

Les lacs du Québec méridional : Morphométrie des cuvettes, physiographie de leurs bassins versants, occupation humaine et incidences sur la qualité de l'eau et sur les plantes aquatiques

Richard Carignan
Université de Montréal



ROBVQ, 4 juin 2015

Image Landsat

Google earth

P

Richard Carignan
Université de Montréal

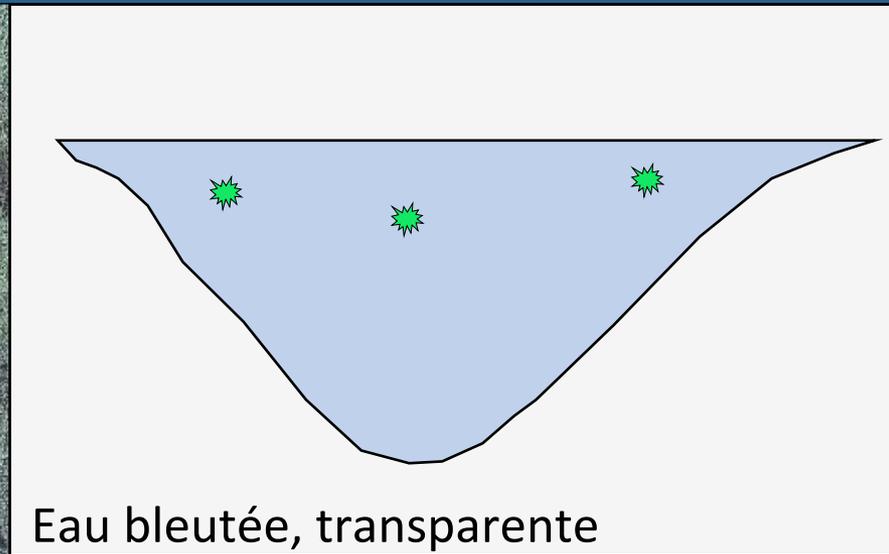
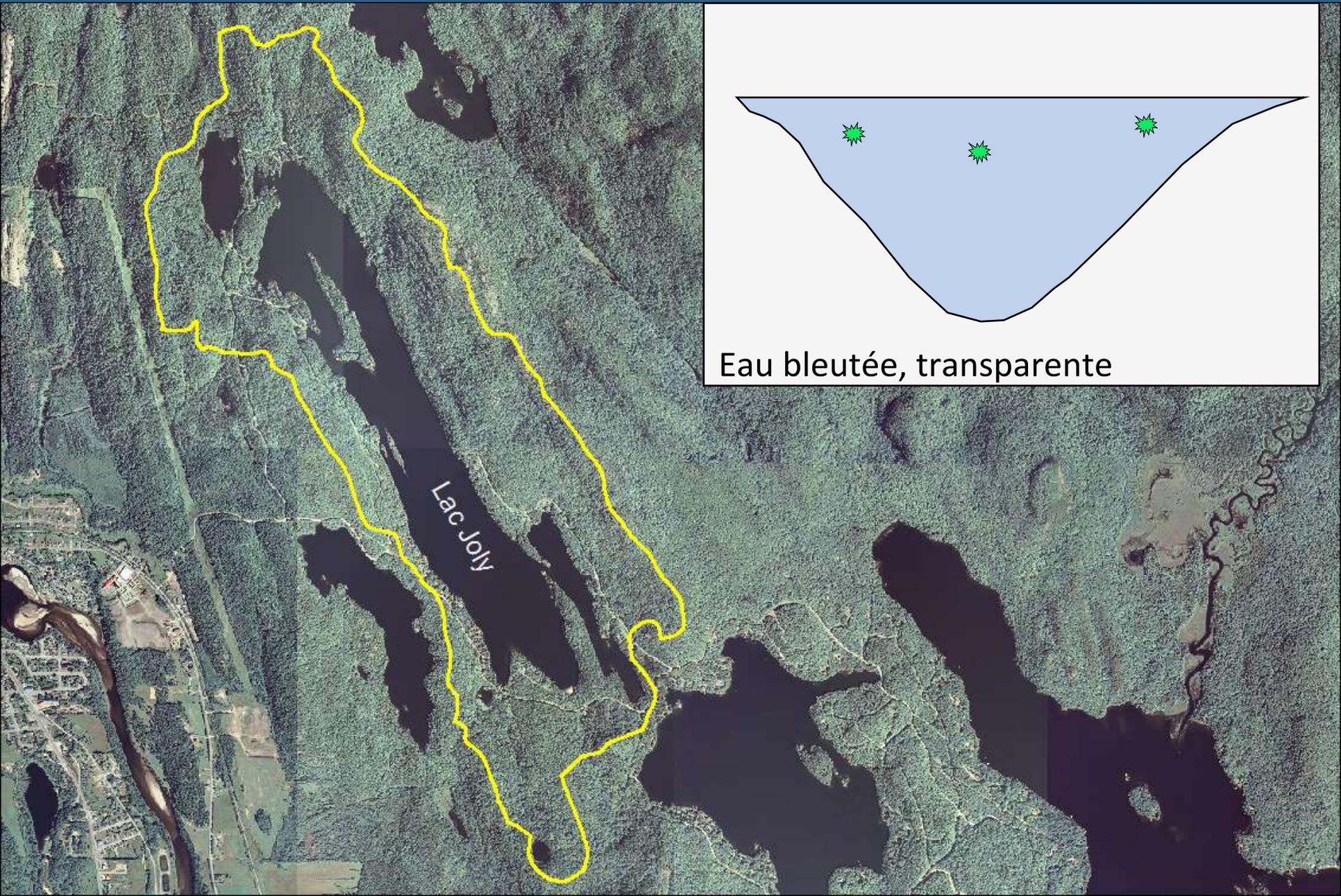


