

L'eutrophisation des lacs et les mesures d'atténuation et de restauration

Louis Roy

Saint-Georges, 3 mars 2015

*Développement durable,
Environnement et Lutte
contre les changements
climatiques*

Québec 

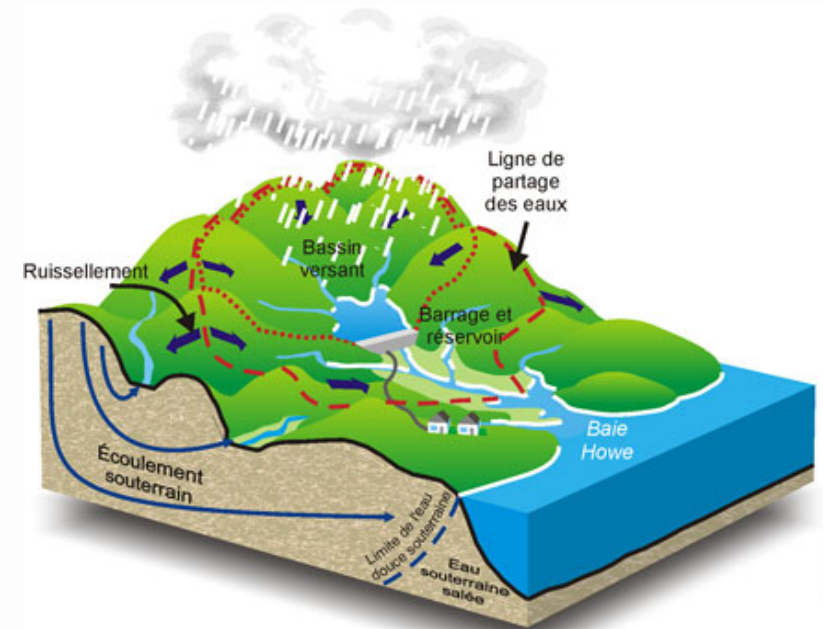
Contenu de la présentation

Eutrophisation

- Notions
- La modélisation de l'eutrophisation
- Constats

Restauration

- Contexte
- Approches / techniques
- Constats



Notions

- L'état de santé des lacs est utilisé par analogie à la santé humaine
- En écologie des lacs, il n'y a pas qu'un seul bon état de fonctionnement régulier et harmonieux des écosystèmes, il y a surtout des caractéristiques différentes (ex. lacs à eau limpide vs étangs)

Notions

- **Diagnose (biologie et écologie) :**
 - Connaissance qui s'acquiert par l'observation
 - Détermination des caractéristiques
 - **Diagnostic :**
 - Détermination d'après les symptômes
 - Jugement tiré de l'analyse des signes
- Alors le diagnostic de la santé d'un lac se juge à l'état de caractéristiques, mais lesquelles?

Notions

- **Variables**

- Physico-chimiques
 - Concentration et mesure
PT, Chlo a , Secchi, COD
Profils T°, pH, OD, Cond...
- Biologiques
 - Abondance, composition...
Périphyton, macrophytes, poissons...
- Physiques
 - Levée, mesure...
Substrat, bathymétrie...
- Contaminants/pathogènes
 - Présence, concentration...
Bactériologie, Cyanobactéries et cyanotoxines...

