



La modélisation de la capacité de support des lacs au Québec

Louis **Roy** Benoit **Gravel** Richard **Carignan** Yves **Prairie**

Forum national sur les lacs 2008

Le 6 juin 2008

Lac Aylmer (P. Grant, Québec en images)

Plan de la présentation

Partie 1 : La modélisation de l'eutrophisation

- Notions
- Travaux de recherche et développement au Québec
- Constats

Partie 2 : Projet pilote d'application dans le cadre du Système d'aide à la prise de décision des Laurentides (SIADL)



Partie 1

La modélisation de l'eutrophisation

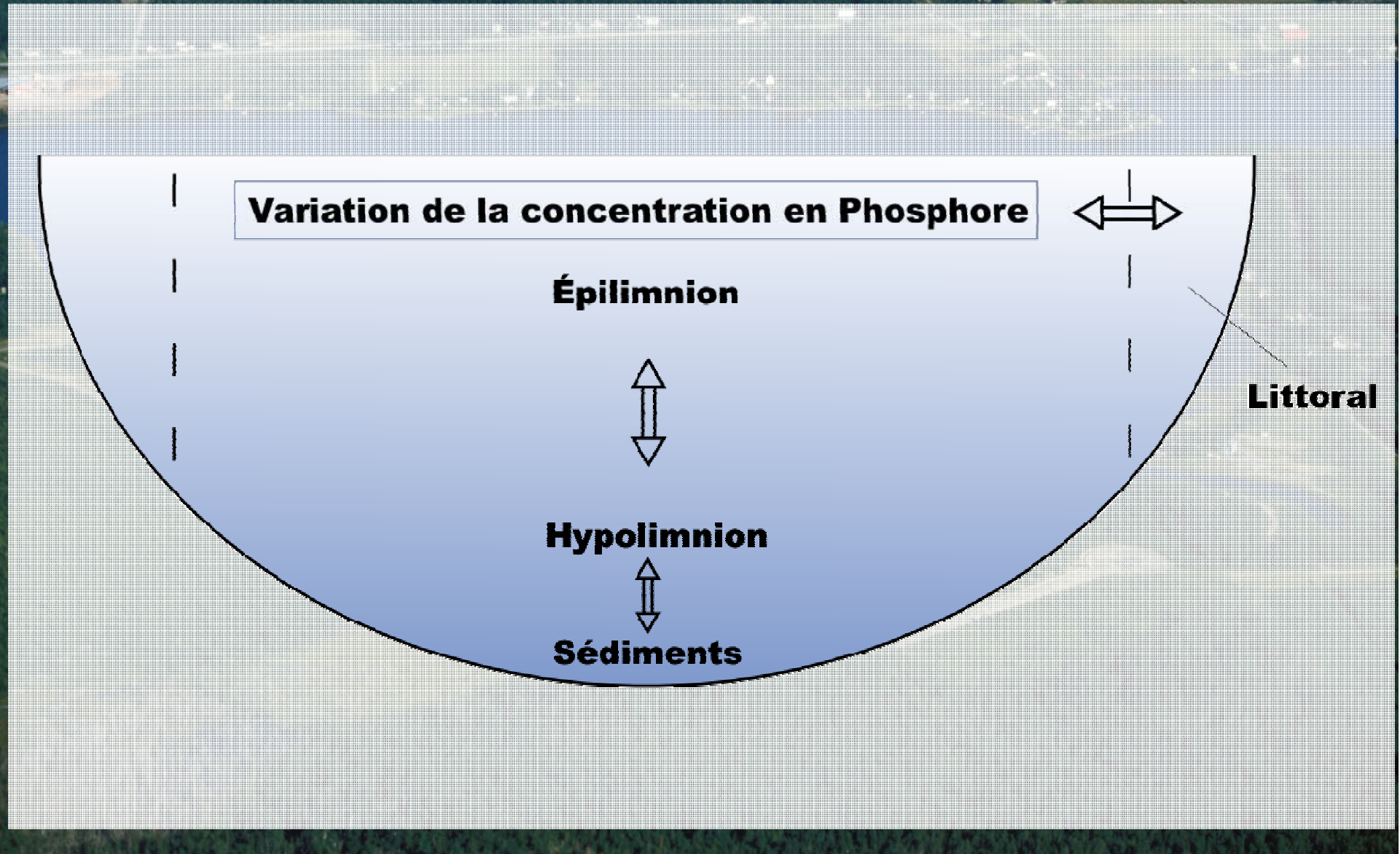
Notions

- Un modèle est une représentation **simplifiée** d'un phénomène ou d'un système
- L'**eutrophisation** est le processus d'enrichissement d'un plan d'eau par les matières nutritives
 - Eutrophisation anthropique : portion associée aux activités humaines

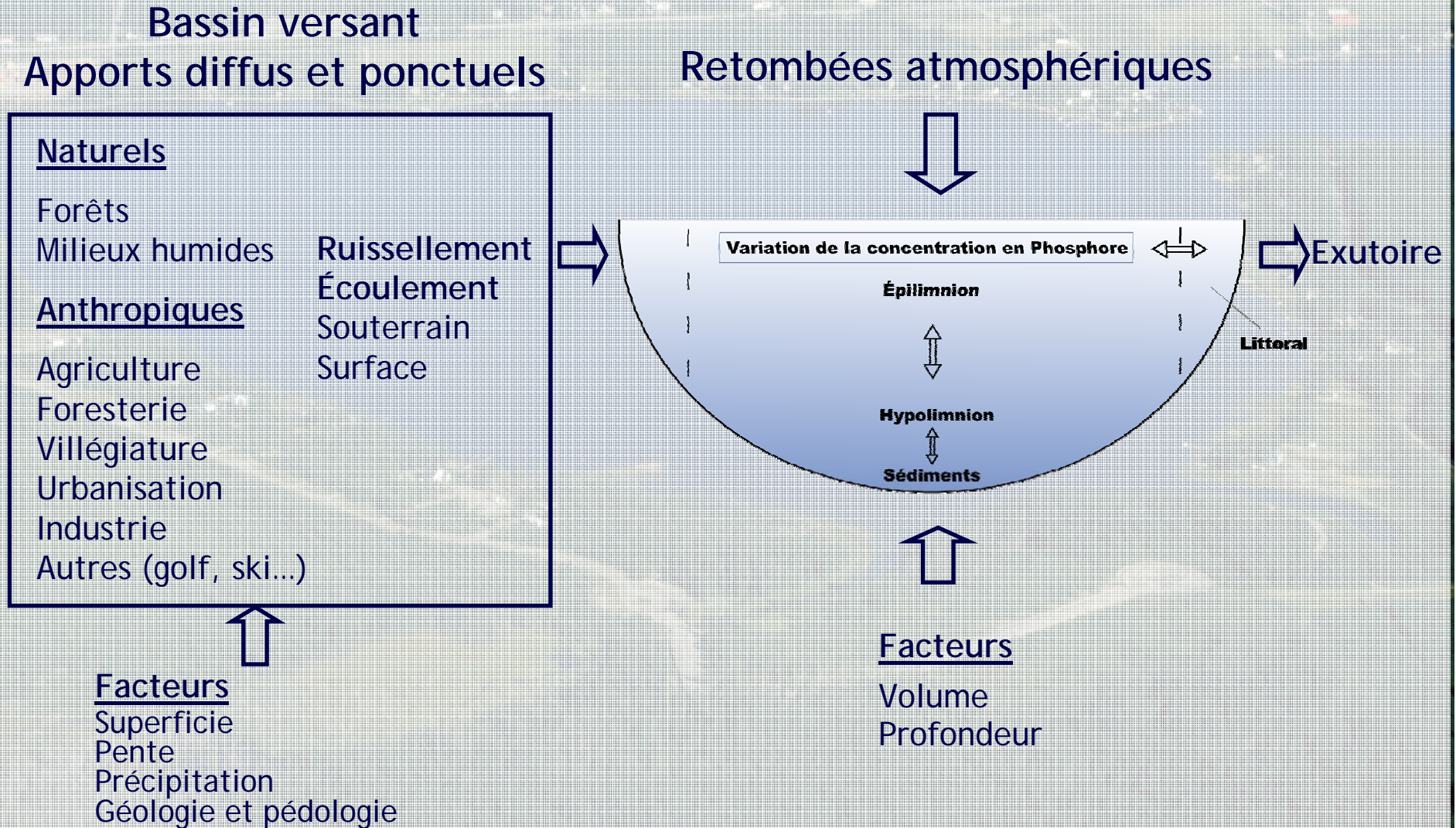
Notions

- 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
- La modélisation de l'eutrophisation consiste à élaborer des modèles **expliquant et quantifiant** les apports en phosphore et sa concentration dans les lacs

Modèle conceptuel de l'eutrophisation



Modèle conceptuel de l'eutrophisation



À quoi peuvent servir les modèles ?

- Identifier les **variables d'utilisation du territoire** et du paysage qui sont responsables de l'eutrophisation et déterminer leur importance
- Déterminer la **concentration naturelle** du P dans les lacs et le facteur d'accroissement lié aux activités humaines

À quoi peuvent servir les modèles ?

- Établir des scénarios d'intervention pour réduire les apports en phosphore
- Estimer le développement possible de différentes utilisations du sol et les apports admissibles (capacité de support)

La capacité de support des lacs

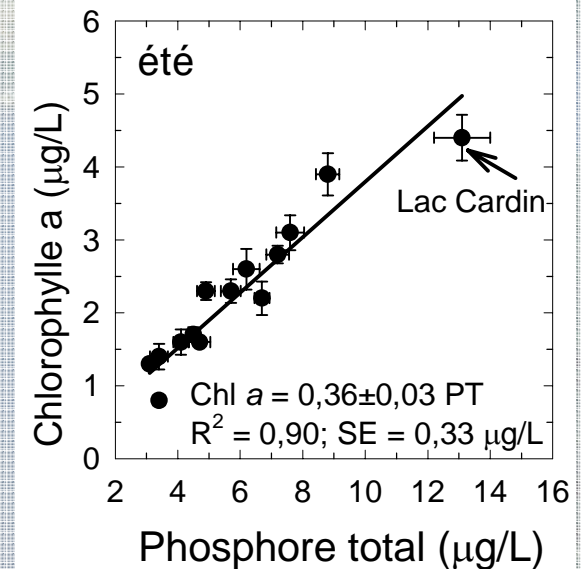
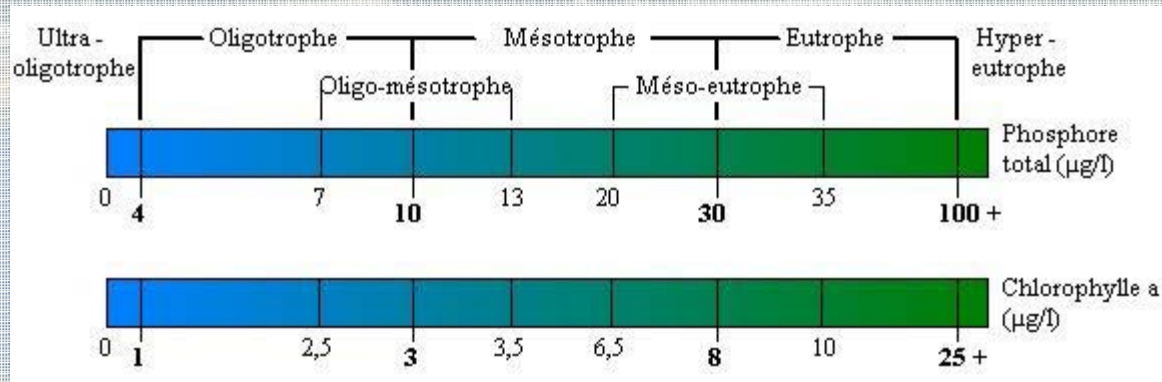
- **Définition : Pression maximale** que l'on peut exercer sur un écosystème sans porter atteinte à son intégrité physique, chimique et biologique
- En regard de l'eutrophisation : **Charge en phosphore** qu'un lac peut recevoir sans engendrer une augmentation de la concentration induisant des effets indésirables et des pertes d'usages

Modèles de capacité de support

=

Une des utilisations possibles des modèles d'eutrophisation

Augmentation acceptable



Critère actuel (P) :