ROBVQ, 4 juin 2015

Image Landsat

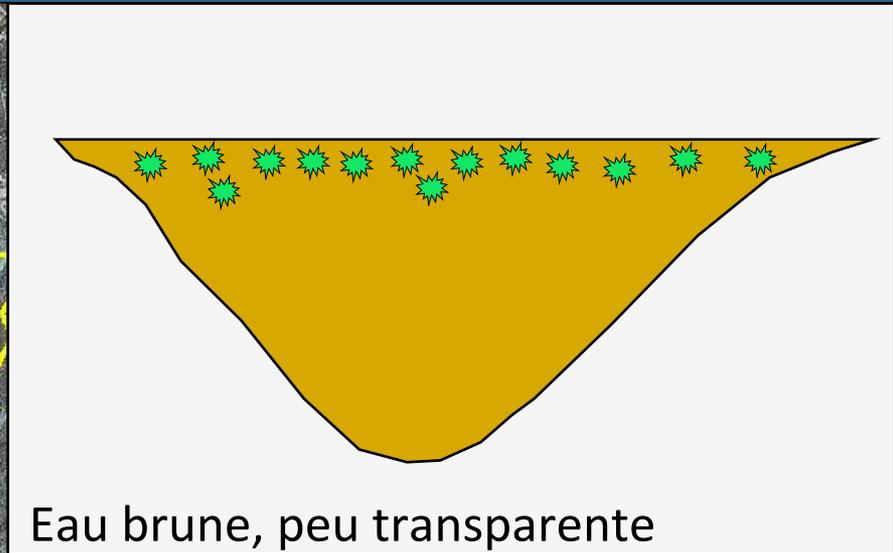
Google earth

Lac Joly, Laurentides



Eau bleutée, transparente

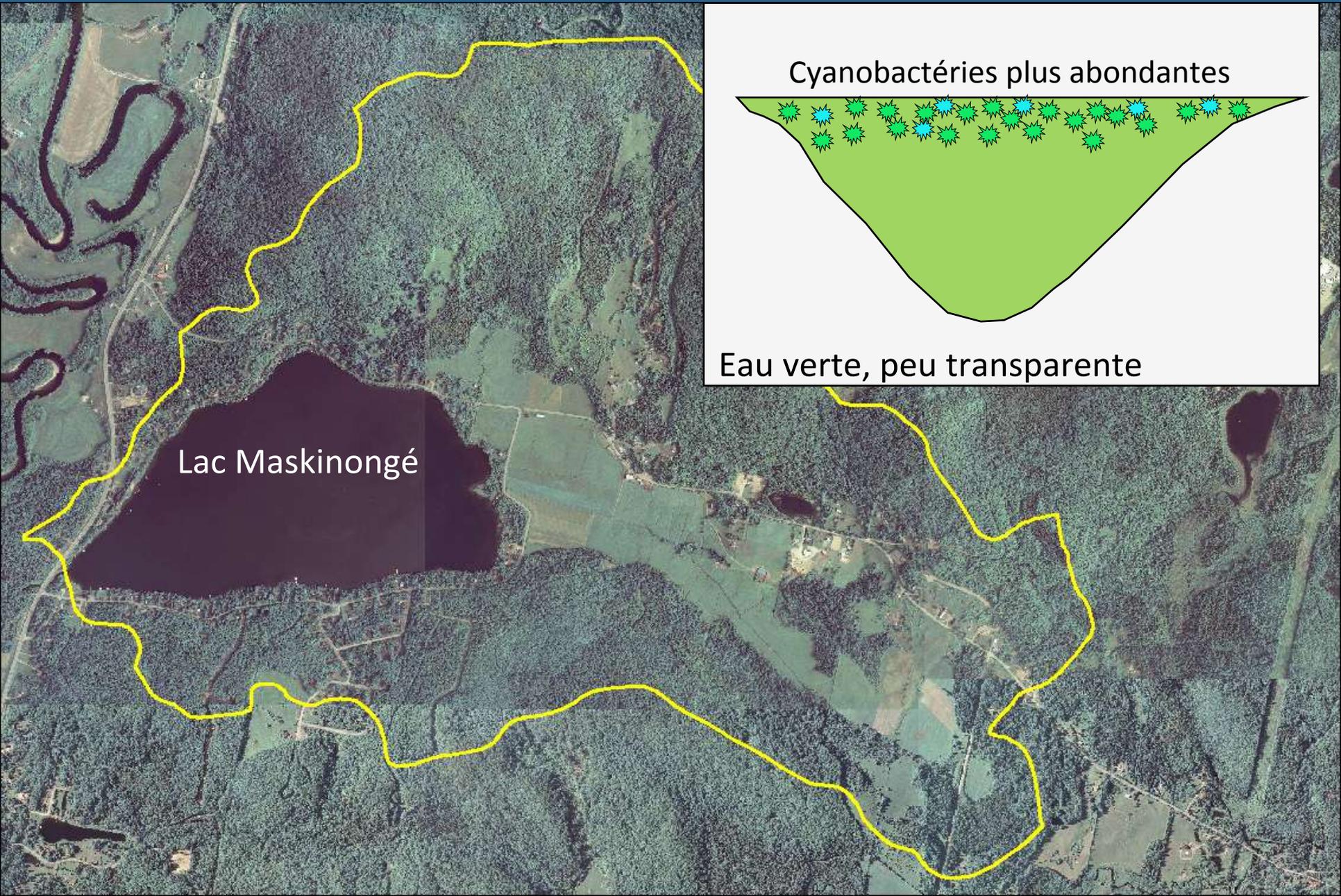
Lac Cardin, Laurentides



Eau brune, peu transparente

Lac Cardin

Lac Maskinongé, Laurentides



Lac Maskinongé

Cyanobactéries plus abondantes

Eau verte, peu transparente

Le tableau périodique des éléments (114)

Essentiels à la vie (20)

Limitant en eaux douces

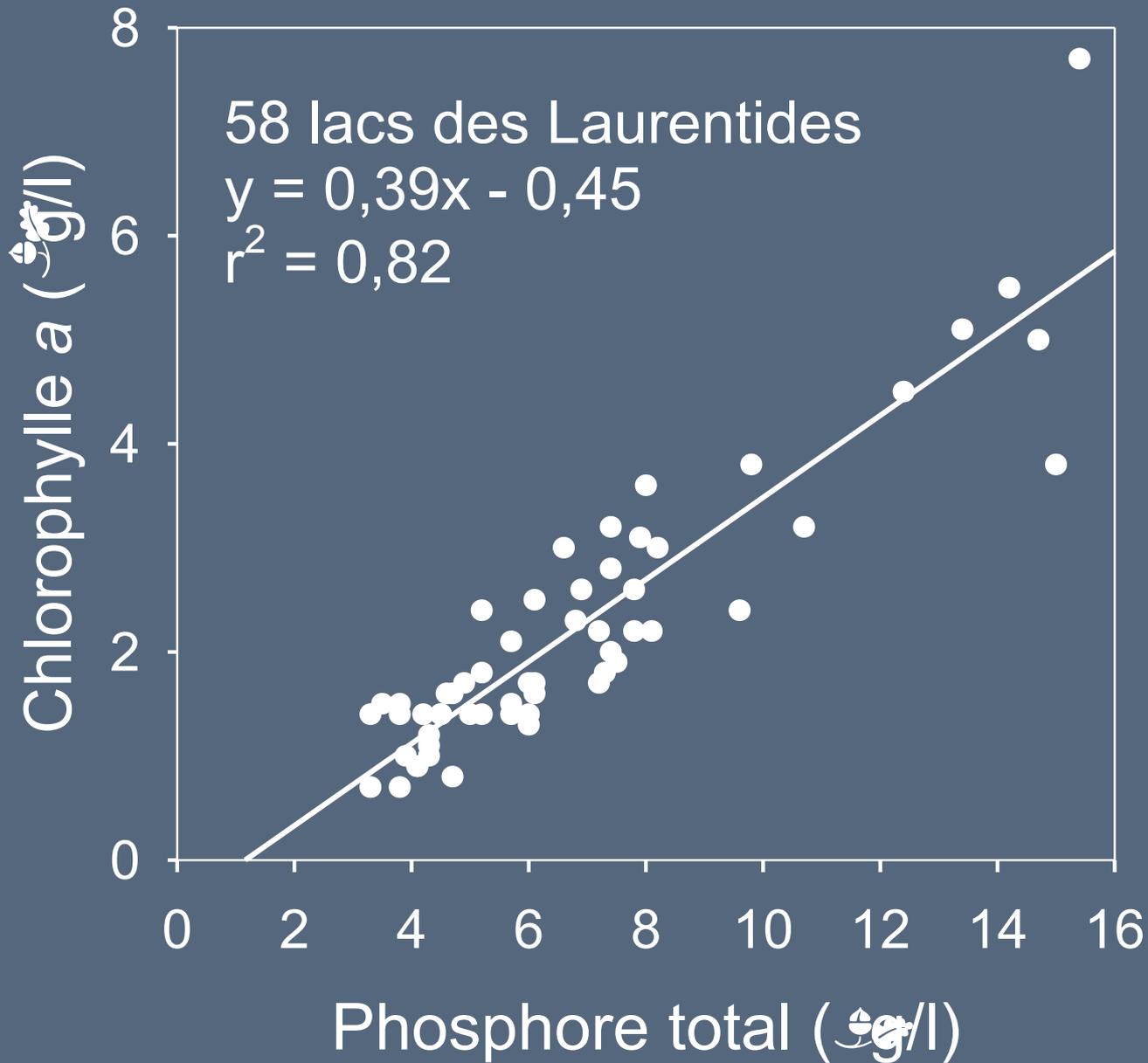
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| hydrogen 1 H 1.0079 | | | | | | | | | | | | | | | | | helium 2 He 4.0026 | | | | | | |
| lithium 3 Li 6.941 | beryllium 4 Be 9.0122 | | | | | | | | | | | | | | | | | boron 5 B 10.811 | carbon 6 C 12.011 | nitrogen 7 N 14.007 | oxygen 8 O 15.999 | fluorine 9 F 18.998 | neon 10 Ne 20.180 |
