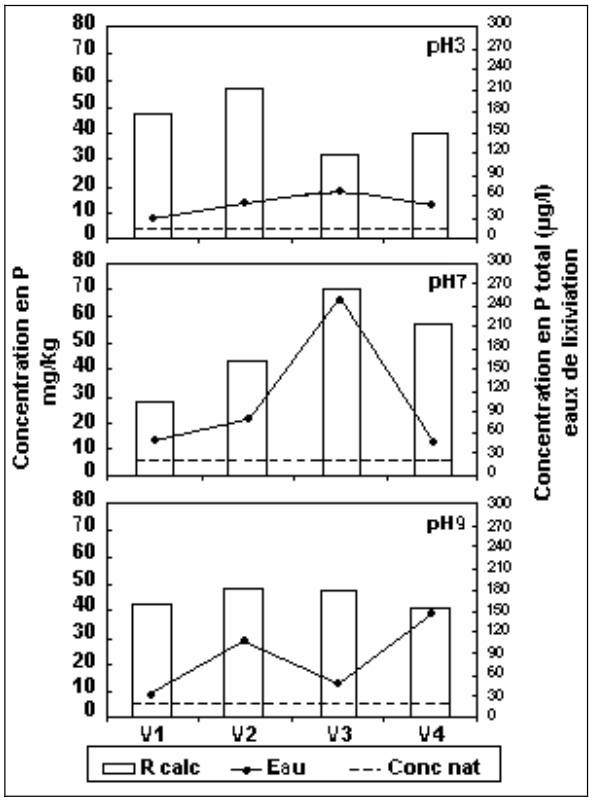
4.2.3 Evaluation de l'influence du pH et du volume de vide sur la rétention de phosphore

La Figure 6 montre l'efficacité de la couche (de 1 cm d'épaisseur) à retenir le phosphore. Elle présente les résultats de l'analyse en phosphore de la calcite et des eaux percolées. Sur chaque graphique, la concentration naturelle en phosphore est indiqué à but de comparaison. L'ensemble de la figure montre les résultats obtenus à différents pH et à différents volumes relatifs percolés.

La concentration naturelle de phosphore extractible de la roche calcaire était de l'ordre de 6,6 mg/kg. Les concentrations en phosphore trouvées dans des échantillons de calcite après les essais montrent des concentrations largement supérieures à celle de départ. Cela signifie qu'une quantité non négligeable de phosphore provenant des sédiments a été retenue à des degrés divers, selon le pH et le volume d'eau percolé. A pH 7 on constate une tendance à l'augmentation de la teneur en phosphore avec l'augmentation des volumes de pores. Dans le cas du pH 3, on n'observe pas de tendance particulière permettant d'expliquer les différentes concentrations en phosphore obtenues. Enfin, on dénote une certaine stabilité dans les concentrations retrouvées aux différents volumes d'eau écoulés.

Malgré la forte rétention de phosphore par la calcite, l'eau récupérée des essais présentait des concentrations en phosphore supérieures au seuil de qualité établit pour le MEV (70 µg/L). Aucune tendance n'a été observée quant au comportement de la concentration en phosphore dans les eaux de lixiviation en fonction du pH.

Figure 6. Quantité de phosphore retenue par la calcite vs quantité de phosphore dans les eaux percolées