- 50 % d'augmentation sans dépasser 10 ou 20 µg/l

Critère à réviser :

- Pas d'augmentation de la concentration
- Accroissement qui n'induit pas d'effets indésirables et qui assure la protection des usages

Modèles empiriques (modèles statistiques)

- Relier la [P] aux propriétés des bassins versants

Variables d'utilisation du territoire

Exemples :

→ Superficie

- Forêts
- Milieux humides

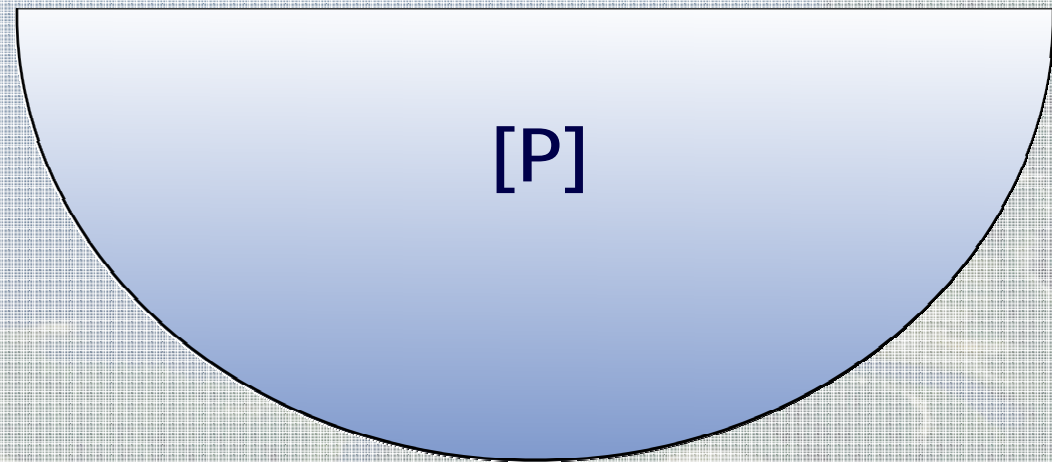
→ Nombre d'habitations

Variables du paysage et de morphologie du lac

Exemples :

→ Pente moyenne bassin

→ Volume du lac



Un ensemble de plusieurs lacs

Modèles explicites (ou semi-empiriques)

Bilan de masse qt P = P_{apports} - P_{sortie} - P_{sédimente}

Q = Quantité d'eau



$$[P] = (L/Q) (1-R)$$



L = Charge en phosphore

→ Somme des charges spécifiques

- Forêts
- Milieux humides
- Milieux ouverts
- Habitations
- Retombées atmosphériques
- Autres



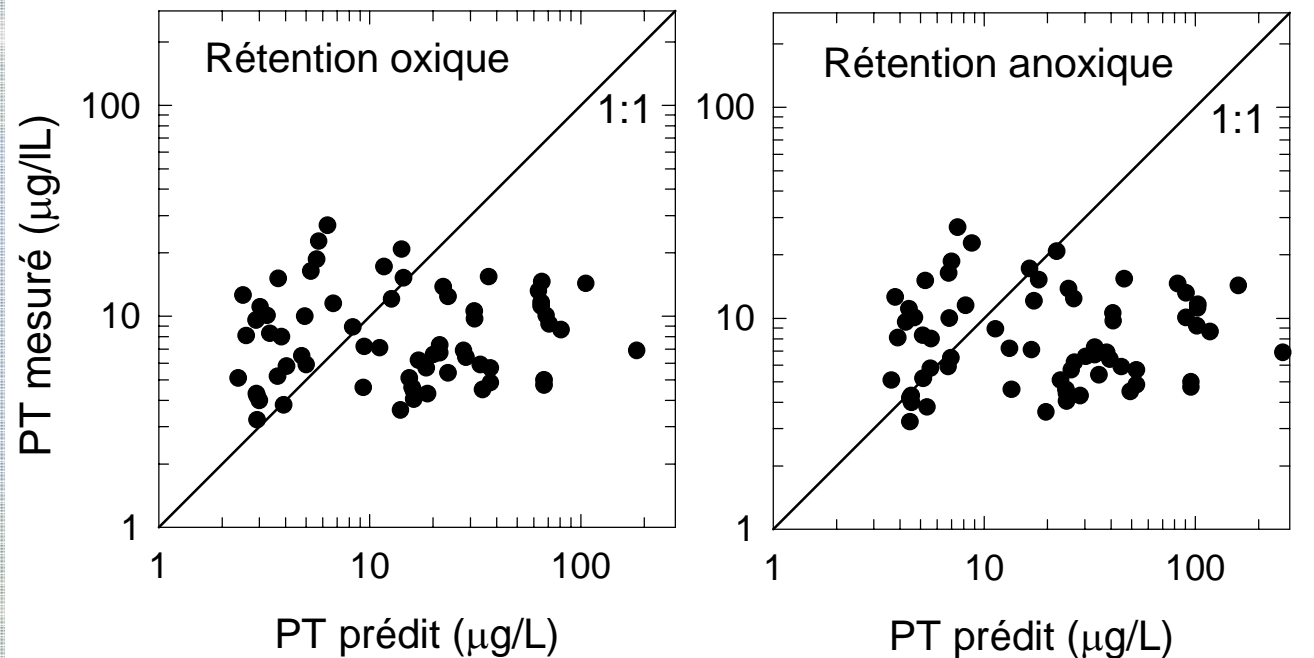
R = Coefficient de
rétention lacustre

→ Coefficients déterminés
empiriquement ou mesurés

- Aucune modélisation empirique
- Utilisation de modèles de bilan de masse
 - Surtout le « *Trophic Status Model* » (TSM) ou modèle de Dillon, développé en Ontario
 - Des adaptations du modèle TSM

Comparaison valeurs prédites et mesurées

Modèle
de Dillon



- Ne représente pas la dynamique du P dans les lacs et bassins versants du Québec
- Facteurs responsables : l'imprécision des données et la non représentativité des coefficients d'exportation et de rétention

Travaux de recherche et développement

- Développement de modèles empiriques et semi-empiriques explicites pour deux ensembles physiographiques importants du Québec

→ Les Laurentides

Richard Carignan (Université de Montréal)

→ L'Estrie

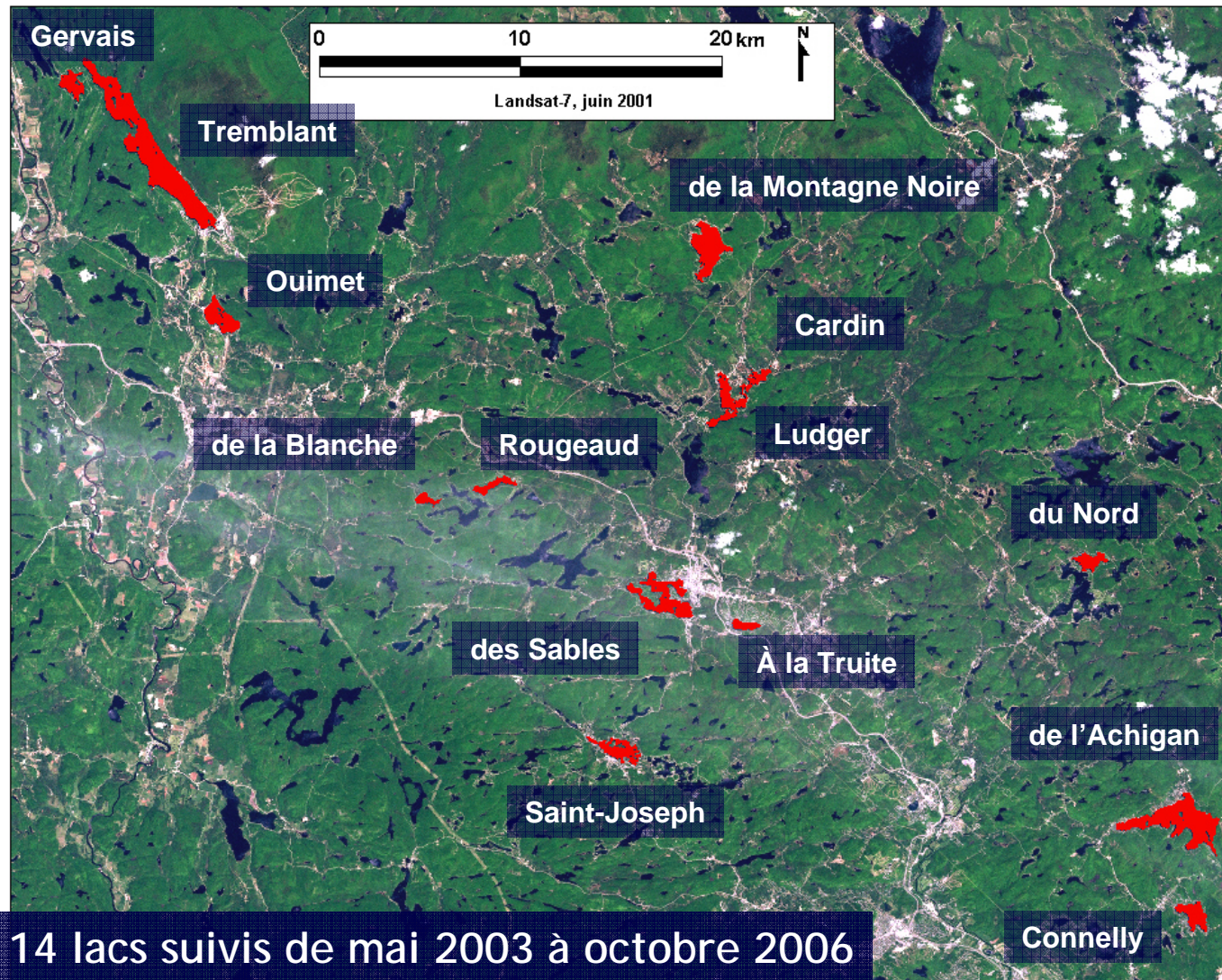
Yves Prairie (Université du Québec à Montréal)

Projet subventionné par le MDDEP et le CRSNG

- Projet pilote visant à tester et valider l'utilisation de différents modèles dans les Laurentides

Projet financé par le FAQDD

Aperçu des résultats pour les Laurentides



Aperçu des résultats pour les Laurentides

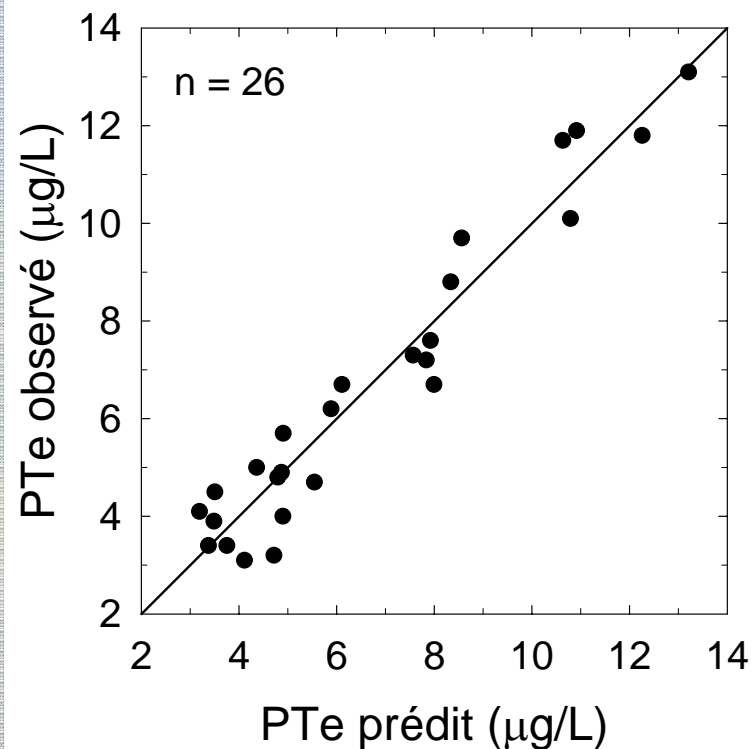
Modèles empiriques

- Plusieurs modèles performants qui font intervenir des variables exprimant :
 - nombre d'habitations, milieux humides et ouverts, morphologie des lacs (profondeur et volume)
- Ceux-ci mettent en évidence le rôle important :
 - des habitations dans le premier 100 mètres
 - des milieux humides
 - des milieux ouverts