| sodium 11 Na 22.990 | magnesium 12 Mg 24.305 | | | | | | | | | | | | | | | | | aluminum 13 Al 26.982 | silicon 14 Si 28.086 | phosphorus 15 P 30.974 | sulfur 16 S 32.065 | chlorine 17 Cl 35.453 | argon 18 Ar 39.948 |
| potassium 19 K 39.098 | calcium 20 Ca 40.078 | scandium 21 Sc 44.956 | lithium 22 Ti 47.867 | vanadium 23 V 50.942 | chromium 24 Cr 51.996 | manganese 25 Mn 54.938 | iron 26 Fe 55.845 | cobalt 27 Co 58.933 | nickel 28 Ni 58.693 | copper 29 Cu 63.546 | zinc 30 Zn 65.39 | gallium 31 Ga 69.723 | germanium 32 Ge 72.61 | arsenic 33 As 74.922 | selenium 34 Se 78.96 | bromine 35 Br 79.904 | krypton 36 Kr 83.80 | | | | | | |
| rubidium 37 Rb 85.468 | strontium 38 Sr 87.62 | yttrium 39 Y 88.906 | zirconium 40 Zr 91.224 | niobium 41 Nb 92.906 | molybdenum 42 Mo 95.94 | technetium 43 Tc [98] | ruthenium 44 Ru 101.07 | rhodium 45 Rh 102.91 | palladium 46 Pd 106.42 | silver 47 Ag 107.87 | cadmium 48 Cd 112.41 | indium 49 In 114.82 | tin 50 Sn 118.71 | antimony 51 Sb 121.76 | tellurium 52 Te 127.60 | iodine 53 I 126.90 | xenon 54 Xe 131.29 | | | | | | |
| caesium 55 Cs 132.91 | barium 56 Ba 137.33 | 57-70 * | lutetium 71 Lu 174.97 | hafnium 72 Hf 178.49 | tantalum 73 Ta 180.95 | tungsten 74 W 183.84 | rhenum 75 Re 186.21 | osmium 76 Os 190.23 | iridium 77 Ir 192.22 | platinum 78 Pt 195.08 | gold 79 Au 196.97 | mercury 80 Hg 200.59 | thallium 81 Tl 204.38 | lead 82 Pb 207.2 | bismuth 83 Bi 208.98 | polonium 84 Po [209] | astatine 85 At [210] | radon 86 Rn [222] | | | | | |
| francium 87 Fr [223] | radium 88 Ra [226] | 89-102 * * | lawrencium 103 Lr [262] | rutherfordium 104 Rf [261] | dubnium 105 Db [262] | seaborgium 106 Sg [266] | bohrium 107 Bh [264] | hassium 108 Hs [269] | meitnerium 109 Mt [268] | ununillium 110 Uun [271] | unununium 111 Uuu [272] | ununbium 112 Uub [277] | ununquadium 114 Uuq [289] | | | | | | | | | | |