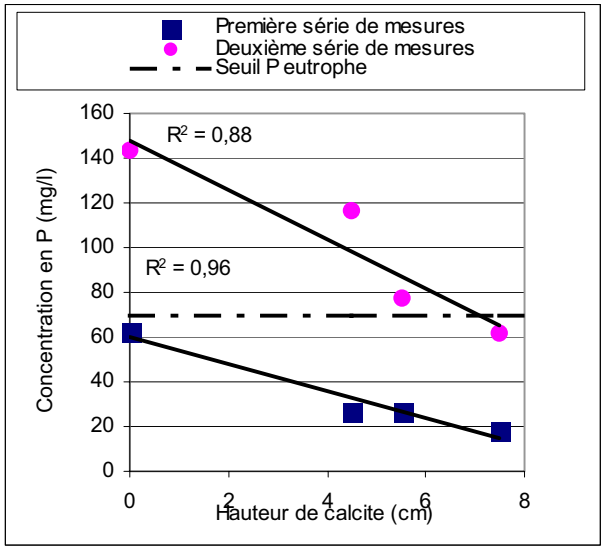


4.2.4 Influence de la hauteur de calcite et du temps de résidence l'efficacité de la couche de calcite

Les résultats de deux expériences visant à tester l'influence de la hauteur de calcite sur la rétention du phosphore et l'influence du temps de résidence sur la quantité de phosphore relargué sont montrés dans les deux figures suivantes. Dans le même dispositif que celui décrit antérieurement, on a testé quatre hauteurs de calcite sous des conditions de charge similaires. Etant donné qu'à pH 7 on a observé un relargage assez élevé, nous avons réalisé cette expérience au même pH. Pour la première expérience on a placé la même quantité de sédiments puis, on a ensuite placé le géotextile et différentes hauteurs de calcite avant d'ouvrir l'alimentation en eau. Les mesures ont été réalisées sur le premier volume d'eau écoulé (100 ml). A la fin de la première expérience, l'alimentation a été coupée pendant dix jours de manière à augmenter le temps de contact entre l'eau et les différentes couches du dispositif. Au bout de dix jours, l'alimentation à été ouverte pour débuter la deuxième expérience. Au bout de ce deuxième essai, une autre série d'échantillons de 100ml a été prélevé et analysé.

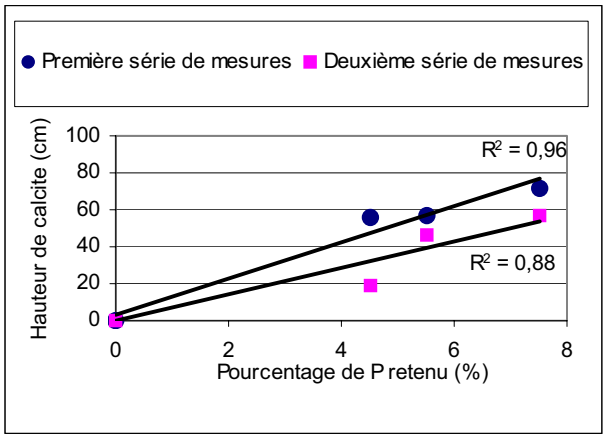
Les résultats de la première expérience (Figure 7) indiquent qu'à la sortie des cellules témoins (cellule ou la hauteur de calcite est nulle), on constate un important relargage de phosphore provenant des sédiments. Ce relargage est d'ailleurs plus important dans le cas d'un temps de séjour plus long (deuxième série de mesures), la concentration passe alors de 60 mg/l à 145mg/l. On peut aussi noter la diminution de phosphore relargué lorsque l'on augmente la hauteur de calcite. Ces deux paramètres semblent être reliés par une relation linéaire.

Figure 7. Concentration en P dans les eaux percolées en fonction de la hauteur de calcite



La Figure 8 présente le comportement de la couche de recouvrement en terme d'efficacité. Elle montre ici aussi une relation linéaire entre le pourcentage de phosphore retenu et la hauteur de calcite. Ainsi, lorsque cette dernière augmente, on constate un accroissement dans l'efficacité de la couche.

Figure 8. Pourcentage de P retenu vs hauteur de calcite



Dans un deuxième temps, lorsque l'on considère les pentes des droites obtenues, on constate que l'efficacité de la couche de recouvrement est influencée par la concentration de phosphore relargué par les sédiments. Plus la concentration en phosphore augmente à l'entrée de la couche de calcite, plus l'efficacité semble chuter. Un temps de résidence plus long fait diminuer l'efficacité de la couche

5. DISCUSSION ET CONCLUSION

Les essais réalisés dans le cadre de ce projet ont permis d'étudier le comportement des métaux lourds et du phosphore en fonction du pH et du volume d'eau écoulé à travers les sédiments. L'application d'une démarche expérimentale a permis d'acquérir une compréhension des mécanismes qui participent à la rétention des métaux lourds et du phosphore dans les sédiments du lac Saint-Augustin.

Les résultats, obtenus expérimentalement ont permis de comparer les critères de qualité avec les concentrations totales en métaux lourds présents dans les sédiments. Quatre métaux lourds ont été identifiés comme étant ceux surpassant le critère de qualité d'effet mineur (SEM) du Centre d'Action Saint-Laurent 1996. Ces métaux sont en ordre de concentration décroissant, le Cd, le Cu le Pb et le Zn. Cependant, le Ni, le Cr, le Hg et As ont été identifiés, mais en concentrations inférieures au seuil d'effet mineur.

Les quatre métaux lourds identifiés comme polluants présentent des patrons de distribution géochimique variés. Le Cd est principalement associé aux carbonates. Le Cu est fortement associé à la matière organique. Le Pb montre une association marquée avec la fraction oxyd/hydroxyd. Seul le Zn présente une association équilibrée de toutes les fractions. Le patron de distribution géochimique du Cd a varié fortement avec le volume d'eau écoulé à travers les sédiments. La fraction résiduelle et la fraction de carbonates ont diminué sensiblement. L'apparition de la fraction oxydes/hydroxydes a équilibré cette diminution. Pour les trois autres métaux, le patron de distribution n'a pas montré de variations significatives, ce qui signifie que le Cd est le métal le plus sensible à changer de ligands de distribution.