Exemple

Lacs stratifiés, volumes et concentrations en COD connus

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



$$R^2 = 0,93$$

$$ES = 0,8 \mu\text{g/l}$$

Aperçu des résultats pour les Laurentides

Modèles explicites

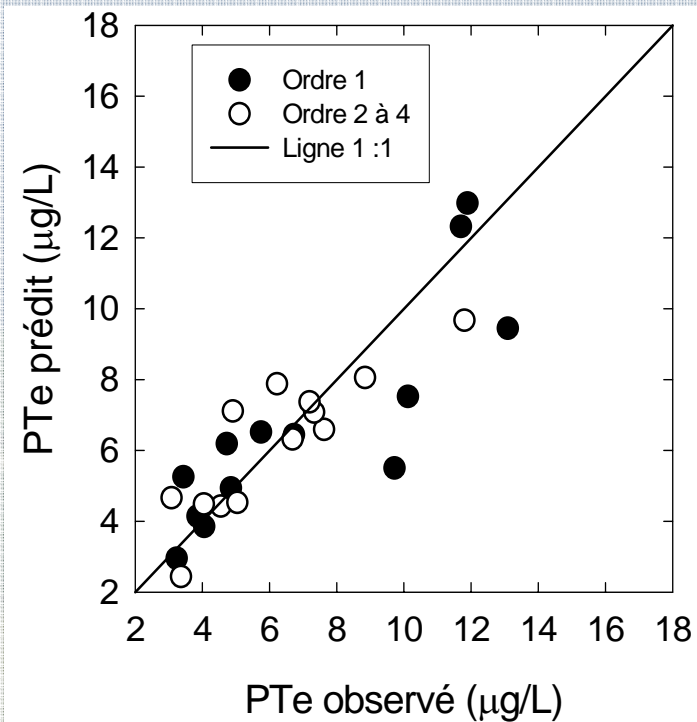
$$[P] = (L/Q) (1-R)$$

- $L = \sum L$ spécifiques (forêts, milieux humides, milieux ouverts, retombées atmosphériques, humains)
 - *calculées à l'aide de coefficients déterminés dans le cadre des travaux de l'étude ou connexe*
- Q = charge en eau mesurée
- R = coefficient de Larsen et Mercier (1976)
 - *explique bien la rétention du phosphore des lacs étudiés ($R^2=0,81$)*

Aperçu des résultats pour les Laurentides

Modèles explicites

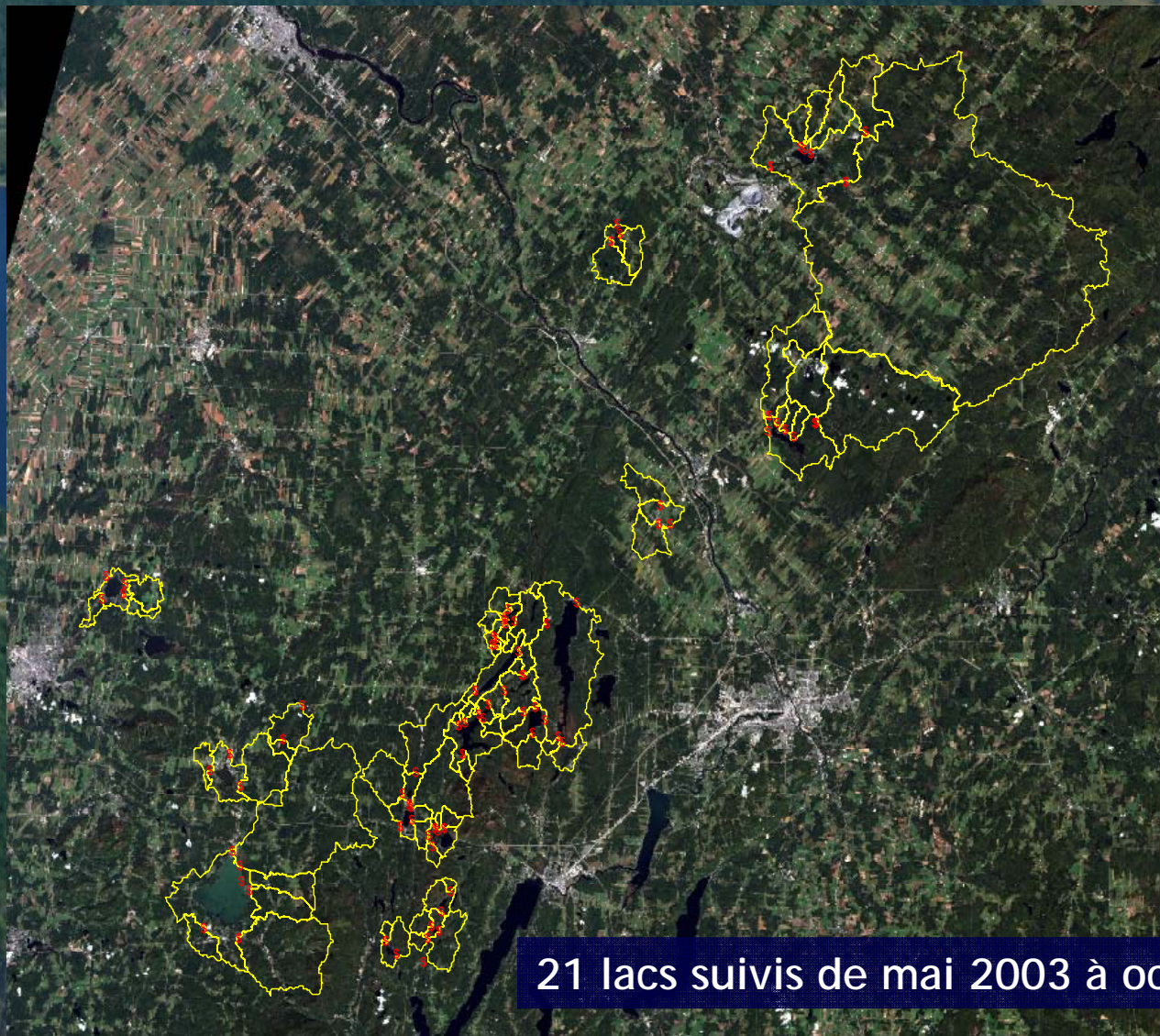
$$[P] = (L/Q) (1-R)$$



$$R^2 = 0,72$$

$$SE = 1,4 \mu\text{g/l}$$

Aperçu des résultats pour l'Estrie



21 lacs suivis de mai 2003 à octobre 2006

Aperçu des résultats pour l'Estrée

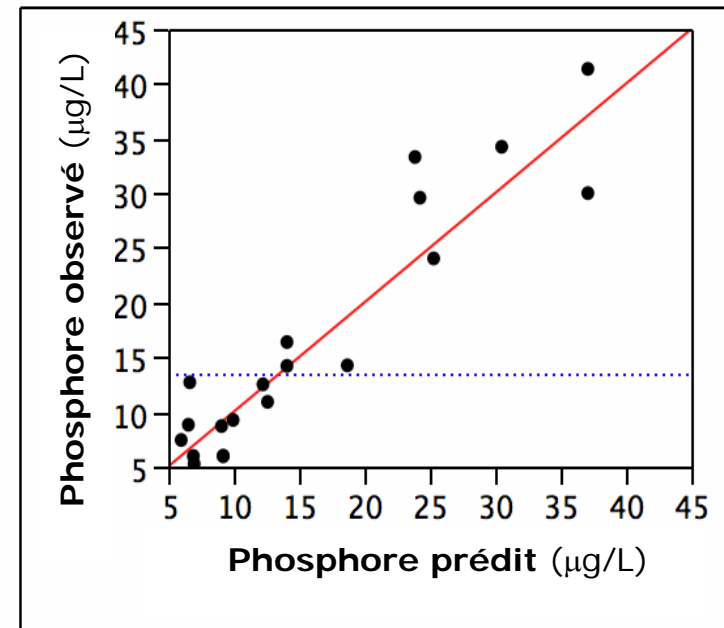
Modèles empiriques

- Un seul modèle explique la concentration du P dans les lacs faisant intervenir :

→ la pente moyenne du bassin versant

→ le % du bassin versant déboisé

(terres agricoles essentiellement sous forme de pâturages et de prairies)



$$R^2 = 0,84$$

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

Aperçu des résultats pour l'Estrie

Modèles explicites

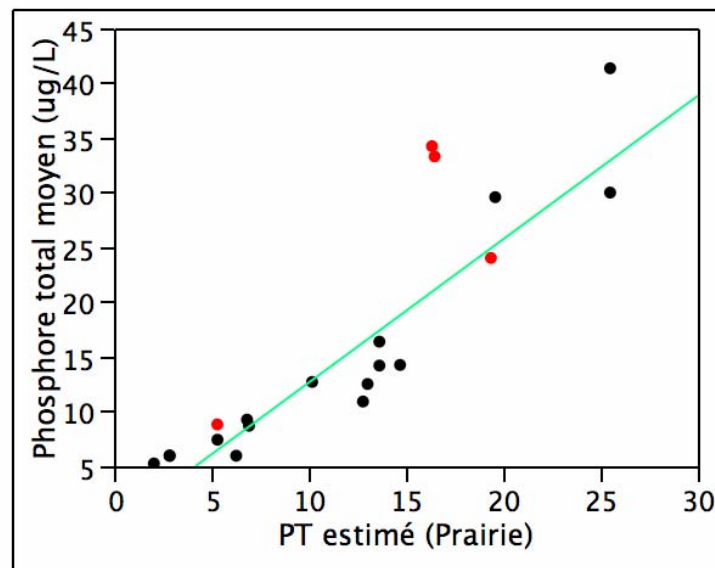
$$[P] = (L/Q) (1-R)$$

- $L = \sum L$ spécifiques (forêts, pâturages et milieux humides)
→ *calculées à l'aide de coefficients déterminés dans le cadre des travaux de l'étude ou connexe*
- Q = charge en eau mesurée
- R = coefficient de Prairie (1989)
→ *aucun coefficient disponible n'explique bien la rétention du phosphore des lacs étudiés (R^2 de 0,30)*

Aperçu des résultats pour l'Estrie

Modèles explicites

$$[P] = (L/Q) (1-R)$$



$$R^2 = 0,87$$

$$SE = \pm 4 \mu\text{g/l}$$

Constats : modèles empiriques

- Les modèles empiriques :

- permettent de prédire avec une bonne précision la concentration en P pour les deux ensembles de lacs étudiés (Estrie et Laurentides)

- identifient les principales variables intervenant dans l'exportation du P jusqu'aux lacs

*** Mise en garde : Les modèles sont le reflet des apports en P selon les usages et les pratiques en place au moment de l'étude

Constats : modèles empiriques (suite)

- Les modèles empiriques peuvent être utilisés pour :
 - estimer l'augmentation relative de la concentration en P par rapport à la situation naturelle
 - évaluer l'impact relatif d'un changement dans l'affectation du territoire sur la concentration en P

Constats : modèles explicites

- Les modèles explicites :

- sont **moins précis** en raison de la représentativité variable des coefficients utilisés dans l'équation (*calcul des charges et rétention du P*)
- peuvent donner une indication de l'importance relative des différentes sources de P pour un plan d'eau (*bilan des charges en P*)

Constats : modèles explicites

- L'estimation de l'augmentation possible de la charge en P (capacité de support) comporte une marge d'erreur importante
- L'évaluation de la capacité de support doit être réalisée avec une grande prudence et uniquement à titre indicatif :
 - Ne peut pas servir, par exemple, à déterminer avec précision le nombre d'habitations que l'on peut ajouter

Constats : la portée des modèles

- Portée géographique des modèles :
 - passe par une étape de validation de leur représentativité
- Ajustement des modèles explicites (coefficients) :
 - doit être validé statistiquement sur des ensembles de lacs

La suite

- Publications :

- Travaux de recherche dans les revues scientifiques
- Synthèse des résultats et établir des lignes directrices (évolutives) pour baliser l'utilisation des modèles dans une optique de gestion