* Lanthanide series

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| lanthanum 57 La 138.91 | cerium 58 Ce 140.12 | praseodymium 59 Pr 140.91 | neodymium 60 Nd 144.24 | promethium 61 Pm [145] | samarium 62 Sm 150.36 | europium 63 Eu 151.96 | gadolinium 64 Gd 157.25 | terbium 65 Tb 158.93 | dysprosium 66 Dy 162.50 | holmium 67 Ho 164.93 | erbium 68 Er 167.26 | thulium 69 Tm 168.93 | ytterbium 70 Yb 173.04 |
|----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|

** Actinide series

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|
| actinium 89 Ac [227] | thorium 90 Th 232.04 | protactinium 91 Pa 231.04 | uranium 92 U 238.03 | neptunium 93 Np [237] | plutonium 94 Pu [244] | americium 95 Am [243] | curium 96 Cm [247] | berkelium 97 Bk [247] | californium 98 Cf [251] | einsteinium 99 Es [252] | fermium 100 Fm [257] | mendelevium 101 Md [258] | nobelium 102 No [259] |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|



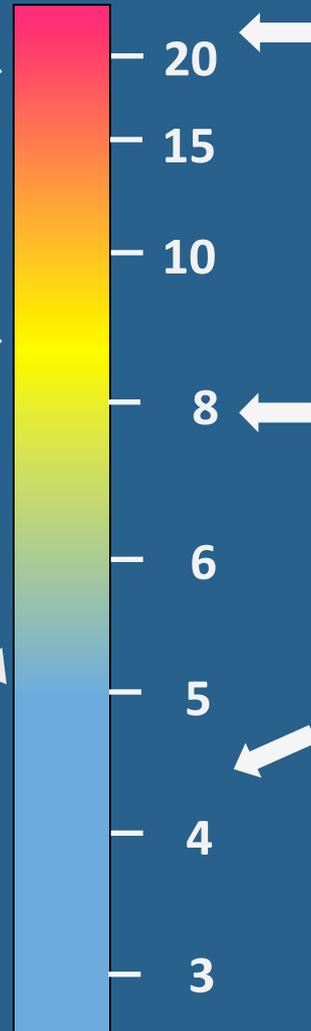
Facteurs limitants

Phosphore total ($\mu\text{g/l}$)



Cyanobactéries nuisibles

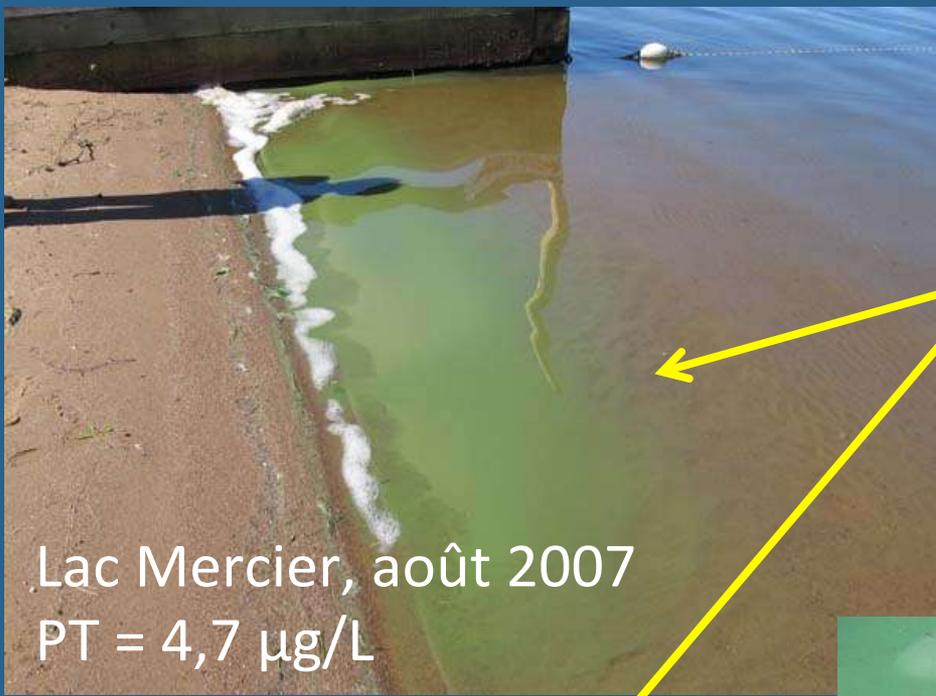
1 $\mu\text{g/l}$ = une partie par milliard
= 1 dé-à-coudre
dans une piscine olympique!



Les cyanobactéries dans les lacs des Laurentides-Lanaudière

Accumulations souvent très locales, éphémères et peu prévisibles

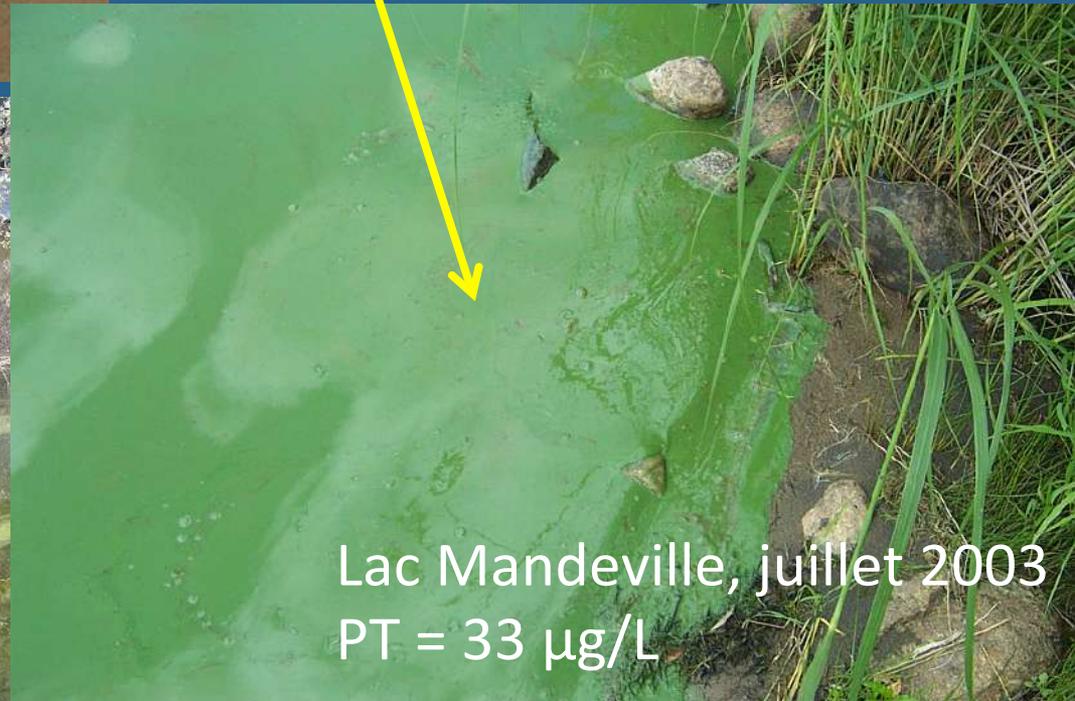
Parfois très sérieuses et liées à l'agriculture non durable