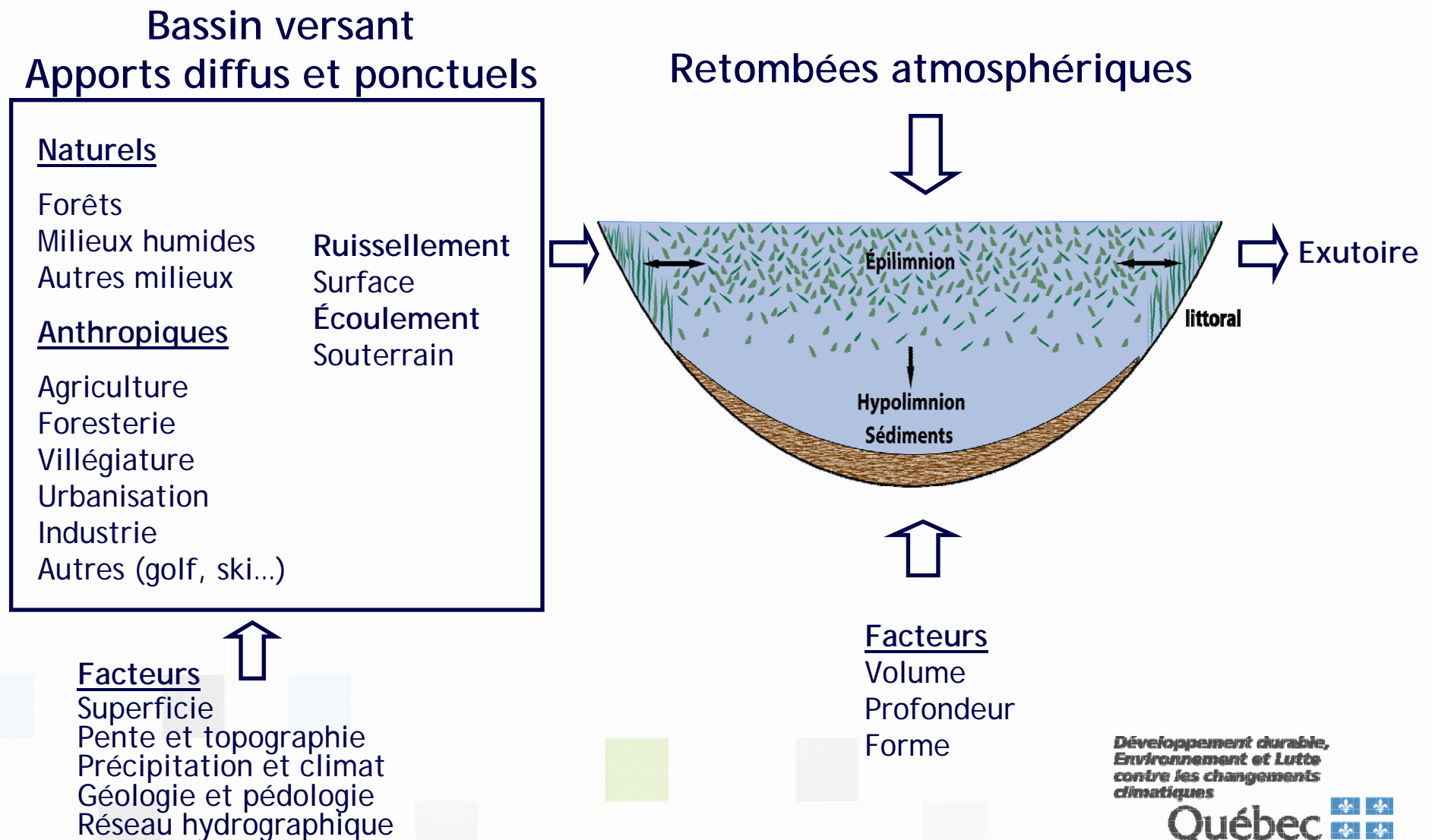
Problématiques/objectifs

- Intégrité écologique
- Usages, santé humaine
- Acidification
- Contamination toxique
- Pêche et habitat du poisson
- **Eutrophisation**