- Travaux à réaliser (développement) :

- Préciser certains coefficients utilisés dans les modèles explicites, notamment en fonction des différentes pratiques agricoles
- Poursuivre les projets de validation et les projets pilotes d'application



Partie 2
Projet pilote d'application du SIADL

Approche de gestion des lacs en lien avec leur capacité de support en phosphore

Modélisation de l'état d'eutrophisation des lacs des moyennes Laurentides
Projet pilote d'application québécois



FONDS D'ACTION
QUÉBÉCOIS POUR LE
DÉVELOPPEMENT DURABLE

Partenaire financier

Québec

Développement durable,
Environnement
et Parcs

Québec

Projet

SIADL

Abrinord
Agence de bassin versant de la rivière du nord



Municipalité régionale
de comté
des Pays-d'en-Haut



MRC DES LAURENTIDES



MRC
de la Rivière-du-Nord



Université
de Montréal

Ressources naturelles
et Faune

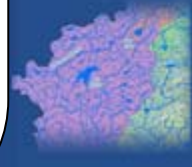
Québec

Affaires municipales
et Régions

Québec



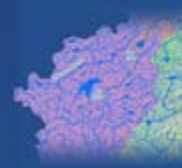
CRE Laurentides
Votre réseau environnemental



Projet
SIADL

Mise en contexte- Historique SIADL

- Début en 2003 avec un projet commun (4 MRC) de structuration de données
- 2004-2005 – Projet sur le cadre écologique de référence et sur les lacs avec le MDDEP
- 2005 – Prise en charge du projet par Abrinord
- 2005-2006 – Occupation du sol manuelle du bassin versant de la rivière du Nord
- 2006 – 2007 - Occupation du sol automatique, ZES et volume des lacs
- 2007-2008 – Projet Capacité support sur les lacs
- Fin 2007 – Prise en charge de SIADL par la CRÉ des Laurentides



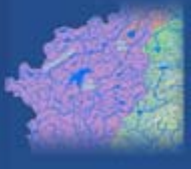
Équipes de travail

Équipe scientifique et technique

- Benoît Gravel, M.Sc. Géographie - Abrinord
- Florian Créac'hcadec, B.Sc. Géomatique
- Serge Assel, ing. – MDDEP
- Carl Dufour, M.Sc. Biol - MRC des Laurentides
- Daniel Blais, M.Sc. Sciences de l'eau – MDDEP
- Louis Roy, M.Sc. A. – MDDEP
- Henri Fournier, M.Sc. Biol. - MRNF
- Richard Carignan, Ph.D. Limnologie – Université de Montréal

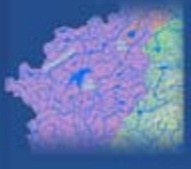
Équipe aménagement

- Benoît Gravel, dg-Abrinord
- André Boisvert, aménagiste – MRC des Pays-d'en-Haut
- Richard Morin, aménagiste – MRC les Laurentides,
- Éric Morency, aménagiste – MRC d'Argenteuil
- Danielle Simard, dg adjointe - MRC de la Rivière-du-Nord
- Alexandre Richard, cp PDE, Abrinord
- Agnès Grondin, dg, CRE Laurentides
- Sophie Rioux-Hébert, analyste – MAMR
- François St-Germain, urb.- GGBB



Résultats attendus

- Une validation des modèles existants et explication des sources de phosphore
- Une application des modèles (concentration de P pour chacun des 4 000 lacs)
- Un changement dans la façon dont les projets de développement sont analysés tant au niveau des MRC et municipalités que du MDDEP et du MRNF.
- Des avantages sociaux, environnementaux et économiques qui découleront de la préservation de nos lacs.

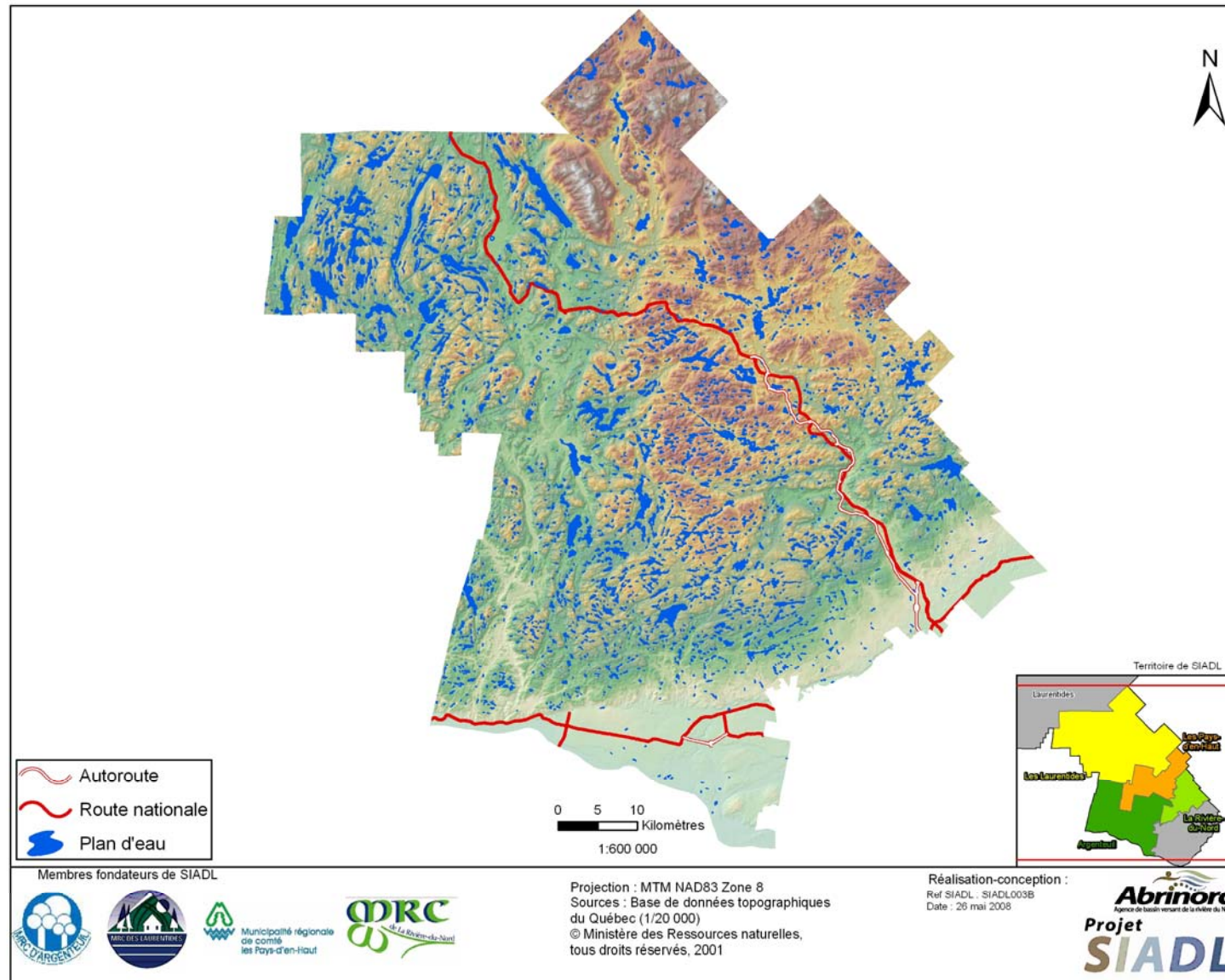


Contexte - démarche

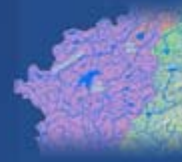
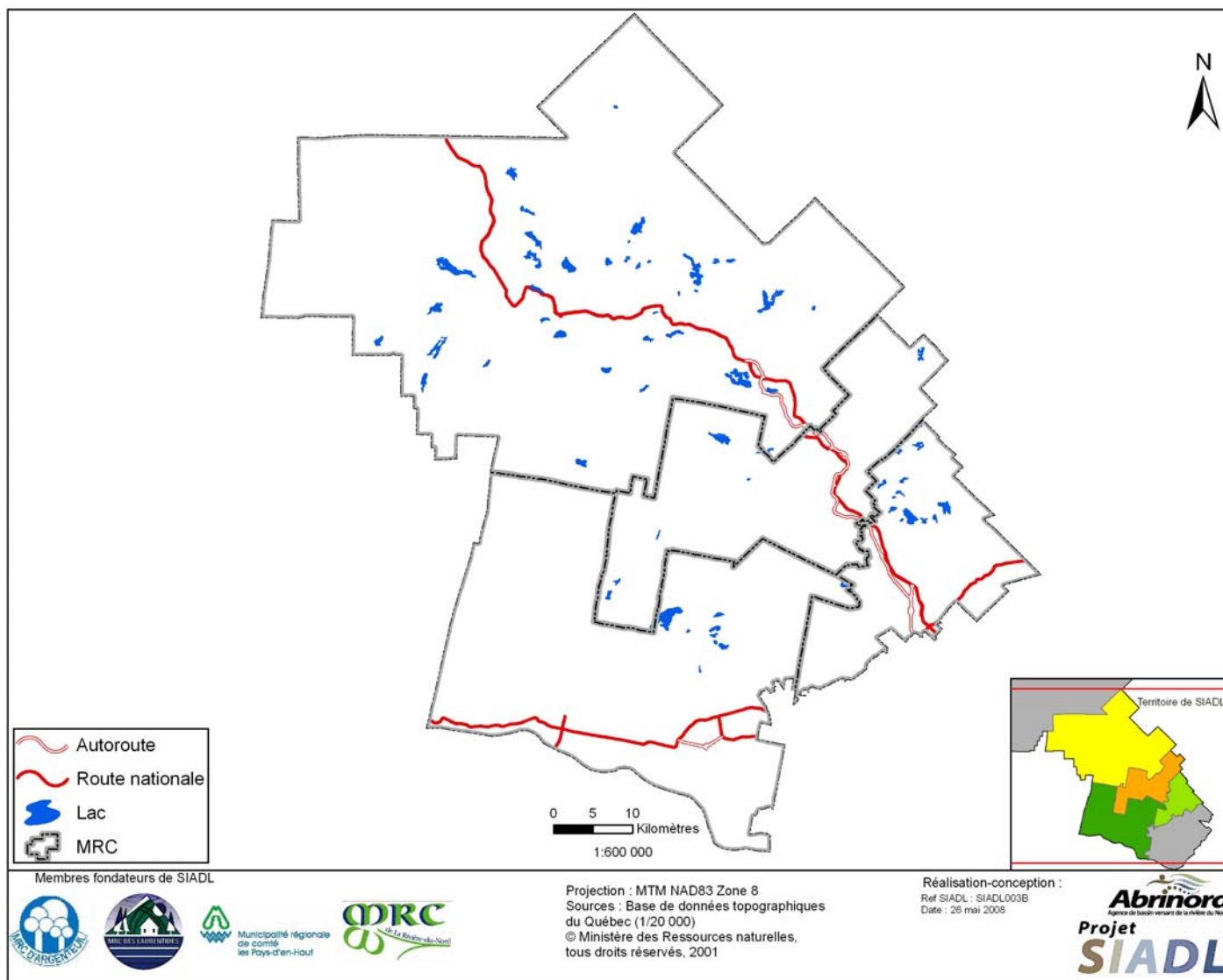
- Projet débuté avec 2 types de modèles (Bilan de charge (3 équations) et Empirique (5 équations))
- 2 séries de données terrains - RSV et Dr Carignan
- 1 équipe scientifique et technique pour analyser et orienter les travaux sur les modèles
- 1 équipe en aménagement du territoire pour analyser et identifier les possibilités d'application



Territoire pilote – « moyennes » Laurentides

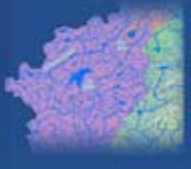


Lacs servant à la validation (70)

