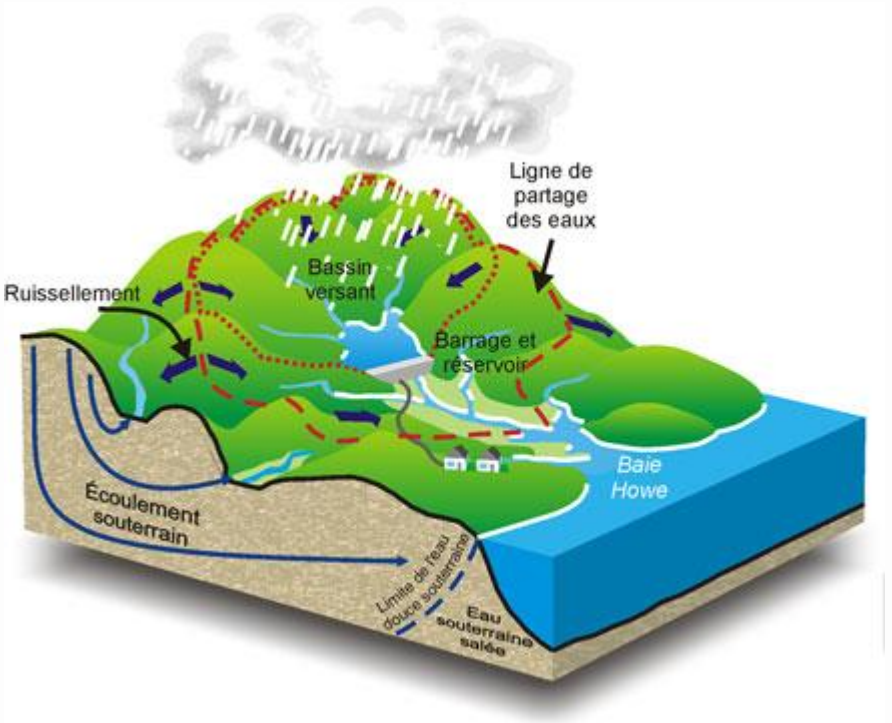
Modélisation et diagnostic de la santé des lacs

Louis Roy

Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques
Québec

Contenu de la présentation

- Concepts et prémisses
- Historique et R&D
- Les balises de la modélisation
- Limites et utilisation des modèles
- Constats et démarche en cours



Notions

- L'état de santé des lacs est utilisé par analogie à la santé humaine

- En écologie des lacs, il n'y 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…)
  - 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

Bassin versant
Apports diffus et ponctuels

Naturels

Forêts
Milieux humides
Autres milieux

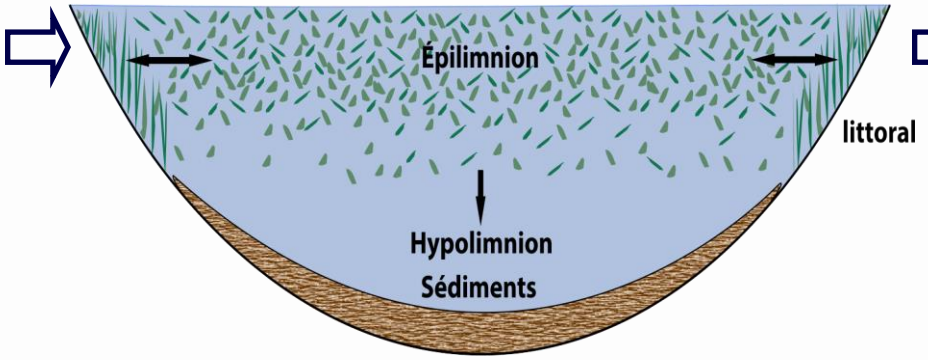
Anthropiques

Agriculture
Foresterie
Villégiature
Urbanisation
Industrie
Autres (golf, ski…)

Ruissellement
Surface
Écoulement
Souterrain

Facteurs
Superficie
Pente et topographie
Précipitation et climat
Géologie et pédologie
Réseau hydrographique