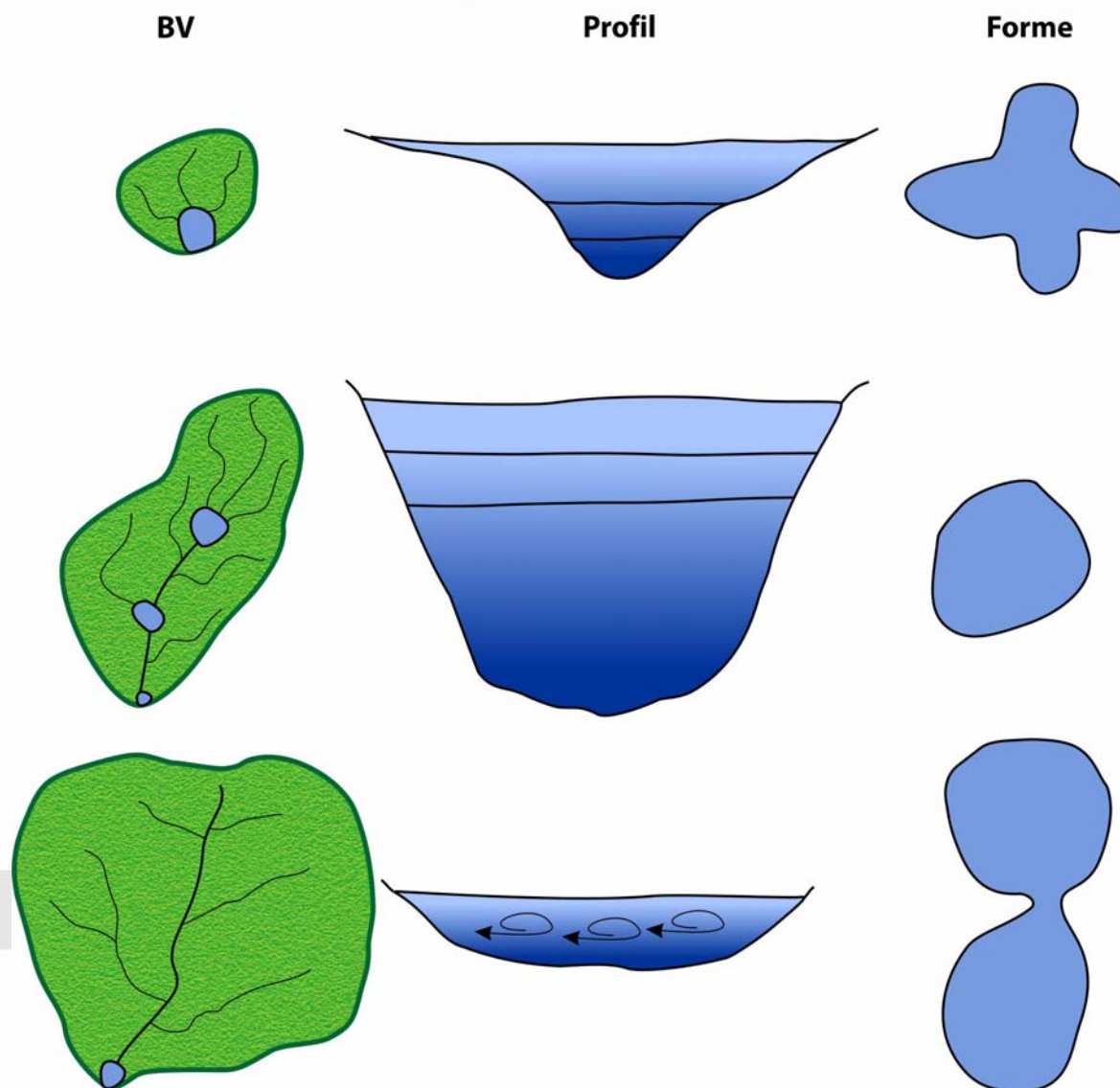
Notions

- Comment juge-t-on si les caractéristiques reflètent un bon ou un mauvais état?
- Deux grandes approches :
 - État de référence pour comparer (ex. plus grande abondance des plantes aquatiques)
 - Critères et seuils en fonction
 - De risques ou d'effets non souhaités (ex. baignade)
 - De conditions à conserver (ex. diversité des écosystèmes)
- Peut impliquer des objectifs de qualité relatifs :
 - Variabilité de ce qui est acceptable
 - Conflit d'usage

Modèle conceptuel de l'eutrophisation



L'eutrophisation : facteurs naturels



*Développement durable,
Environnement et Lutte
contre les changements
climatiques*

Québec 

Notions

- Le **phosphore** est l'élément nutritif qui **contrôle** habituellement l'eutrophisation
 - Élément le moins abondant par rapport aux besoins des algues et des plantes aquatiques
- Un modèle est une représentation simplifiée d'un système complexe, mais qui doit néanmoins être représentative, juste et relativement précise
- La modélisation de l'eutrophisation consiste à élaborer des modèles **expliquant et quantifiant** les apports en phosphore et les effets dans les lacs

Historique au Québec

- **Avant 2002**

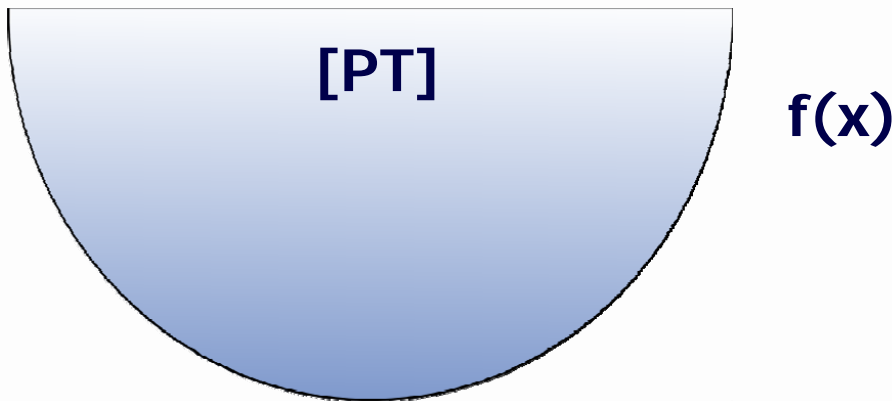
- Aucune modélisation empirique
- Utilisation des modèles explicites (Dillon et Trophic Status Model (TSM) développés dans le cadre du Lake shore capacity study (Ontario) ou des adaptations (Alain et Lerouzes) sans étude de corroboration (validation)

- **Depuis 2002**

- Travaux de recherche de R. Carignan et Y. Prairie pour développer des modèles calibrés à nos ensembles de lacs
- Plusieurs projets pilotes de corroboration
- Plusieurs modélisations de lacs de qualité variable par divers intervenants

Modélisation empirique

- Relier statistiquement la **[PT]** aux caractéristiques des bassins versants (modèle de régression multiple)



Variables décrivant l'utilisation du territoire

Exemples :

- Superficie en forêts et en milieux humides
- Nombre d'habitations

Variables décrivant le paysage et la morphologie du lac

Exemples :

- Pente moyenne bassin
- Volume du lac

Variables combinées ou de remplacement

Exemples :

- Nombre d'habitations/volume lac
- [COD]

Développement de modèles : aperçu des résultats

Modèles empiriques

➤ **Estrie** (milieu diversifié)

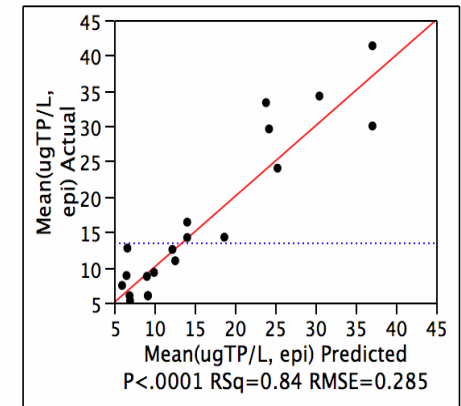
Un seul modèle significatif

(-pente moyenne, +% du bassin déboisé)

$$\text{Log}_{10} [\text{PT}] = 0,92 - (0,028 \times \text{Pente}^\circ) + (0,010 \times \% \text{ pâturage})$$

$$R^2 = 0,84$$

$$\text{ET} \pm 3 \mu\text{g/l}$$



➤ **Laurentides** (milieu de villégiature)