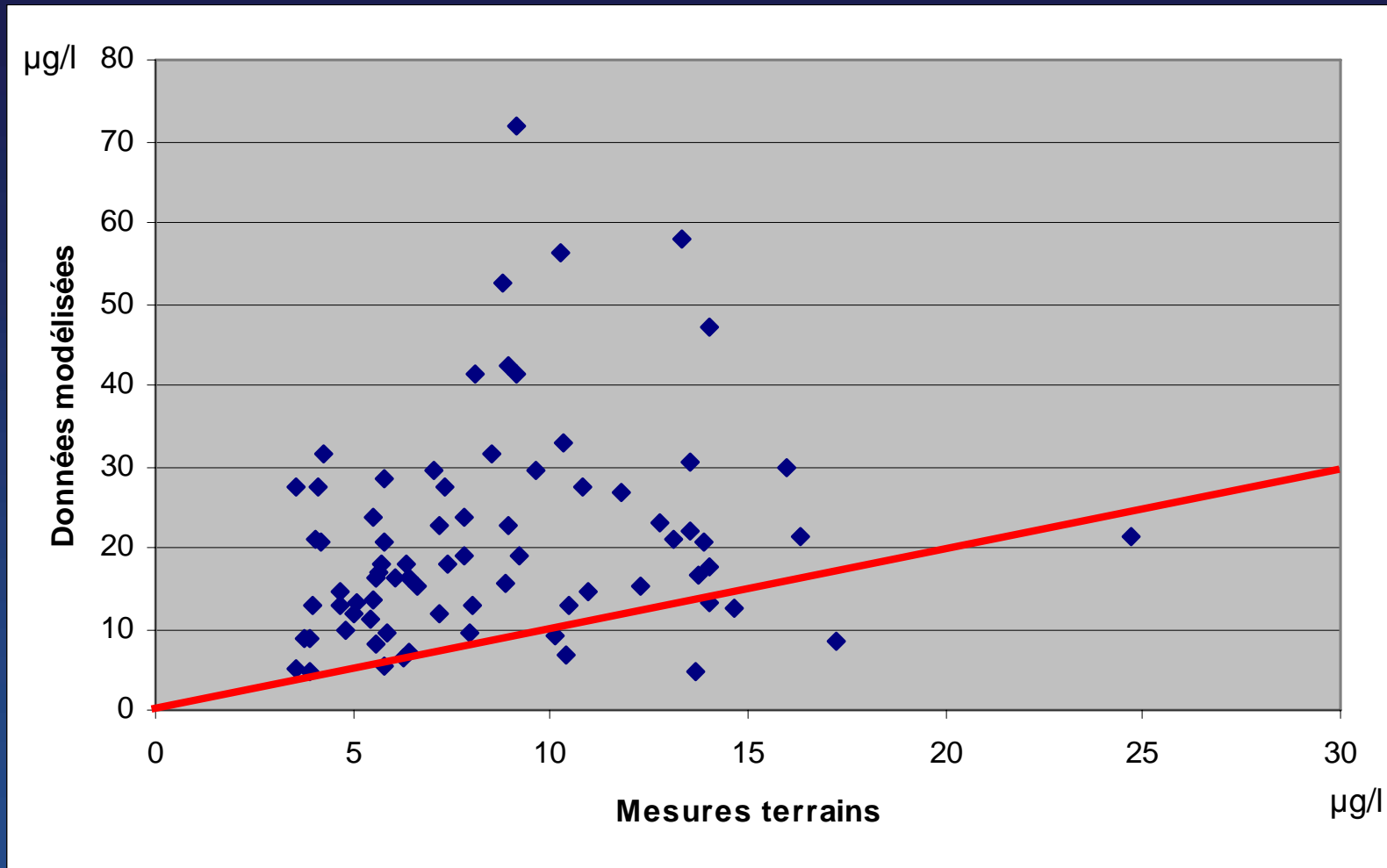


Liste des modèles testés

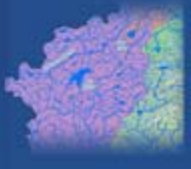
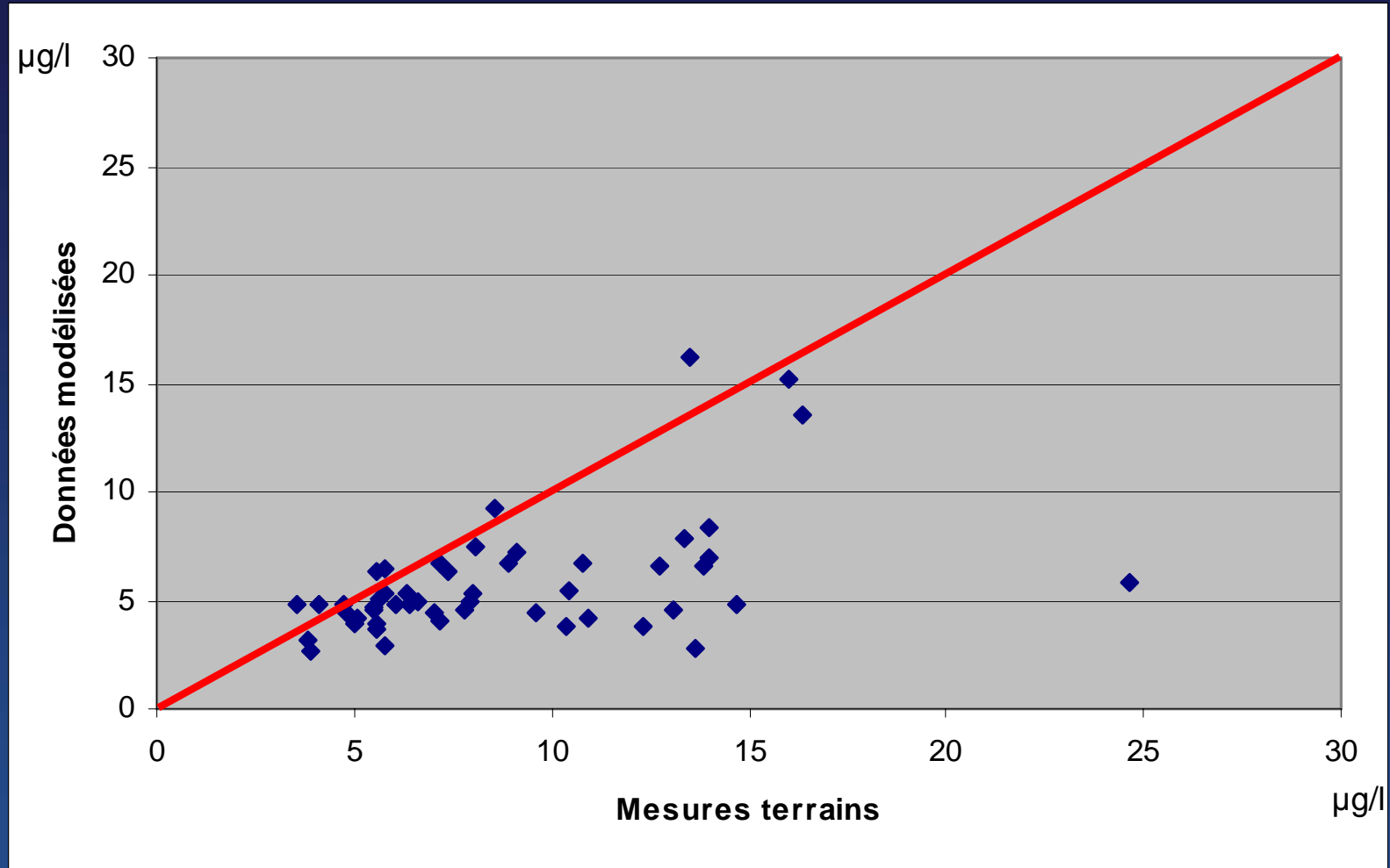
- Bilan de charge
 - Dillon et al. (1994)
 - Muskoka (2005)
 - Carignan (2007)
 - Adapté – groupe SIADL 2008
- Empirique
 - Simples (données de la BDTQ)
 - Avec volume
 - Avec COD



Modèle de bilan de charge Coefficients de Dillon et al. (1994)

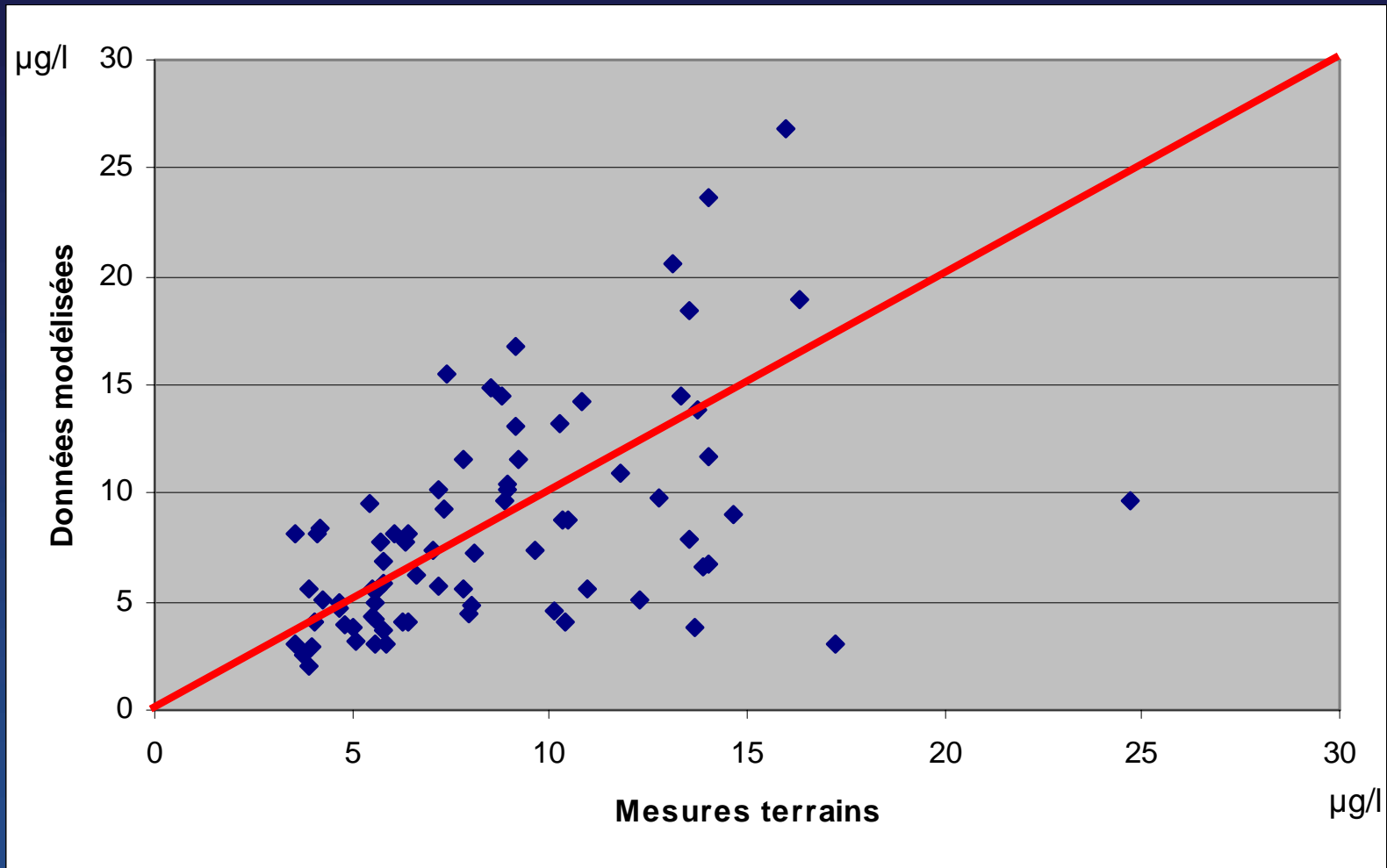


Le modèle empirique



Modèle de bilan de charge

Coefficients de sources variables



Comparaison des modèles

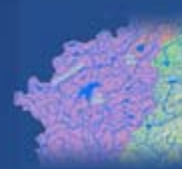
Modèles		Collecte et compilation des données	Exécution	Résultats	Information(s)	
Bilan de charge		Données et sources nombreuses, compilation moyennement complexe	Complexe (nombreux paramètres et calculs)	Mauvais dans le cas de Dillon	Quantité de phosphore + apport relatif par milieu	
				Significativement meilleurs pour Muskoka, Carignan et Adapté		
Empirique	Simple	Très simple	Simple	Équivalent aux bilans de charge	Quantité de phosphore seulement	
	Avec volume					Peu de données volumétriques existantes
	Avec COD	Modélisé		Simple		Moins bon qu'empirique simple
		Mesuré		Demande une donnée terrain		Semble donner les meilleurs résultats