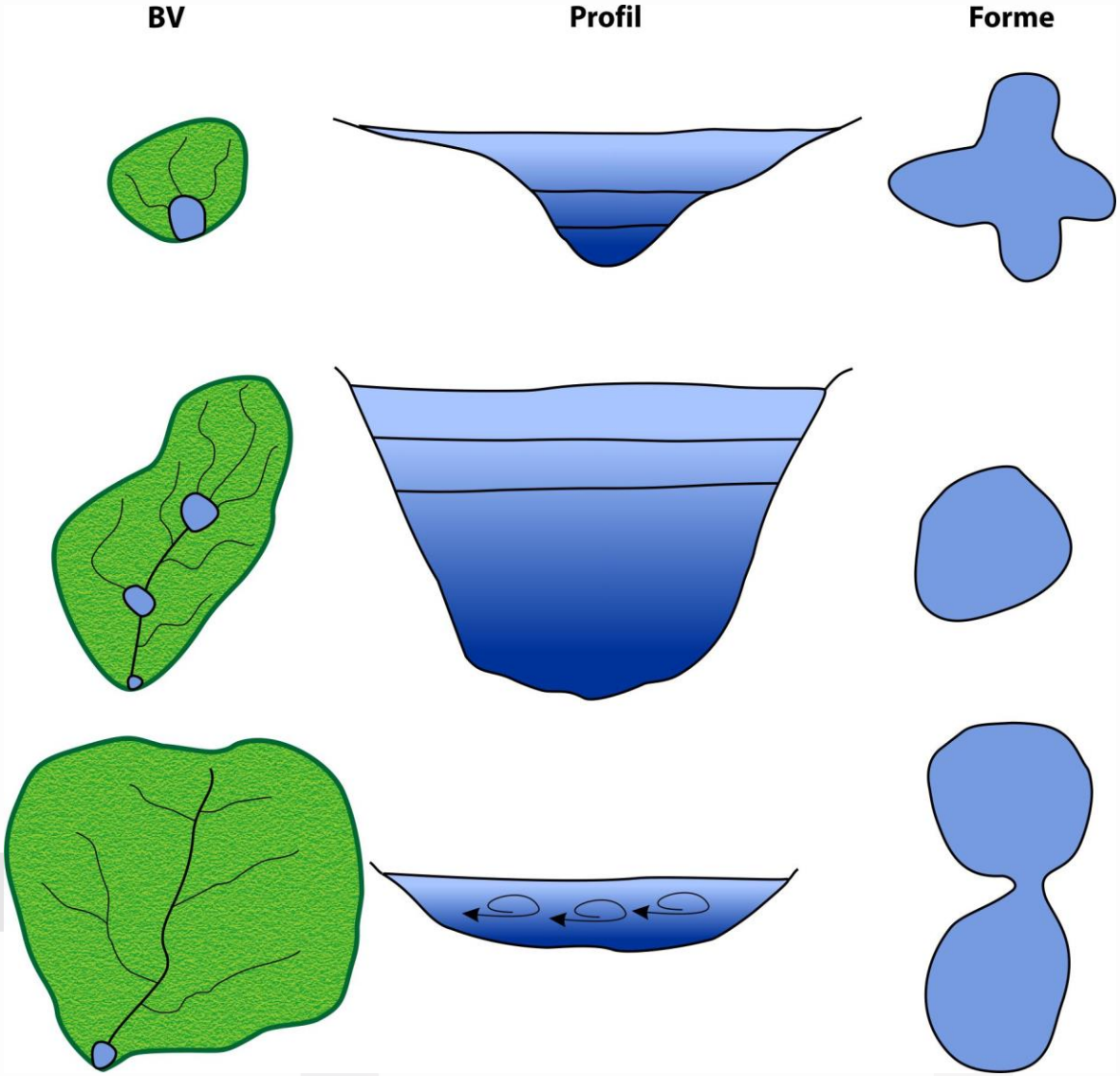
Retombées atmosphériques



Exutoire

Facteurs
Volume
Profondeur
Forme

L’eutrophisation : facteurs naturels



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

Approches à la modélisation

- Familles
  - Processus et charge (explicite, mécaniste, déterministe)
  - Empirique et charge (relation statistique)
  - Empirique milieu pression-réponse