Lac Mercier, août 2007
PT = 4,7 $\mu\text{g/L}$

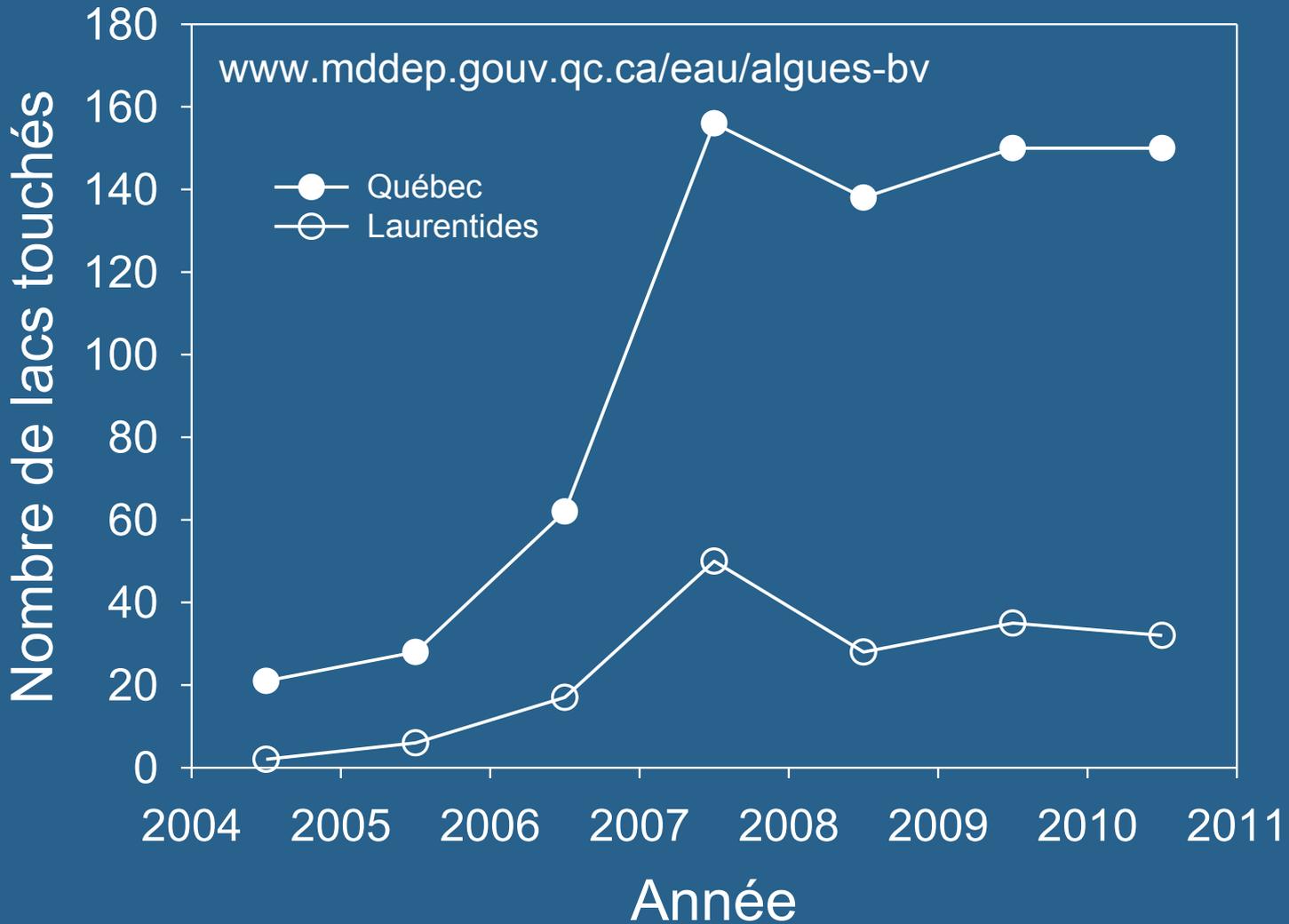


Beaulac, novembre 2008
PT = 6,2 $\mu\text{g/L}$



Lac Mandeville, juillet 2003
PT = 33 $\mu\text{g/L}$

La "crise" des cyanobactéries au Québec



Un phénomène surtout médiatique

Mais d'où vient le phosphore dans les lacs de villégiature (Laurentides) ?

Des habitations ?

D'autres activités humaines dans le bassin versant ?

D'autres propriétés naturelles des lacs et de leurs bassins versants ?