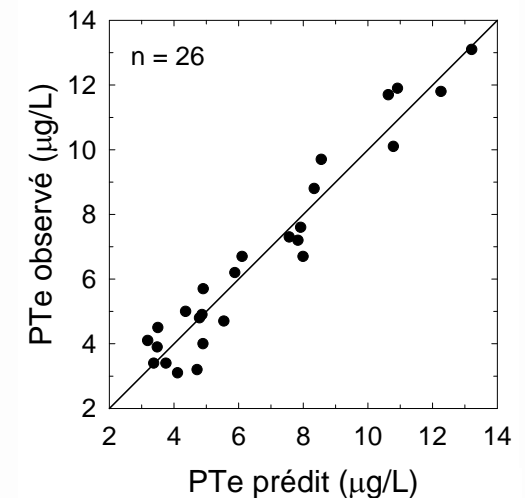
Plusieurs modèles significatifs

(importance des habitations 100 m, milieux humides et milieux ouverts)

$$[\text{PTe}] = 0,09 \pm 0,050 + 1,20 \pm 0,13 (\text{CODe}) + 52\,236 \pm 5516 (\text{batim } 100/\text{Vol}) + 1,49 \pm 0,71 (\text{MOUV}/\text{Vol})$$

$$R^2 = 0,93$$

$$\text{ET} \pm 0,8 \mu\text{g/l}$$



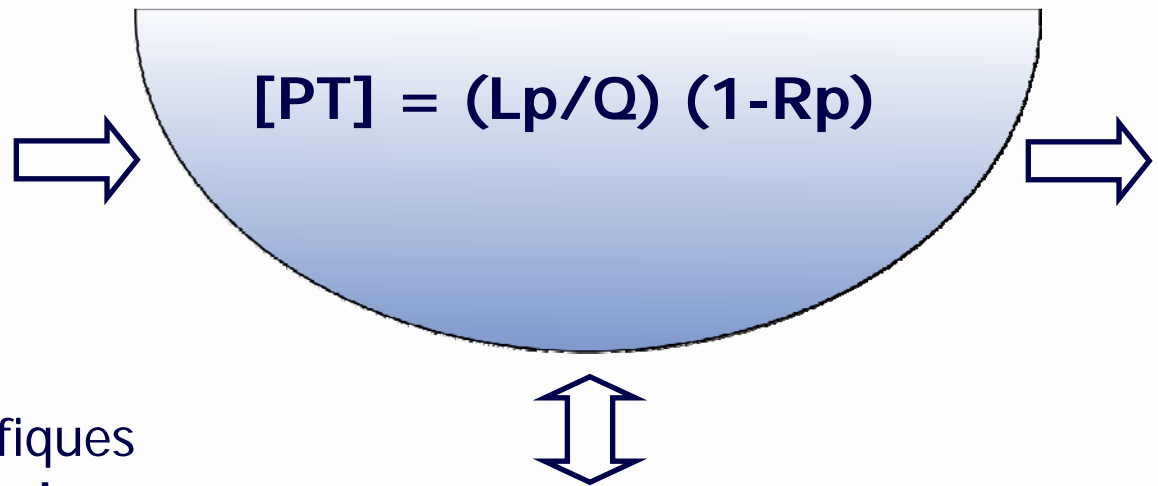
Modèle explicite semi-empirique

Bilan de masse : $q_t P = P_{\text{apport}} - P_{\text{sortie}} - P_{\text{sédimente}}$

Q = Charge en eau

L_p = Charge en phosphore

→ Somme des charges spécifiques
(coefficients d'exportation de la
littérature ou déterminés
empiriquement ou bilans mesurés)



R_p = Coefficient de rétention lacustre
(basé sur modèle de rétention déterminé
empiriquement ou bilan mesuré)

*Développement durable,
Environnement et Lutte
contre les changements
climatiques*