Modèles actuels testés sont utilisables en aménagement



Limites des modèles

- Qualité des intrants (BDTQ vs terrain)
- Variabilité du phosphore
- Variation temporelle dans l'occupation du sol, entre autres les étangs à castor et la villégiature
- Représentativité des coefficients d'exportation des diverses variables (bilan de charge)
- **Modèles sont calibrés pour les pratiques d'aménagement actuelles**
- Temps de réponse des écosystèmes peut être différent (migration du phosphore)



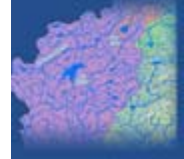
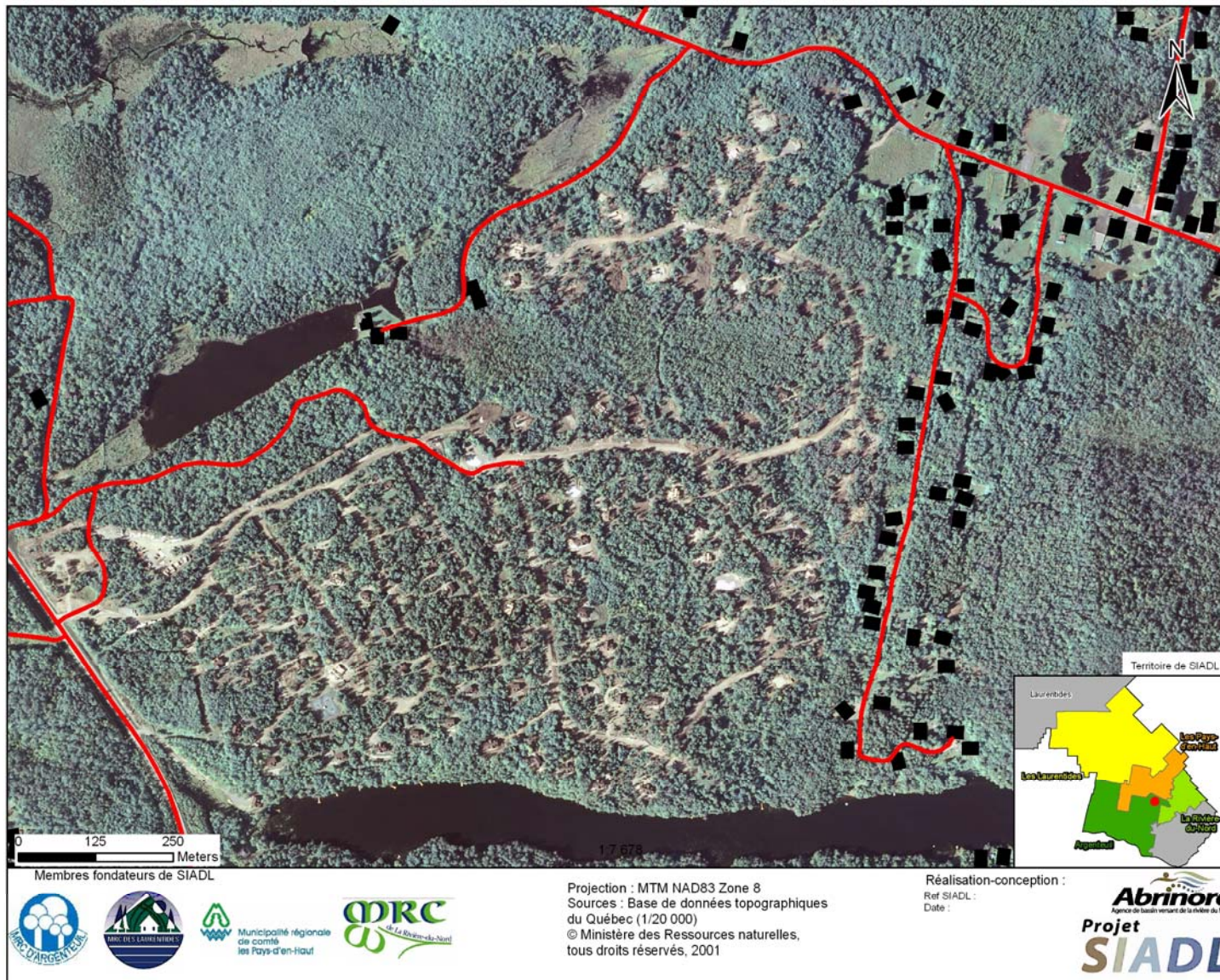
Limites de l'étude

- Modèles fonctionnels pour des lacs sur roche ignée et possiblement métamorphique
- Coefficients établis en fonction du développement actuel des lacs de villégiature (pas d'agriculture)
- Limitation dans le n de validation (principalement les grands lacs)
- Développement des modèles en fonction d'autres paramètres (morphométrie des lacs, type d'alimentation en eau, etc.)
- Absence de certaines variables intéressantes dans les modèles (routes, fossés, etc.)
- Nécessite une validation de l'état naturel (état « 0 »)

L'application en aménagement est de la responsabilité des MRC et des municipalités



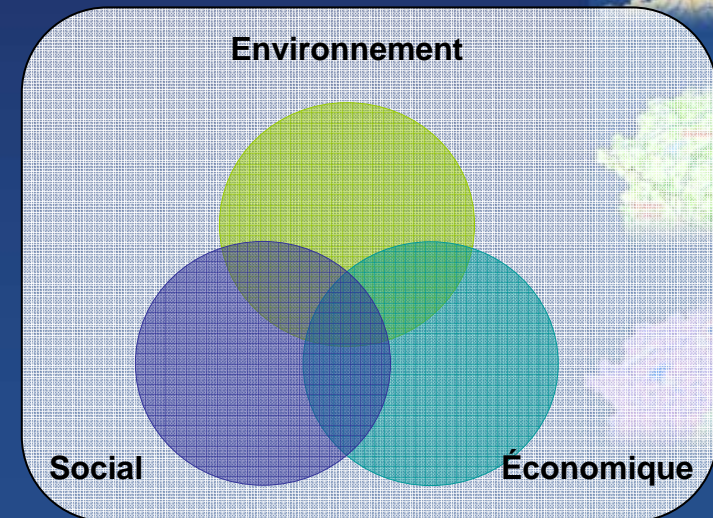
Problème d'actualité des données (sous-estimation potentielle)



Projet
SIADL

Constats

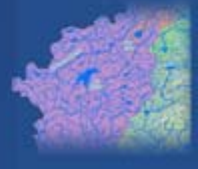
- Les modèles doivent être utilisés avec prudence!!!
- **Pas assez précis pour calculer le nombre d'unités d'habitation dans un BV**
- Au-delà de la concentration en P, on peut déterminer sa variabilité potentielle dans les lacs – **État d'eutrophisation (dégradation)**
- Un outil parmi d'autres d'aide à la décision – vision de développement durable



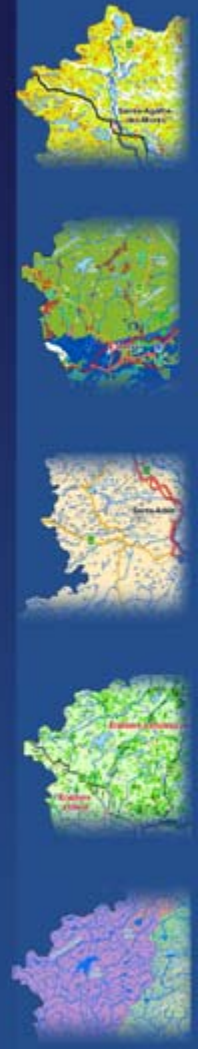
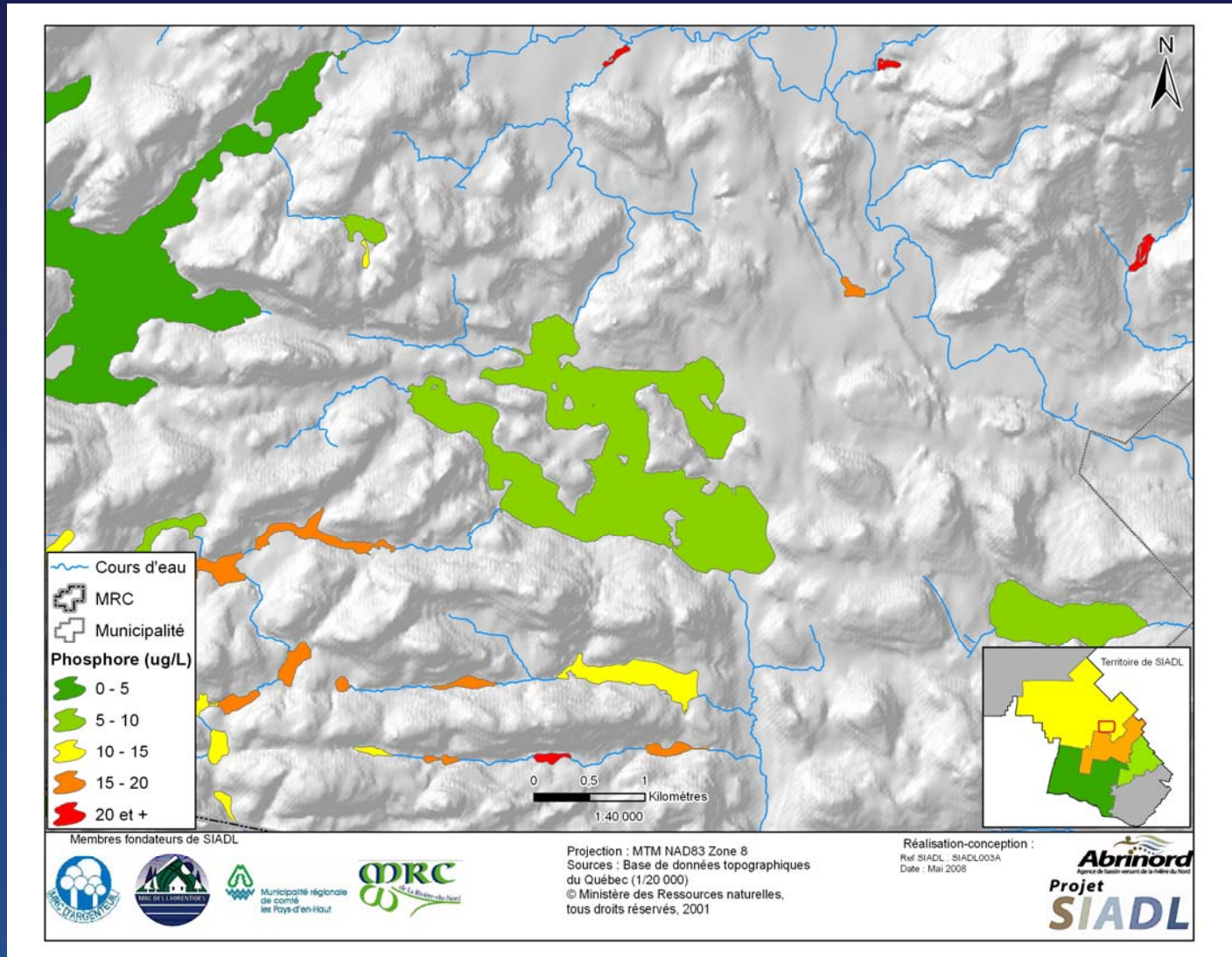
Constats (suite)

- Modèles ne remplacent pas les études terrains pour le cas par cas (analyses pointues)
- Modèles adaptés aux pratiques actuelles moyennes, donc pas adaptés à l'évaluation des moyens à mettre en œuvre pour réduire l'exportation du P (mitigation)
- **MDDEP doit encadrer (baliser) l'utilisation des modèles d'eutrophisation (lignes directrices)**
- Recherche et identification de nouveaux seuils discriminants (% d'augmentation du P, O₂ de l'hypolimnion, etc.)