- Niveau de complexité
  - Dimension(s) spatiale (s)
  - Dimension(s) temporelle (s) (statique vs dynamique)
  - Nombre de processus

Types de modèles retenus

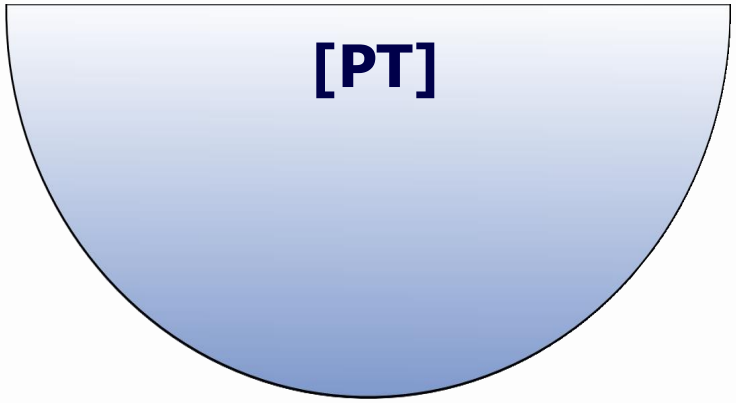
- Modèle empirique et modèle explicite semi-empirique basés sur la [PT] dans la zone limnétique
- Plus documentés, simple d'utilisation, exigent relativement peu de données
- Représentent les lacs comme des **réacteurs homogènes** (sans dimension spatiale) à **flux constant** (processus simple) et à **l'état d'équilibre** (stable dans le temps)
- Par contre la représentativité, la justesse et la précision sont plus incertaines

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)



f(x)

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

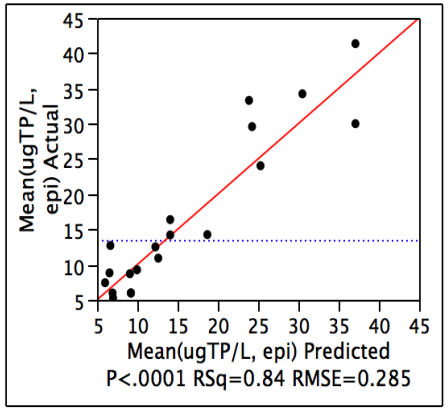
- **Estrie** (milieu diversifié)

  Un seul modèle significatif

  (-pente moyenne, +% du bassin déboisé)

  Log10 [PT] = 0,92 - (0,028 × Pente^{0}) + (0,010 × % pâturage)

R^2 = 0,84
ET ± 3 µg/l

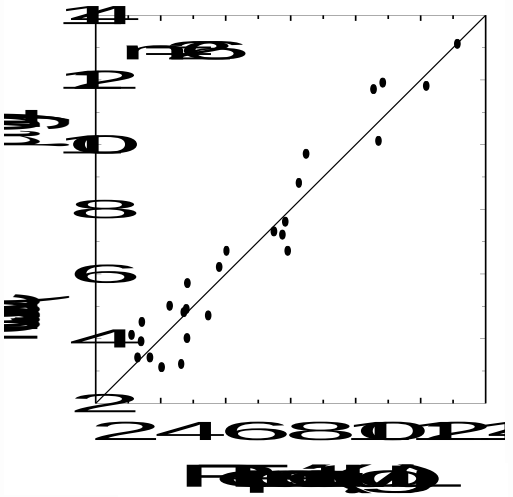


- **Laurentides** (milieu de villégiature)

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

  [PTe] = 0,09±0,050 + 1,20±0,13 (CODe) + 52 236±5516 (batim 100/Vol) + 1,49±0,71 (MOUV/Vol)