Approche

Relations empiriques entre [P] et les propriétés diverses des lacs tirées de :

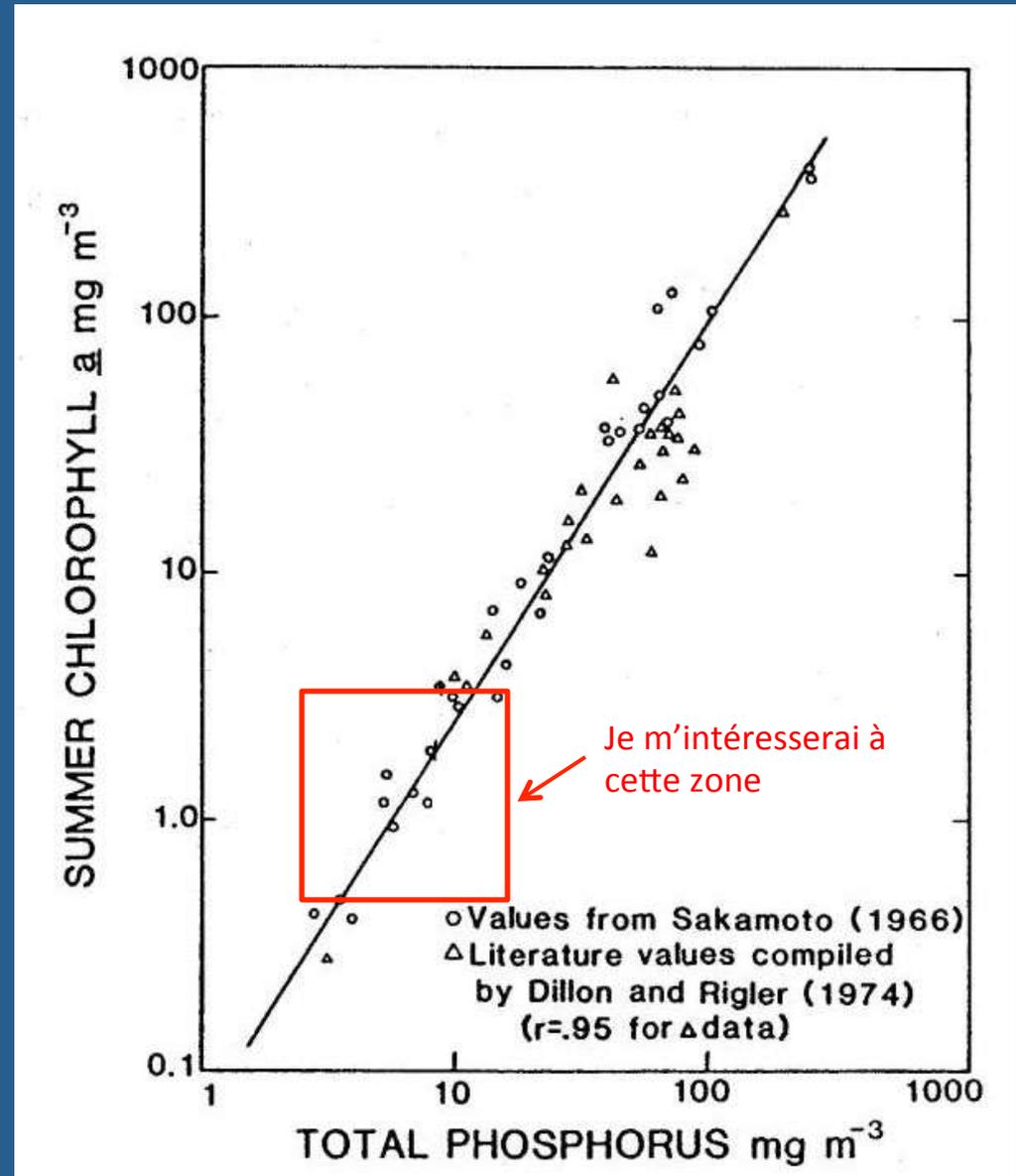
- la BDTQ (**B**ase de **D**onnées **T**opographiques du **Q**uébec)
- les ortho photographies aériennes (2007) du MRNF
- levés bathymétriques

« empiriques » = fondées sur des observations

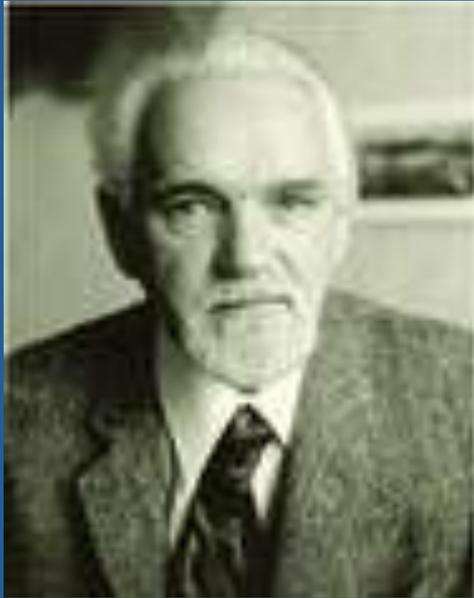
Repères historiques

Pourquoi s'intéresse t'on
au phosphore des lacs ?