Québec 

Développement de modèles : aperçu des résultats

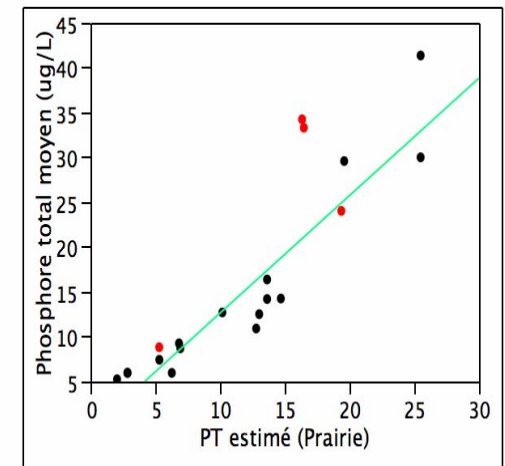
Modèle explicite

➤ Estrie

Moins bien ajusté que le modèle empirique

$$R^2 = 0,87$$

$$ET \pm 4 \mu\text{g/l}$$

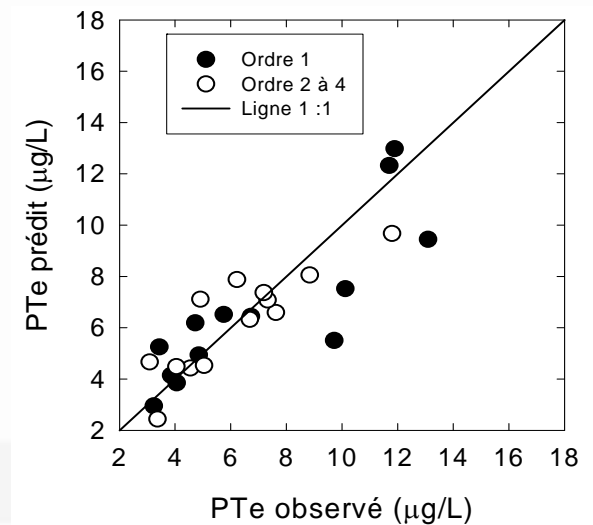


➤ Laurentides

Moins précis que les modèles empiriques

$$R^2 = 0,72$$

$$ET \pm 1,4 \mu\text{g/l}$$

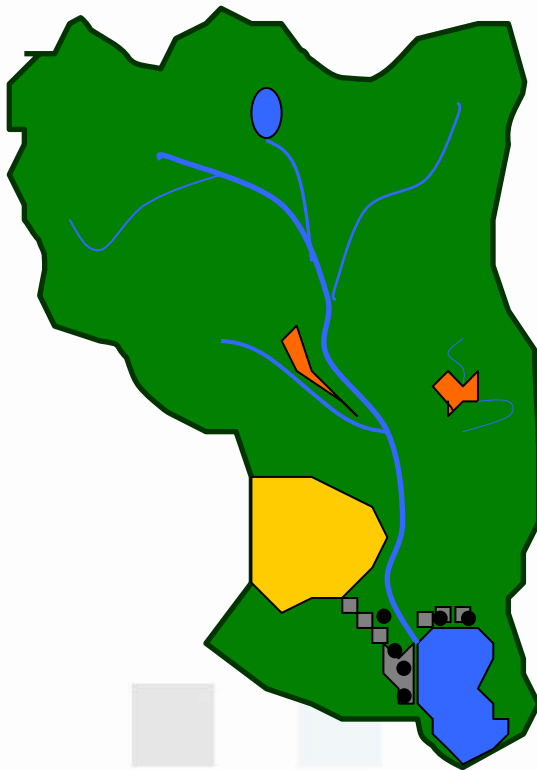








Modélisation du phosphore dans les lacs des Laurentides : modèle explicite semi-empirique

- Lp :
 - Utilisation des coefficients déterminés empiriquement par R. Carignan et adaptés selon les connaissances de la littérature scientifique
 - Types de milieux humides
 - Résidences isolées f(x) occupation, type d'installation, type de sol, distance
 - Ajouts d'utilisation du territoire
- Q :
 - MDDELCC, estimation basée sur modèle précipitation/évapotranspiration
 - Répertoire hydrologique du Canada (moyenne régionale précipitation/évapotranspiration)
 - Inférence de stations hydrométriques du CEHQ
- Rp :
 - Modèle de Larsen et Mercier (1976) : $R_p = (1/(1 + 1/\tau^{0,5}))$
 - Utiliser les modèles basés sur le Qs (sans le volume du lac) uniquement à titre de comparaison

Modélisation du phosphore dans les lacs des Laurentides

Bassin versant



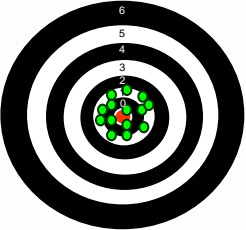

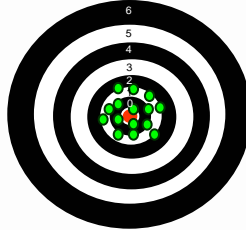
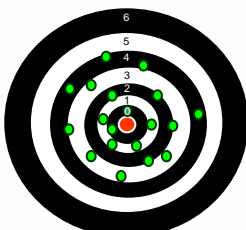
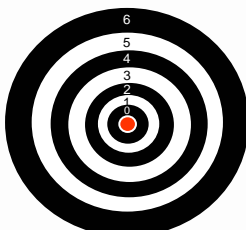
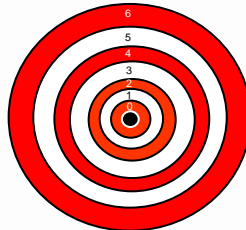
Utilisation du territoire	Superficie km ²	Coef. Exp. P Kg/km ² /an	Charge P kg/an
Forêts 	85	4,9	416,5
Milieux humides 	3	125	375
Milieux ouverts 	1	11,3	11,3
Zones agricoles 	6	52,8	316,8
Lacs et rivières 	5	6,0	30
Humains 	-	-	75
Total	100	-	1224,6

*Développement durable,
Environnement et Lutte
contre les changements
climatiques*

Limites à la modélisation : l'incertitude

- L'incertitude est omniprésente en modélisation
- L'évaluation de l'incertitude est essentielle à l'utilisation judicieuse des modèles
- Il y a trois composantes à l'incertitude : **la justesse, la précision et la représentativité**
- La prise en compte de l'incertitude peut être difficile