R^2 = 0,93
ET ± 0,8 µg/l

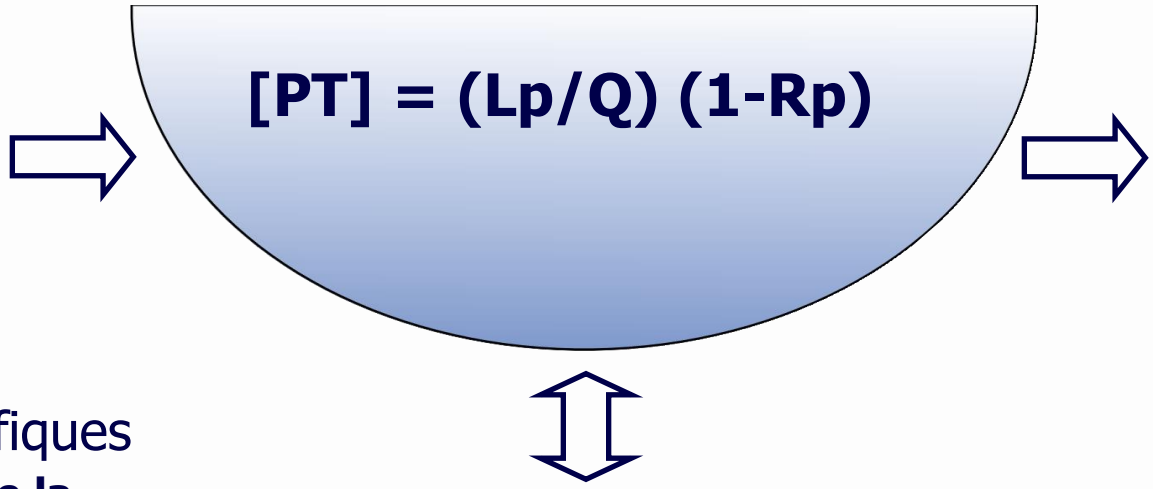


Modèle explicite semi-empirique

Bilan de masse : qt P = P apport – P sortie – P sédimente

Q = Charge en eau

Lp = Charge en phosphore



→ Somme des charges spécifiques

(coefficients d'exportation de la littérature ou déterminés empiriquement ou bilans mesurés)

Rp = Coefficient de rétention lacustre

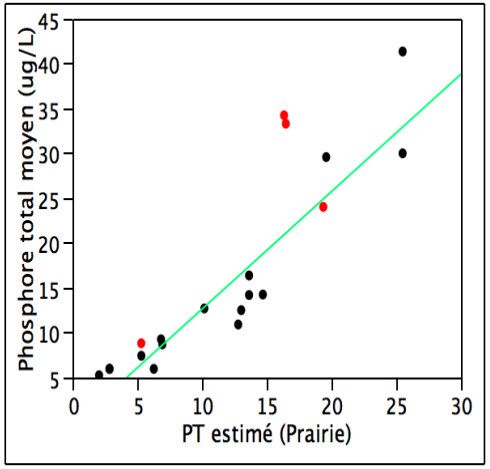
(basé sur modèle de rétention déterminés empiriquement ou bilan mesuré)

Développement de modèles : aperçu des résultats

Modèle explicite

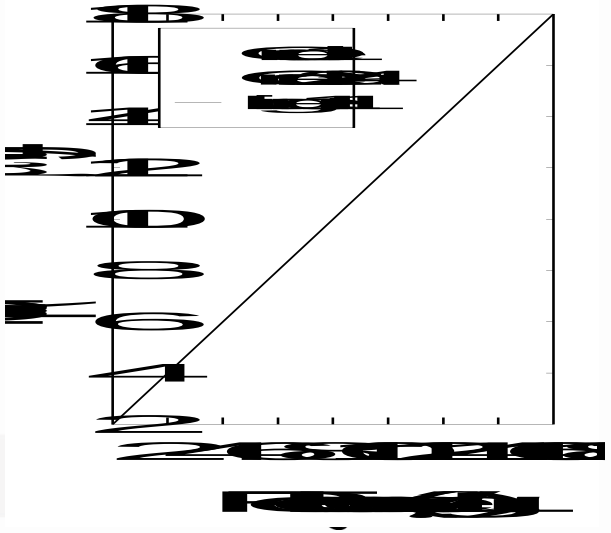
- **Estrie**
  Moins bien ajusté que le modèle empirique