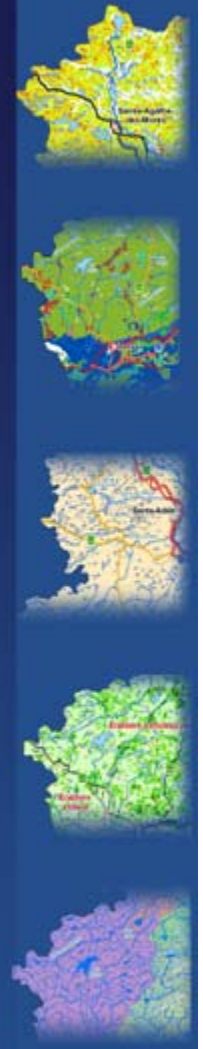
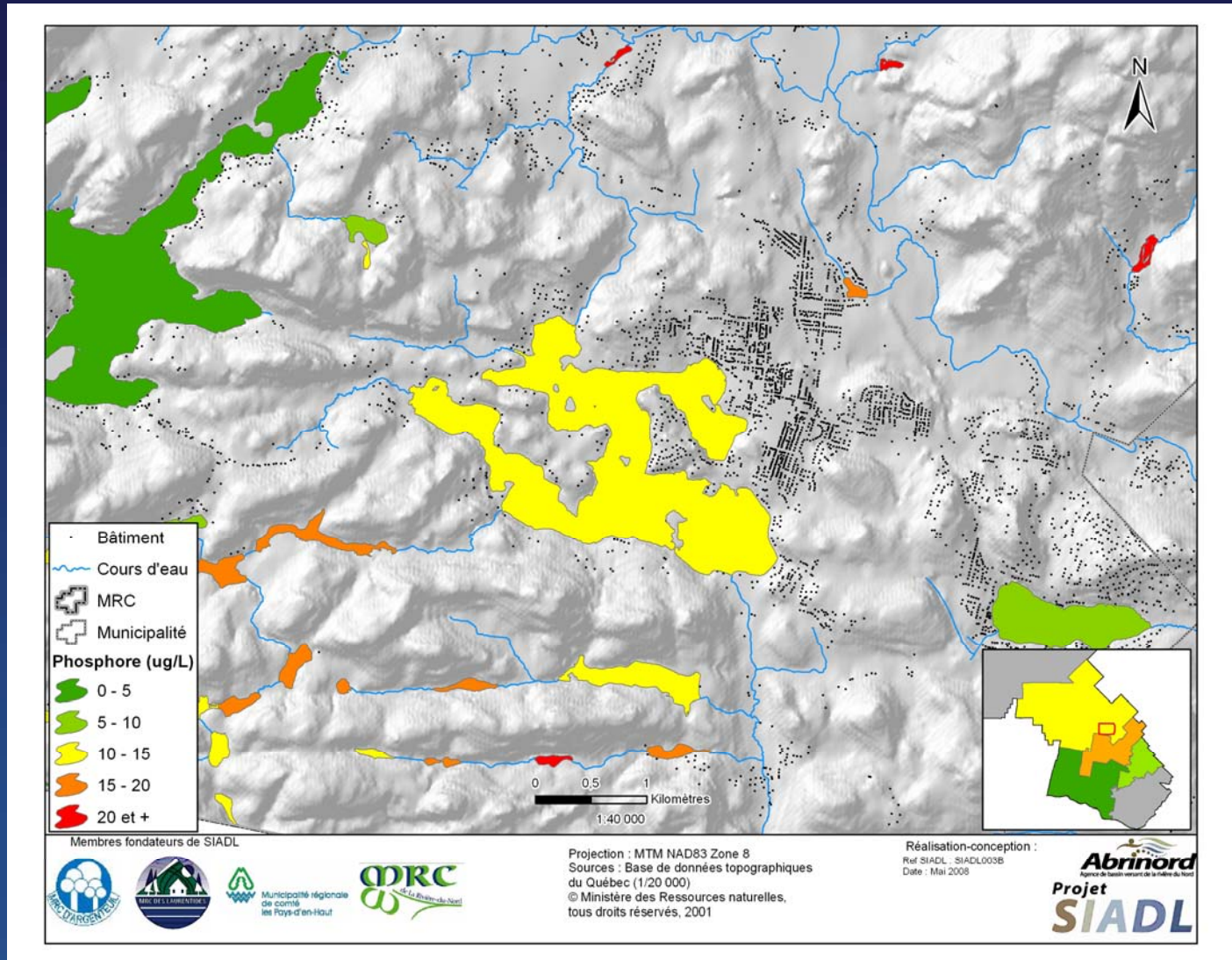
Les résultats sont jugés satisfaisants pour l'utilisation en aménagement



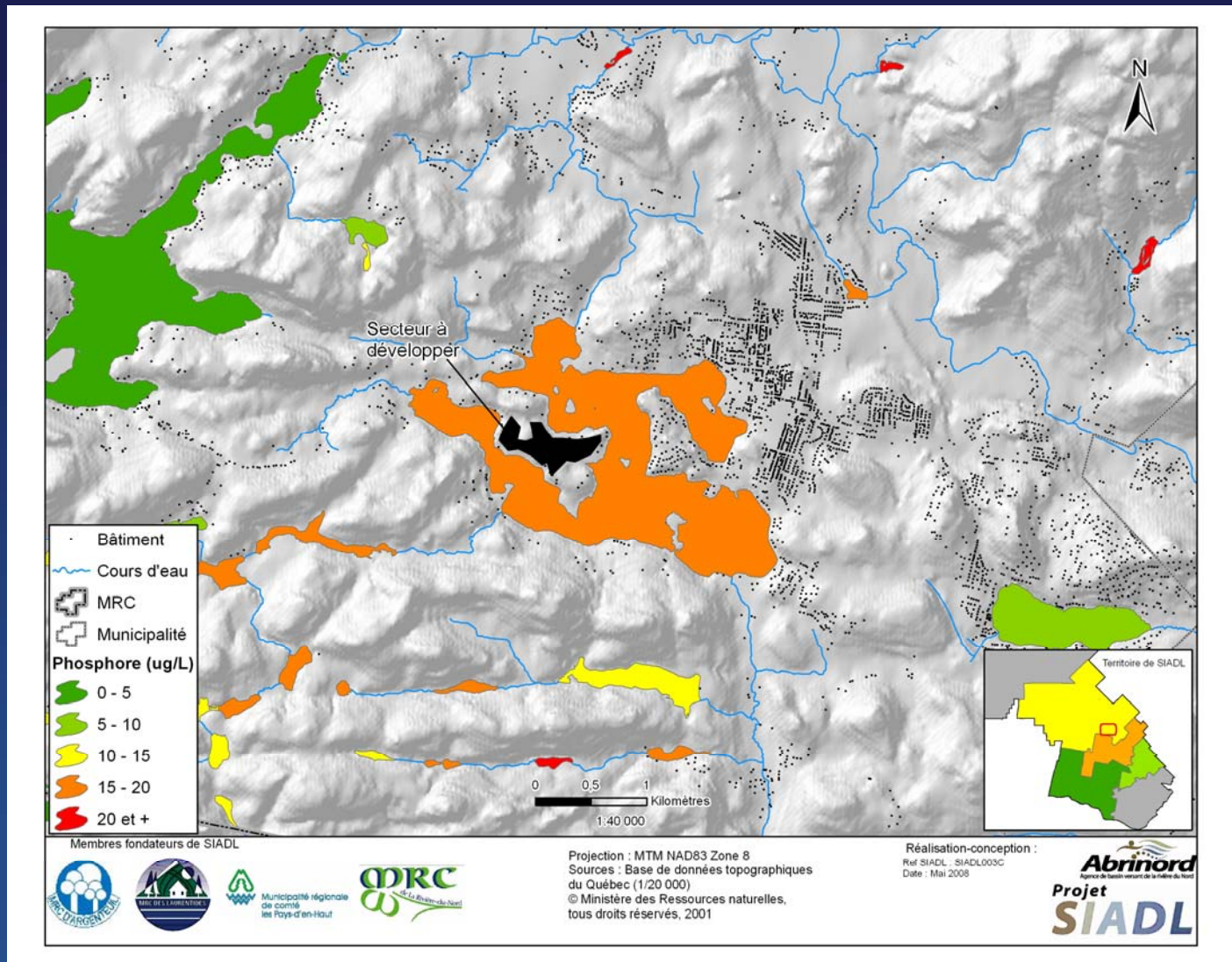
Exemple de l'état du lac Forum à l'état naturel



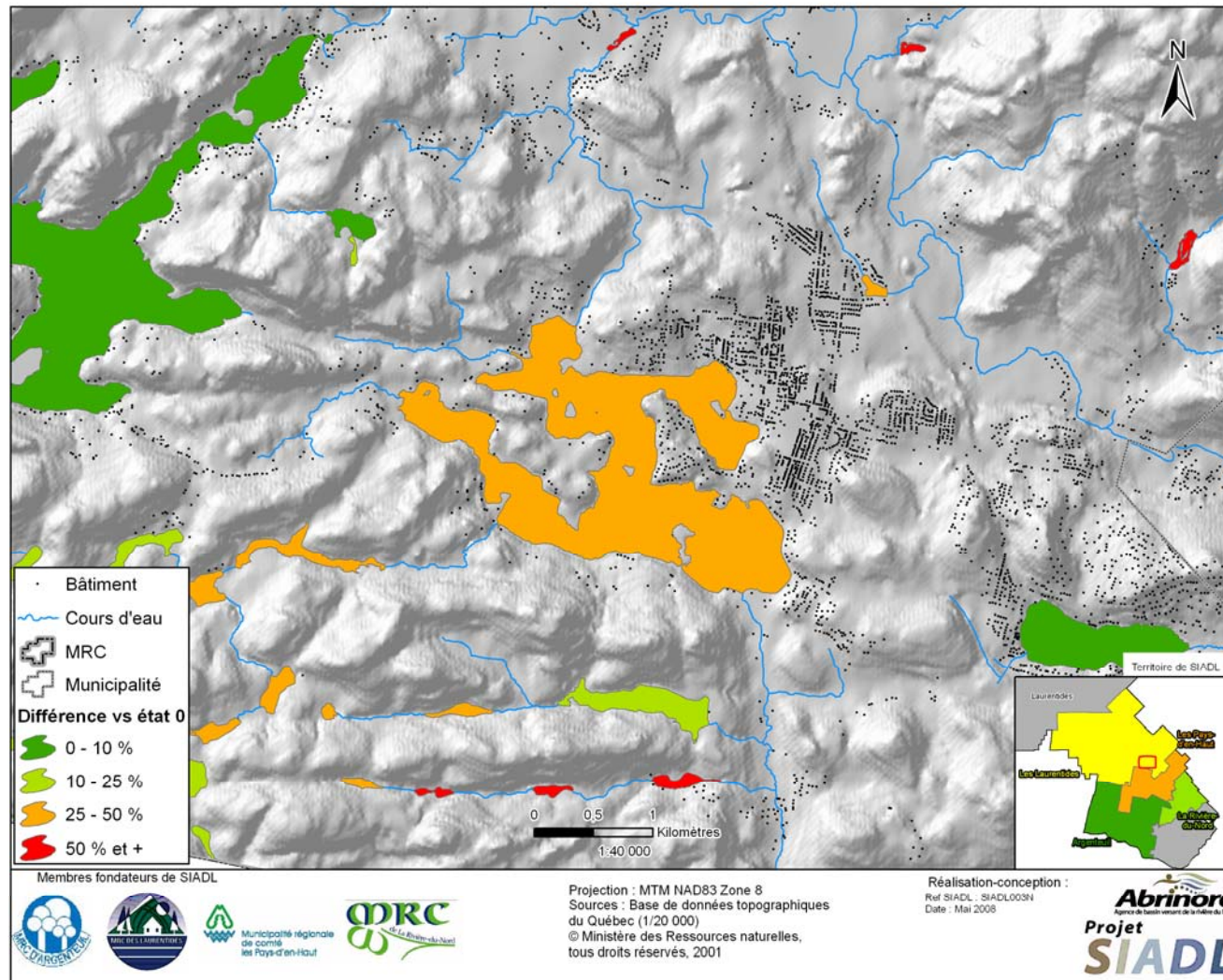
Exemple de l'état du lac Forum à l'état actuel



Exemple de l'état projeté du lac Forum



Variation du phosphore du lac Forum État naturel vs état actuel



Possibilités d'utilisation

- Dégrossi de la situation en aménagement
- Orientations pour les schémas
- Prioriser les lacs à échantillonner, à suivre (RSV-protocoles-PDE lacs)
- Prioriser les suivis terrains (inspection des syst. de traitement des eaux usées, bandes riveraines, etc.)