Limites à la modélisation

Justesse		
Précision		
Représentativité		

Limites à la modélisation : justesse

- Les facteurs à prendre en compte :
 - La géographie et les ensembles physiographiques (climat, topographie, géologie, pédologie, ...);
 - L'utilisation du territoire;
 - Les caractéristiques des lacs :
 - La morphologie
 - La stratification
 - L'état d'oxygénation de l'hypolimnion
 - Les lacs calcaires vs lacs non calcaires
 - L'ordre

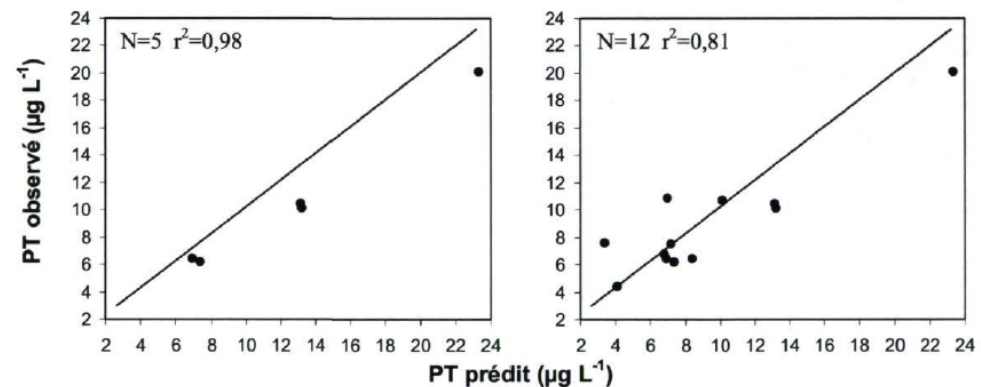
Modélisation : ajustement et corroboration

- Ajustement et corroboration des modèles sur un **ensemble de lacs**
- Simulations différentes selon :
 - Les paramètres de modélisation
 - Des ensembles de lacs

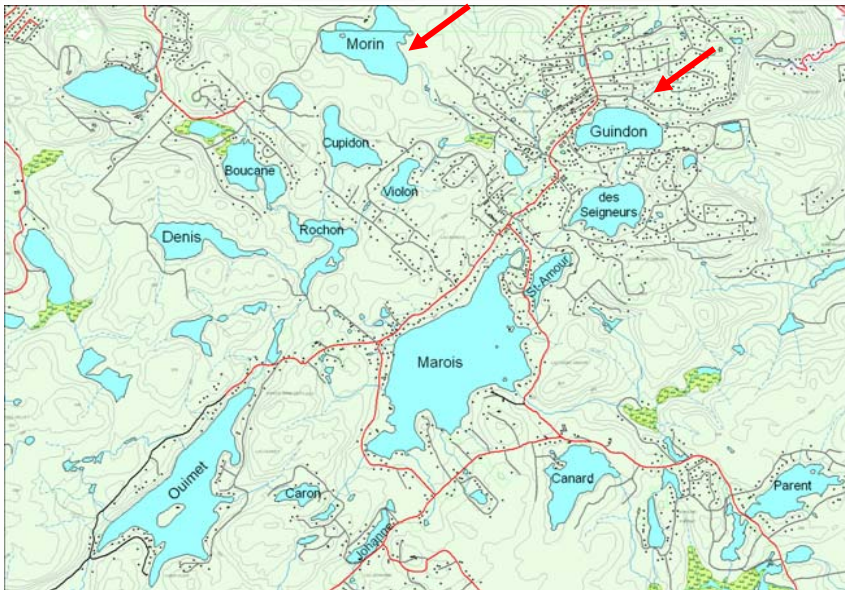
Simulation	Coefficient d'exportation des sources diffuses	Coefficient d'exportation des installations sanitaires individuelles	Résultats N = 5	Résultats N = 12
Simulation 1	MDDEP	MDDEP	$y = 0,8x - 0,22$ $r^2 = 0,98$ ***	$y = 0,7x + 2,6$ $r^2 = 0,81$ ***
Simulation 2	Carignan et al.	MDDEP	$y = 1,3x - 1,3$ $r^2 = 0,78$	$y = 1,0x + 1,7$ $r^2 = 0,68$ **
Simulation 3	Carignan et al. (non publié)	Carignan et al. (non publié)	$y = 2,4x - 6,1$ $r^2 = 0,94$	$y = 1,5x - 0,4$ $r^2 = 0,60$ **
Simulation 4	Dillon et al. (1994)	Dillon et al. (1994)	$y = 0,3x + 4,0$ $r^2 = 0,66$	$y = 0,2x + 4,1$ $r^2 = 0,33$
Simulation 5	Dillon et al. (1994)	MDDEP	$y = 2,5x - 8,2$ $r^2 = 0,71$	$y = 1,5x - 0,3$ $r^2 = 0,60$ **

** $p < 0,01$. *** $p < 0,001$.

Simulation 1



Limites à la modélisation : la représentativité



Lac Morin [6 µg/l]



Lac Guindon [6 µg/l]

Le suivi et la modélisation de [P] dans la zone limnétique ne rendent pas toujours compte de l'eutrophisation observée dans le littoral.