$R^2 = 0,87$
ET ± 4 µg/l



- **Laurentides**
  Moins précis que les modèles empiriques

$R^2 = 0,72$
ET ± 1,4 µg/l

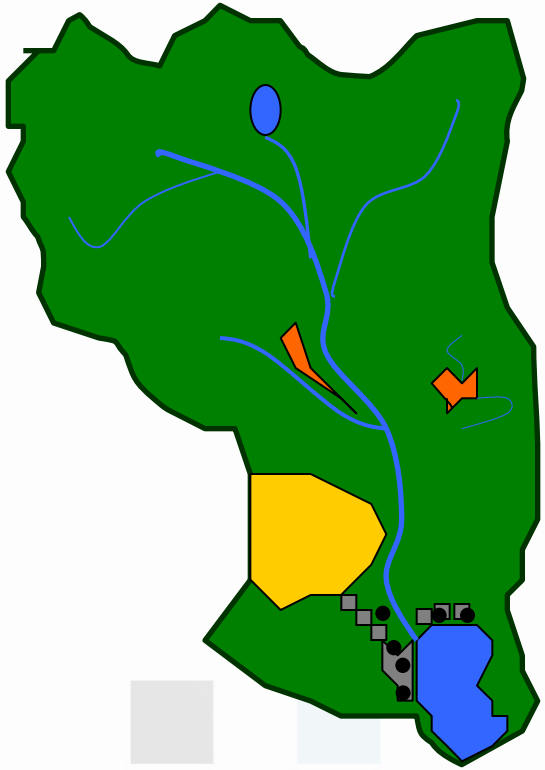


Modélisation du phosphore dans les lacs des Laurentides : modèle explicite semi-empirique

- 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) : $Rp = (1/(1 + 1/\tau^{0,5})$
  - 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 km²	Coef. Exp. P Kg/km²/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

Modélisation du phosphore dans les lacs des Laurentides : modèles empiriques

Équations	N	r^2 ajusté	SE µg/L
Lacs stratifiés et non stratifiés dont le volume est connu (L-8) PTe = 6,00±0,82 + 25 495±4 664(batim/VOL) + 25,04±4,38 (MHtopo/VOL) – 23,40±7,43 (MOUV100/VOL) + 0,15±0,06 (ZMOY)	28	0,82	1,6
Lacs stratifiés, profondeur moyenne ou volume inconnus (L-11) PTe = 1,95±0,78 + 3,47±1,24 (MHtopo/AL) + 0,0138±0,0026 (batim100/AL) + 0,21±0,08 (AD/AL+AAL)	26	0,73	1,6
Lacs stratifiés, volume et concentration en COD estival connus (L-12) PTe = 0,09±0,50 + 1,20±0,13 (CODe) + 52 236±5 516 (batim100/VOL) + 1,49±0,71 (MOUV/VOL)	26	0,93	0,8
Lacs dont le volume et la concentration en COD printanier sont connus (L-17) PTp = 6,61±1,51 + 0,97±0,21 (CODp) +11 757±2 516 (batim/VOL) - 0,0097±0,0033 (ALTBV)	27	0,77	1,2
Tous les lacs dont le volume est connu (L-19) PTa = 14,05±1,72 + 27,47±5,15 (MHtopo/VOL) – 0,227±0,067 (ZMOY) - 0,0153±0,0048 (ALTBV)	28	0,71	1,8
Tous les lacs où le volume et le COD annuel sont connus (L-22) PTa = 0,47±0,81 + 1,43±0,20 (CODa) + 16 488±2 947 (batim/VOL)	28	0,80	1,5
Lacs stratifiés où le volume et le COD annuel sont connus (L-24) PTa = 0,86±0,55 + 1,23±0,14 (CODa) + 47 562±6 180 (batim100/VOL)	25	0,88	0,9

AAL : Superficie des autres lacs dans le bassin versant (km2)

AD : Superficie drainée (BV – lacs, km2)

AL : Superficie du lac (km2)