La CEC des sédiments varie entre 15,3 et 22,9 ; ces valeurs relativement élevés peuvent s'expliquer par la présence de matière organique. Yong *et al.,*(1990) mentionnent que la capacité tampon des sols est très influencée par la teneur en carbonates et les valeurs de CEC des sols. L'absence de métaux lourds dans l'eau interstitielle, dans l'eau du lac et dans les eaux de lixiviation des essais, et la forte CEC des sédiments supportent les résultats d'ESS indiquant une forte rétention des métaux lourds par la phase solide des sédiments. Les résultats obtenus montrent une bonne capacité des sédiments à retenir les cations, ce qui peut expliquer la présence à de forte concentration de ces derniers.

Le phosphore a été détecté dans l'eau du lac et dans l'eau souterraine à des concentrations supérieures au seuil de qualité du Ministère de l'Environnement du Québec. De fortes concentrations de phosphore ont aussi été trouvées dans les sédiments du lac. Les essais de lixiviation ont cependant montré que contrairement aux métaux, une grande quantité de P peut être relarguée et que ce relargage est affecté par le volume d'eau percolée et plus légèrement par le pH.

Les essais de lixiviation en colonnes ont permis d'évaluer l'efficacité de rétention des contaminants par la roche calcaire. Trois échantillons de roche calcaire ont présenté après essais un gain en Zn et en Cu, indiquant un faible relargage de ces métaux par les sédiments. Cependant la roche calcaire a efficacement retenu les métaux relargués à tel point que dans les eaux de lixiviation récupérées, aucun métal n'a été détecté. D'autre part de forts gains de concentrations en phosphore extractible ont été mesurés dans le calcaire pour tous les essais. Ceci signifie que le phosphore présent dans les sédiments est facilement solubilisé et transporté. La couche de calcaire a adsorbé une forte proportion de phosphore extractible libéré par les sédiments. Une concentration en phosphore de huit fois la concentration naturelle de la roche calcaire a été mesurée après les essais de lixiviation. La forte charge en phosphore des sédiments a empêché la roche calcaire d'adsorber la totalité de phosphore relargué.

Les analyses des eaux de lixiviation des différents essais ont montré que la plupart des échantillons ont surpassé le seuil de qualité de 30 µg de P total/l. L'épaisseur de un centimètre de la roche calcaire n'a été pas suffisante pour adsorber la totalité du phosphore. Les études complémentaires sur l'influence de la hauteur de calcite sur la capacité de rétention ont montré qu'il existe une relation linéaire entre ces deux paramètres. Ainsi, dans le cadre de la première expérience, une hauteur de 6 cm devrait être nécessaire à réduire le relargage de phosphore à 70 µg de P total/l (seuil P eutrophe pour un lac) et une hauteur de couche de 7,5 cm abaisserait la

concentration en phosphore des eaux de lixiviation en dessous du seuil de qualité du Centre d'Action Saint-Laurent. Autre remarque, la concentration de contaminants a la sortie des sédiments va dépendre du temps de résidence dans les sédiments et donc de la hauteur de sédiments traversés. Sur le terrain, l'épaisseur de sédiments est largement supérieure à celle utilisée pour la simulation. Le temps de résidence des eaux souterraines dans les sédiments plus long va engendrer une concentration en phosphore plus grande à la sortie de la couche de sédiments va avoir une influence négative sur l'efficacité de la couche de recouvrement.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la compagnie EXXEP Env, le CRSNG et la ville de Québec pour l'aide financière apportée à ce projet

7. REFERENCES

Brin M.E. et Dominguez G. 2002. Diagnostique de la qualité du lac Saint-Augustin (volet sédiments contaminés), Université Laval, 46 p.

Centre Saint-Laurent. 1996. Rapport synthèse sur l'état du St Laurent. Volume 1 : L'écosystème du St-Laurent. Environnement Canada- Région du Québec, Conservation de l'environnement et Éditions MultiMondes, Montréal.

Hendershot W.H., Lalande H. and Duquette M. 1993. Soil reaction and exchangeable acidity. Soil sampling methods analytical, p. 141-145.

Yong, R. N., Galvez-Cloutier R. and Phandungchewuit Y, 1993. Selective sequential extraction analysis of heavy-metal retention in soil. Can. Geotech. J. 30: 834-847

AWWA. 1985. Standard Methods for Examination of Wastewater, 16^{e} Edition