Déjà utilisé par les 4 MRC dans cette optique

- Analyse primaire de projets (P semble varier ou pas)
- Évaluation grossière des impacts cumulatifs de multiples développements (P semble varier ou pas)
- Gestion de l'ampleur des moyens à mettre en œuvre pour réduire l'exportation du P (mitigation)

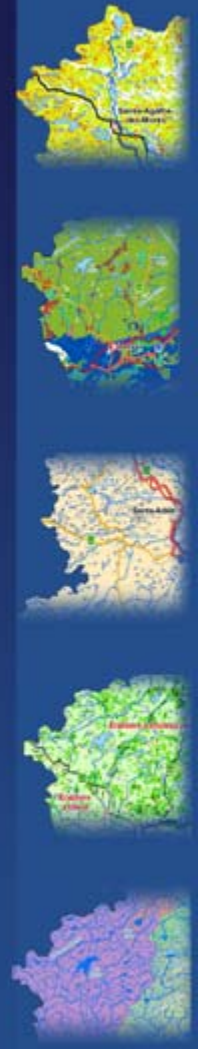
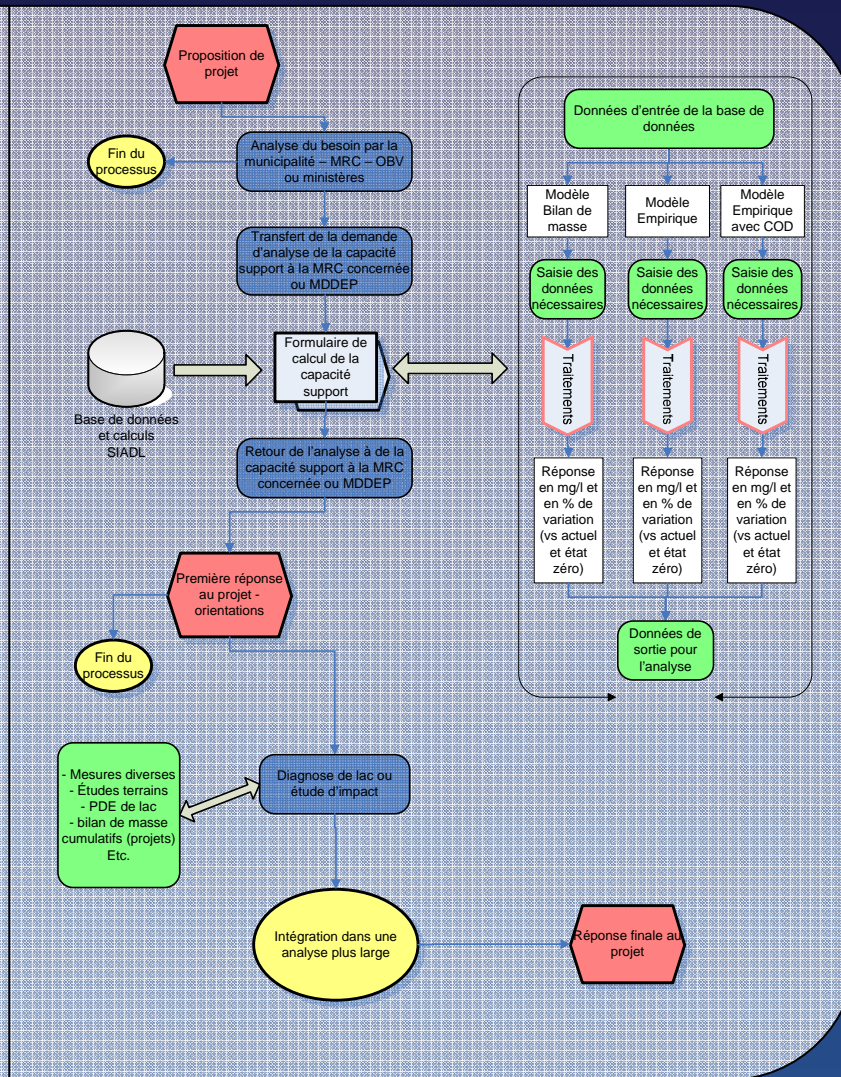
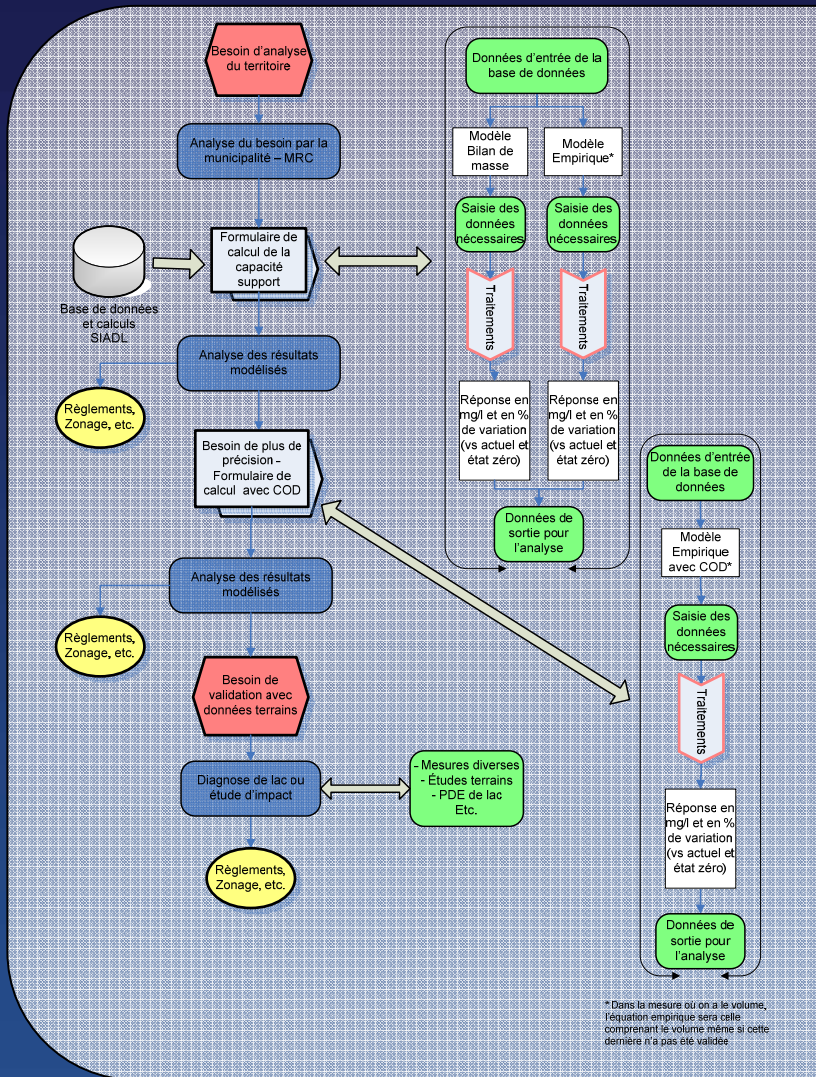
2 MRC iront de l'avant très bientôt pour analyser leurs projets (MRC Laurentides et MRC Argenteuil)

Prêt à être utilisé pour les 4 000 lacs des 4 MRC



Processus d'analyse du territoire

Processus d'analyse de projets



Bases de données interrogative

Bilan de charge

Lac: [dropdown]

Bassin versant entièrement dans SIADL: [checkbox] [Ininitialisation de la source]

Nom: [input] P mesuré (ug/l): [input]

Occupation du sol (en mètre carré)

Cultures annuelles :	Cultures pérennes :	Eau :
Actuel : [input] Prévus : [input]	Actuel : [input] Prévus : [input]	Actuel : [input] Prévus : [input]
Forêts ignées :	Forêts carbonnées :	Tourbière :
Actuel : [input] Prévus : [input]	Actuel : [input] Prévus : [input]	Actuel : [input] Prévus : [input]
Marécages/milieux humides :	Nus :	Urbain :
Actuel : [input] Prévus : [input]	Actuel : [input] Prévus : [input]	Actuel : [input] Prévus : [input]
Non classé :	Bilan des changements :	
Actuel : [input] Prévus : [input]	Surface actuelle : [input] Surface prévues : [input]	Bilan : [input]


Calculer [button] Aval [button]

Concentrations modélisées :

P (ug/l)	Augmentation (%)
État 0 : [input] Actuel : [input] Prévus : [input]	Par rapport à l'état0 Par rapport à l'état actuel

Apports par surfaces (% de l'apport total)

Cultures annuelles :	Cultures pérennes :	Non classé :
Actuel : [input] Prévus : [input]	Actuel : [input] Prévus : [input]	Actuel : [input] Prévus : [input]
Forêts ignées :	Forêts carbonnées :	Tourbière :
Actuel : [input] Prévus : [input]	Actuel : [input] Prévus : [input]	Actuel : [input] Prévus : [input]
Marécages/milieux humides :	Nus :	Urbain :
Actuel : [input] Prévus : [input]	Actuel : [input] Prévus : [input]	Actuel : [input] Prévus : [input]



Modèle empirique

Identifiant SIADL: [input]

Nom: [input] P mesuré (ug/l): [input]

Bâtiment à 100 mètres

Actuel	Prévus
[input]	[input]

Modèle empirique

P modélisé (ug/l): [input]
État 0: [input] Actuel: [input] Augmentation(%): [input]

Milieux humides (km2)

Actuel	Prévus	Calculer [button]
[input]	[input]	

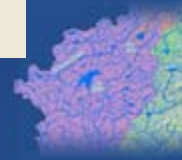

Nouvelle concentration modélisée (ug/l): [input]
Augmentation par rapport à: Actuel: [input] État 0: [input]
Augmentation (ug/l): [input] [input]
Augmentation (%): [input] [input]

Modèle empirique avec mesure de COD

P modélisé (ug/l): [input]
Actuel: [input] État 0: [input] Augmentation(%): [input]

COD Mesuré [input] Calculer [button]

Nouvelle concentration modélisée (ug/l): [input]
Augmentation par rapport à: Actuel: [input] État 0: [input]
Augmentation (ug/l): [input] [input]
Augmentation (%): [input] [input]



Cas pratique – Utilisation du bilan de charge adapté - Lac Forum

État	Valeur (µg/l)	Différence état naturel (%)	Différence état actuel 2000 (%)	Différence état actuel 2007 (%)	Importance relative de l'urbain (%)
État 0	3,5	-	-	-	
Actuel 2000	5,1	46	-	-	8
Actuel 2007 16 hab. 100 m 14 hab. 200 m 13 hab. 300 m	7,2	108	43	-	26
Projeté (hôtel) 200 ch. à 75% d'occ. (150 ch.)	9,3	166	82,6	29	22

Cas pratique (suite) – Utilisation du modèle empirique Lac Forum



État	Valeur (µg/l)	Différence état naturel (%)	Différence état actuel 2000 (%)	Différence état actuel 2007 (%)	Importance relative de l'urbain (%)
État 0	4,2	-	-	-	-
Actuel 2000	5,9	41	-	-	-
Actuel 2007 16 hab. 100 m	7,6	79	27	-	-
Impossible au-delà de 100 m	-	-	-	-	-

Merci à nos partenaires



FONDS D'ACTION
QUÉBÉCOIS POUR LE
DÉVELOPPEMENT DURABLE

Partenaire financier

Québec 



Municipalité régionale
de comté
des Pays-d'en-Haut



MRC DES LAURENTIDES



MRC
de La Rivière-du-Nord



Université
de Montréal

Ressources naturelles
et Faune

Québec 

Affaires municipales
et Régions

Québec 



CRE Laurentides
Votre réseau environnemental

Projet
SIADL **Abrinord**
Agence de bassin versant de la rivière du nord



Projet
SIADL