AltBV : Élévation moyenne du bassin versant (m)

batim : Nombre de bâtiments (chalets + résidences) dans le bassin versant, corrigé selon les photographies aérien 2002 et 2004

batim100 : Nombre de bâtiments (chalets + résidences) dans un périmètre de 100 m du lac, corrigé selon les photographies aériennes de 2002 et 2004

MHtopo : Superficie des milieux humides dans le bassin versant incluant les étangs de castor, telle que définie p dernier inventaire de la BDTQ (1989 1992), (m2 ou km2)

MOUV : Superficie des milieux ouverts dans le bassin versant (km2)

MOUV100 : Superficie des milieux ouverts dans le bassin versant dans un périmètre de 100 m du lac (km2)

VOL : Volume du lac (m3)

Zmoy : Profondeur moyenne (m)

PTa : Moyenne annuelle (mai à novembre) du P total épilmnétique (µg/L)

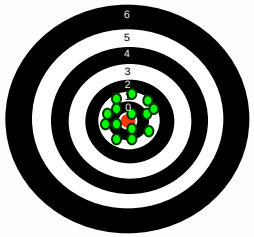
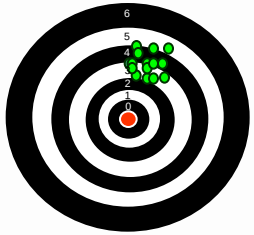
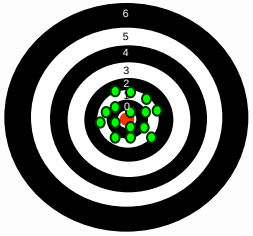
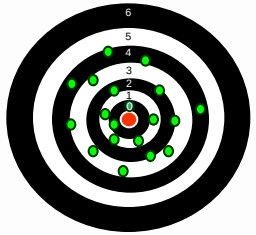
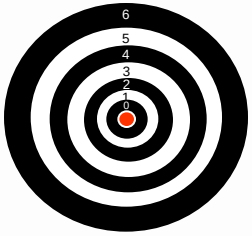
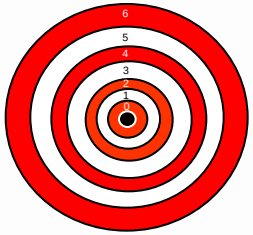
PTp : Moyenne printanière du P total épilimnétique (1er mai au 21 juin, µg/L)

PTe : Moyenne estivale du P total épilimnétique (21 juin au 21 septembre, µg/L)

Limites à la modélisation : l'incertitude

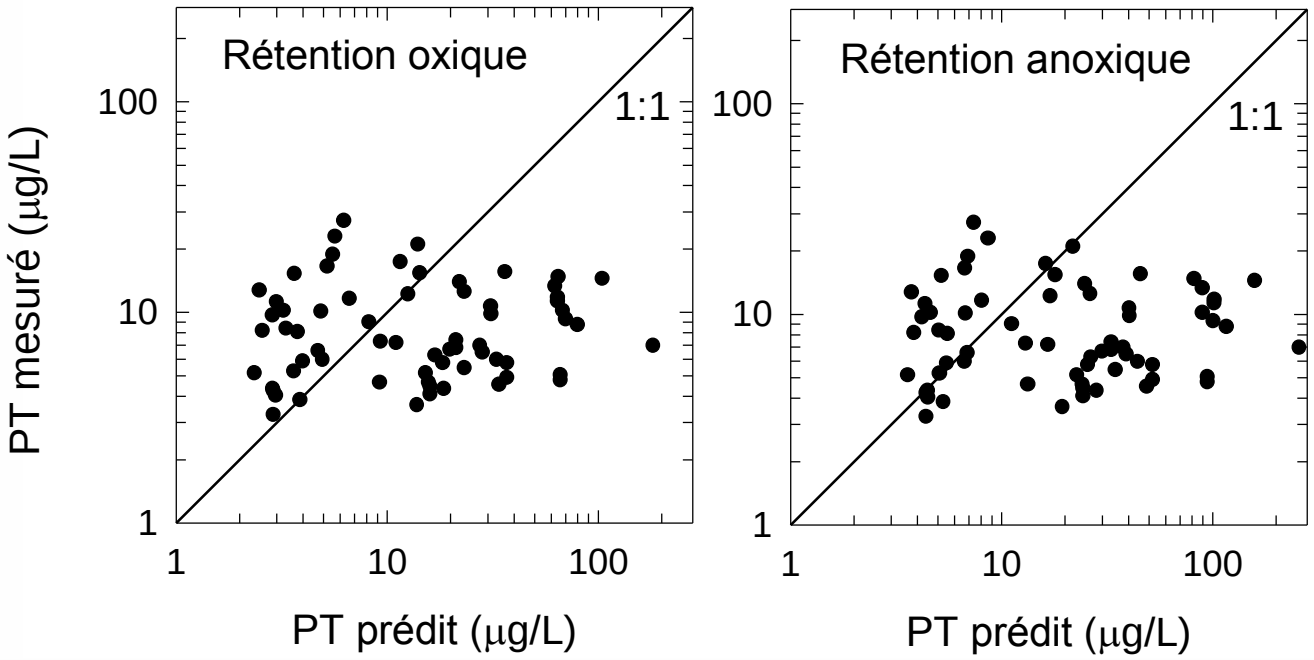
- L'incertitude est omniprésente en modélisation
- L'évaluation de l'incertitude est essentielle à l'utilisation judicieuse des modèles
- Il y a trois composantes à l'incertitude : **la justesse, la précision et la représentativité**
- La prise en compte de l'incertitude peut être difficile