Source : R. Carignan, Université de Montréal

contre les changements
climatiques

Québec 

Utilisation possible des modèles actuels

Usage	Empirique	Explicite
Prédire la valeur actuelle de PT	+	+ -
Expliquer l'eutrophisation	++	+
Modéliser la concentration de PT naturelle	+	+ -
Évaluer la sensibilité des lacs à l'eutrophisation	-	+
Identifier l'importance relative des sources de PT dans le BV	--	++
Établir un plan de réduction de charge en PT	-	+
Modéliser la concentration de PT pour différents scénarios de développement	-	+ -
Modéliser avec précision l'aménagement du territoire	--	--

Capacité de support

- La capacité de support est la pression maximale qui peut être exercée sur un écosystème sans porter atteinte à son intégrité
- Eutrophisation des lacs : la charge en phosphore (de source anthropique) qui n'induirait pas d'effets non souhaités et des pertes d'usage
- La prise en compte de la capacité de support implique que l'on puisse porter un jugement sur ce qui est souhaitable
- L'analyse repose sur des critères et méthodes d'évaluation
- La modélisation permet de situer l'effet de scénarios de charge par rapport à des critères et des effets dans le milieu

Capacité de support

- Le critère guide actuel (50 % d'augmentation sans dépasser 10 ou 20 $\mu\text{g/l}$) ne permet pas la prévention de l'eutrophisation, mais autorise une certaine eutrophisation
- Pistes à explorer :
 - Peut-on avoir un critère universel?
 - Doit-on gérer le P en fonction de la sensibilité du milieu, du niveau d'eutrophisation acceptable et de la protection des usages?
 - Comment gérer avec d'autres indicateurs d'eutrophisation?

Constats importants

- La modélisation a une part de science et une part de savoir-faire. Il faut bien décrire et justifier les modèles, paramètres et méthodes utilisés et il faut avoir un regard critique sur la représentativité, la justesse et la précision des résultats.
- Il est possible d'améliorer les paramètres de modélisation à partir de connaissances spécifiques aux sites (coefficients de rétention, charges mesurées, etc.), mais il est important d'expliquer, justifier et appuyer ces modifications sur des bases scientifiques solides.

Restauration - contexte

- Prise de conscience du phénomène d'eutrophisation (cyanobactéries, accumulation de sédiments, plantes aquatiques, etc.)
- Riverains et municipalités à la recherche de solutions
- Réception de plusieurs demandes d'intervention dans les lacs (riverains, municipalités, promoteurs de technologies)

Restauration - contexte

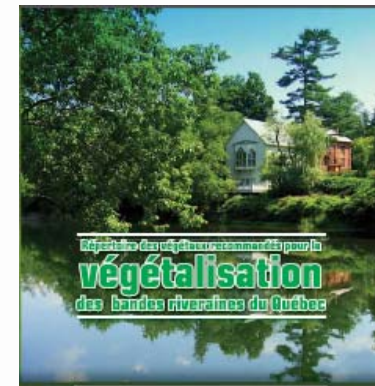
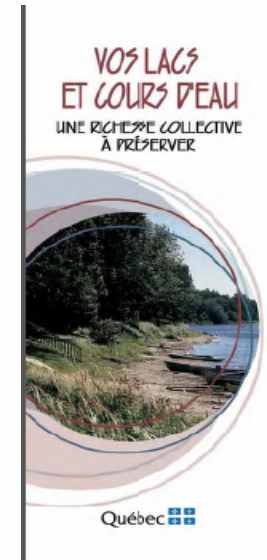
- **On sent le besoin d'agir : quelles actions mettre en œuvre?**
- **Orientations privilégiées :**
 - Promouvoir les **actions de prévention** et de **réduction des apports de nutriments** provenant du bassin versant du lac;
 - Capter le phosphore **le plus près possible des sources de nutriments**, avant qu'il n'atteigne le lac;
 - Intervenir dans les lacs : **en dernier recours.**

Restauration - justification

- **Raisons « acceptables » d'intervenir avec des technologies :**
 - **Récupérer un usage** : prise d'eau potable, baignade (contact direct) et autres activités récréatives;
 - **Charge interne** de phosphore (le lac s'autonourrit).
- **Aucune solution miracle :**
 - Pas de réhabilitation si l'apport de nutriments n'est pas contrôlé;
 - Les interventions ne sont pas une approche de gestion.
- **Aucune solution universelle et facile** : chaque lac est un cas unique.

Importance des bonnes pratiques

- Résidence et citoyen
- Municipal
- Agriculture
- Transport
- Foresterie



Restauration – plusieurs techniques disponibles

- **Mécaniques** : faucardage, arrachage, enlèvement des sédiments etc.
- **Physiques** : oxygénation de l'hypolimnion, circulation de l'eau, filtration, ultrasons, etc.
- **Chimiques** : herbicides/algicides, adsorbants de nutriments (chlorure de fer et chlorure d'aluminium), etc.
- **Biologiques** : bioaugmentation (bactéries), îles flottantes, biomanipulation (introduction d'espèces), etc.