Limites à la modélisation

Justesse		
Précision		
Représentativité		

Exemple de modèle non performant

Modèle de
Dillon & Rigler
1975



Source : R. Carignan

- Importance d'avoir des modèles calibrés pour les lacs du Québec
- Un modèle s'applique idéalement aux lacs dont les caractéristiques sont similaires aux lacs de l'ensemble ayant servi à son développement

Limites à la modélisation : justesse

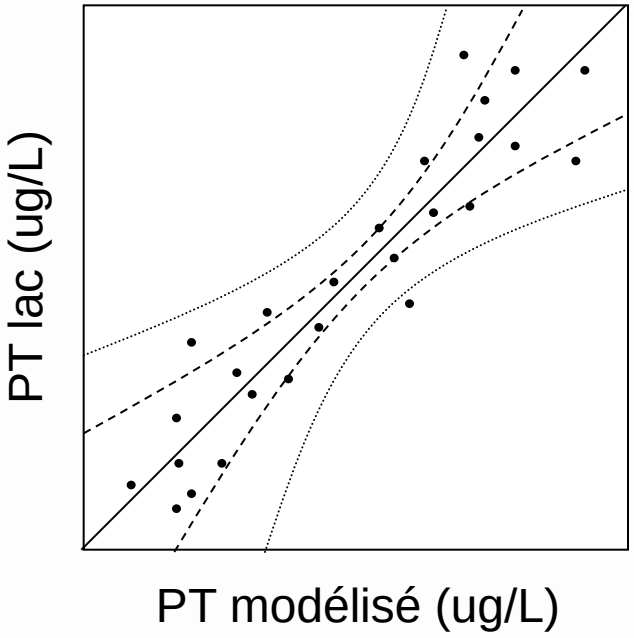
- Les facteurs à prendre en compte :
  - La géographie et les ensembles physiographiques (climat, topographie, géologie, pédologie, …);
  - L'utilisation du territoire;
  - Les caractéristiques des lacs :
    - La morphologie
    - La stratification
    - L'état d'oxygénation de l'hypolimnion
    - Les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

Limites aux « modèles Laurentides"

- Les modèles développés dans les Laurentides s’appliquent mal aux lacs :
  - Peu profonds
  - Eutrophes et hypereutrophes
  - Avec une charge interne (libération P des sédiments)
  - Avec zones urbaine et agricole importantes

Limites à la modélisation: la précision

- Précision du modèle (Erreur Type et Intervalle de Confiance)



Modélisation : ajustement et corroboration

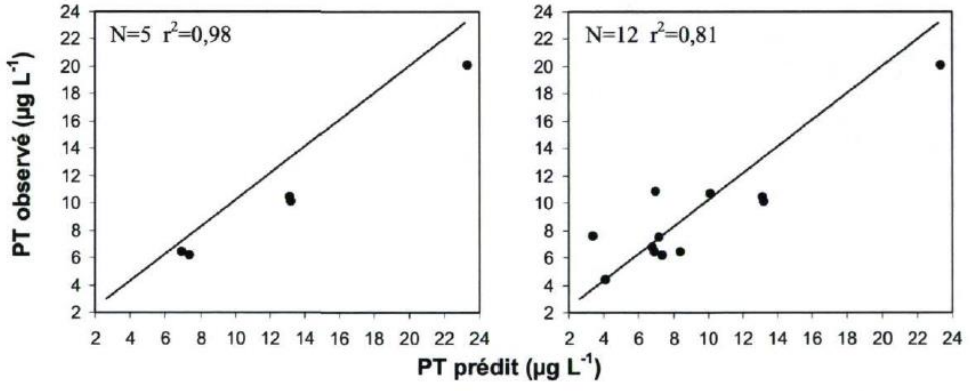
- Ajustement et corroboration des modèles sur un **ensemble de lacs**

- Simulations différentes selon :
  - Les paramètres de modélisation
  - Des ensembles de lacs

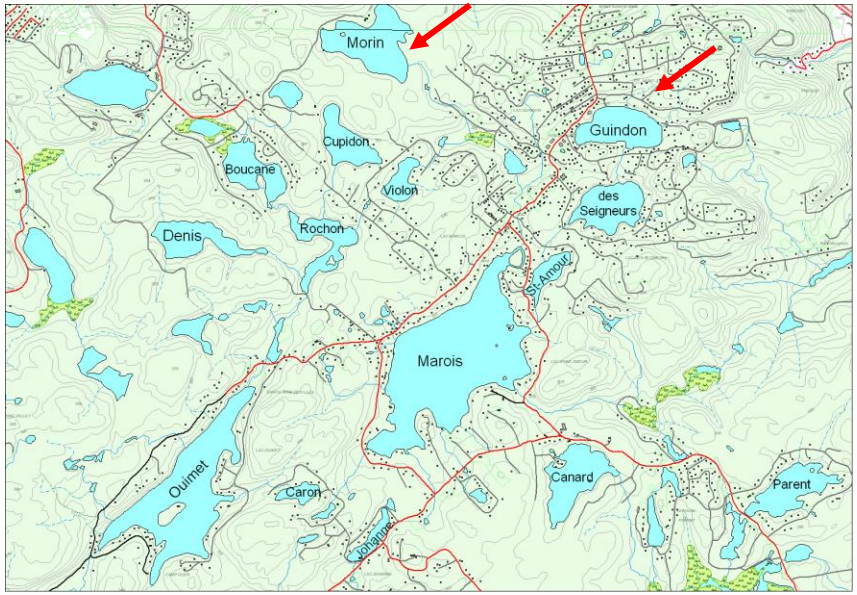
Simulation	Coefficient d'exportation des sources diffuses	Coefficient d'exportation des installations sanitaires individuelles	Résultats N = 5	Résultats N = 12
Simulation 1	MDDEP	MDDEP	$y = 0,8x - 0,22$ $r^2 = 0,98$ ***	$y = 0,7x + 2,6$ $r^2 = 0,81$ ***
Simulation 2	Carignan et al.	MDDEP	$y = 1,3x - 1,3$ $r^2 = 0,78$	$y = 1,0x + 1,7$ $r^2 = 0,68$ **
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



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

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'induira 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 µg/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.

Plan de travail

- Terminer le guide afin d'encadrer la pratique de la modélisation
    - Version 1 en rédaction
    - Consultation des scientifiques et des praticiens

- Le futur (conditionnel)
  - Poursuite du développement et voir au transfert du savoir-faire
    - Projets d'application de la modélisation
    - Développement de l'expertise
  - Structuration, standardisation et accès aux BD

Merci de votre attention

- Remerciements
- Richard Carignan, Université de Montréal
- Yves Prairie, Université du Québec à Montréal
- Sébastien Bourget, Université Laval
- Daniel Blais, MDDELCC