Diverses techniques pour diverses cibles

Agir sur les **manifestations**
de l'eutrophisation

Macrophytes

Faucardage
Arrachage
Charançon
Toiles géotextiles
Pompage des
sédiments

Cyanobactéries

Ultrasons
Bactéries lytiques
Cyanophages
Filtration

Agir sur l'**agent** causant
l'eutrophisation

Phosphore

Indirectes :
Oxygénation
Dilution

Directes :
Adsorbants (chlorure de
fer, aluminium, phoslock,
calcite et scories d'aciérie)
Évacuation des eaux
hypolimniques
Dragage des sédiments

Préoccupations soulevées par les nouvelles technologies

- **Efficacité** : réellement démontrée?
- **Coûts** : investissement justifié?
- **Impacts négatifs** potentiels
- **Longévité** de l'effet attendu du traitement et besoin de traitements récurrents
- Interférence avec les usages (ex. navigation)
- Comportement de la technologie dans les conditions du Québec
- Entretien de l'équipement et gestion du matériel à la fin de sa vie utile

Efficacité peu documentée

- **Techniques souvent conçues pour :**
 - de petits étangs
 - des eaux usées
- **Parfois testées en laboratoire**
 - dans des conditions différentes du milieu naturel
 - Exemple : [P] = 15 mg/L vs 0,03 mg/L en lac
- **Besoin de projet de démonstration *in situ***
 - vérifier l'efficacité en milieu naturel
 - vérifier les impacts négatifs potentiels

Actions entreprises au Ministère

- **Procédure d'évaluation des nouvelles technologies en trois étapes**

1. Évaluation préliminaire de **l'acceptabilité de la technologie** pour un projet de démonstration
2. Évaluation d'une demande de certificat d'autorisation pour **un projet de démonstration**
3. Évaluation de **l'efficacité et de l'acceptabilité environnementale** de la technologie

Actions entreprises au Ministère

- **Plan d'intervention sur les algues bleu vert 2007-2017 (plan gouvernemental)**
 - Action 1.4 : **Mettre en place des projets pilotes afin d'expérimenter diverses mesures de restauration de lacs, le tout dans des conditions diversifiées**

Objectifs des projets pilotes

- Soutenir la recherche de solutions à l'eutrophisation
- Soutenir les efforts des riverains dans leur démarche de réhabilitation de leur lac
- **Mettre en commun les connaissances et les expertises des divers acteurs de l'eau** : riverains, municipalités, MRC, OBV, chercheurs, consultants, analystes gouvernementaux, etc.
- Élaborer des procédures et concevoir des techniques de restauration
- **Développer un savoir-faire dans tout le processus de la restauration**

Techniques qui ont fait l'objet de projets

- **Chlorure de fer** : lac Heney
- **Ultrasons** : lac Saint-Louis et lac de l'Aqueduc
- **Marais filtrant** : [lac Brome et lac à l'Anguille](#)
- **Îles flottantes** : lac des Nations, lac de l'Est et lac à l'Anguille
- **Lentilles d'eau** : [lac Waterloo](#)
- **Calcite et aluminium** : [lac Saint-Augustin](#)
- **Enlèvement des sédiments (dragage)** : lac Trois Lacs, baie Charrette, [lac Waterloo et lac Saint-Augustin](#)
- **Scories d'aciérie** : tributaire du Petit lac Saint-François
- **Aération (diffuseur *Speece cone*)** : lac Carré
- **Aération (brassage)** : lac Hotte

Résultats des projets

- Présentés au deuxième atelier sur les projets de restauration de lac (juin 2013). Résultats en ligne
<http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/flrivlac/documentation.htm#projet-pilote>
- Résultats souvent mitigés
- Réalisation de projets dans de petits enclos :
 - Conditions différentes de celles du lac (milieu ouvert)
 - Biais; difficulté d'interpréter les résultats



L'avenir de la restauration des lacs

- Pas de solution miracle, efficace et économiquement abordable
- Pas de réhabilitation sans réduction des apports de nutriments
- Besoin de développer des liens entre le génie (technologie) et la biologie (limnologie)
- Municipalités et promoteurs :
 - **Difficulté de trouver le financement**
 - **Besoin de soutien scientifique et d'accompagnement**
- Besoin d'encadrement

L'avenir de la restauration des lacs

- L'approche des **cinq C** présentée par Pierre Beaudoin de Renaissance lac Brome :
 - **Citoyens** (accord et appropriation du projet par la communauté; projet de société)
 - **Connaissance** (du lac, du bassin versant et de la technologie)
 - **Cohérence** (schéma d'aménagement, PDE et règlements)
 - « **Cash** » (taxes, fonds spécial spécifique et partage des coûts)
 - **Concret** (objectifs clairs et actions ciblées)

En développement

- **Page Web sur la restauration de lacs**
 - Orientations pour la restauration de lacs
 - Fiches synthèses sur les technologies de restauration

Colliger l'information pertinente sur plusieurs techniques de restauration de lacs (principes, modalités d'utilisation, effets et résultats)

Bactéries

Chlorure de fer

Marais filtrants

Ultrasons

Dragage

Îles flottantes

« Phoslock »

Etc.

Merci!



*Développement durable,
Environnement et Lutte
contre les changements
climatiques*

Québec 