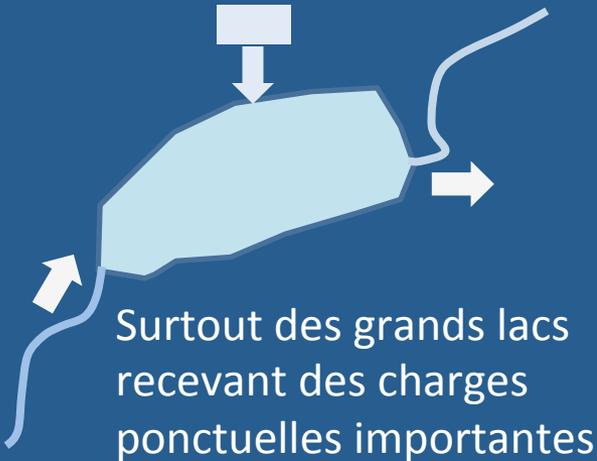
Sakamoto, 1966
(il y a ≈ 50 ans !)



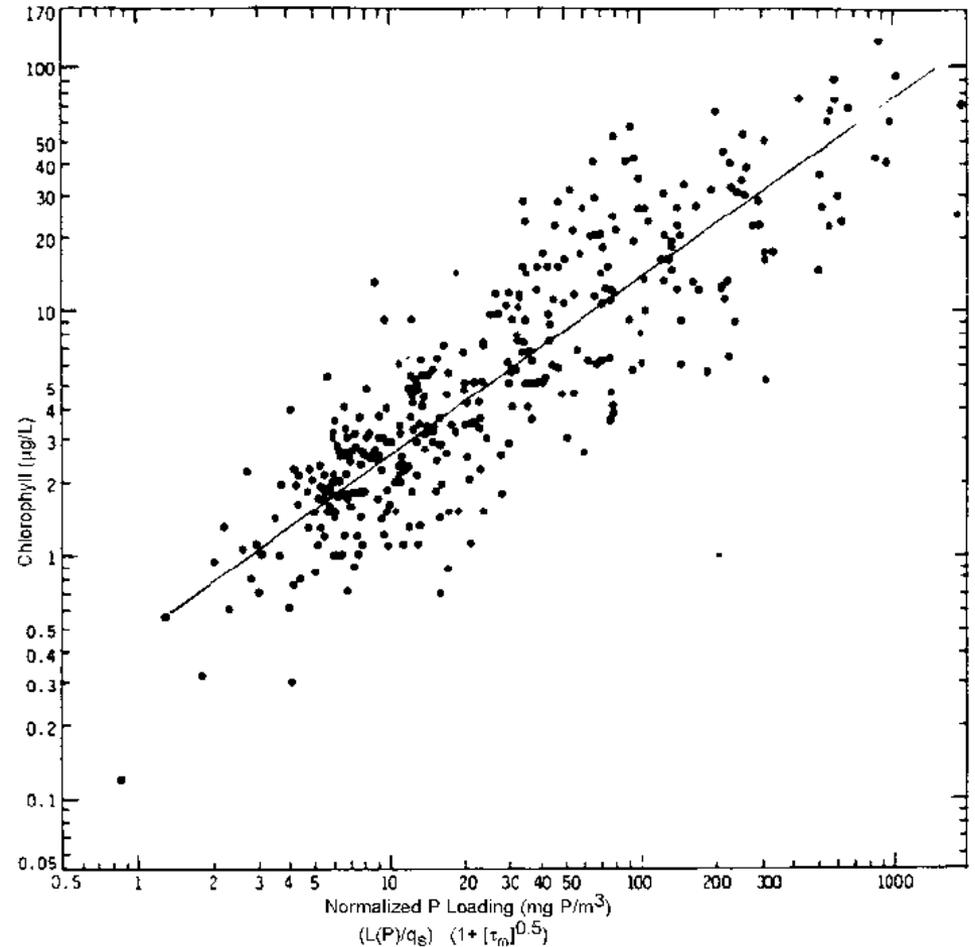
R.A. Vollenweider (1970)



Repères historiques Modèles empiriques



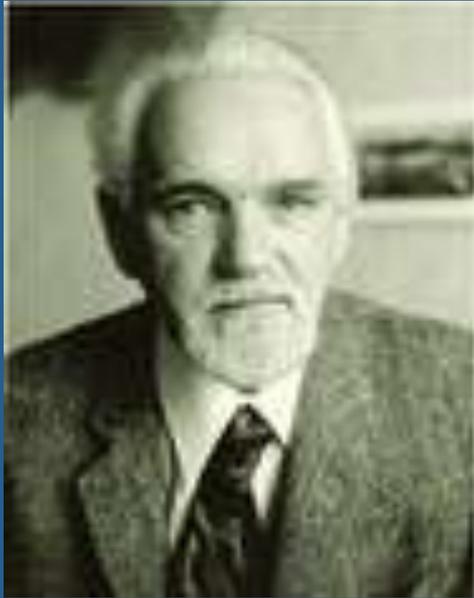
Chlorophylle ($\mu\text{g/L}$)



Updated Vollenweider-OECD normalized P loading/chlorophyll response relationship

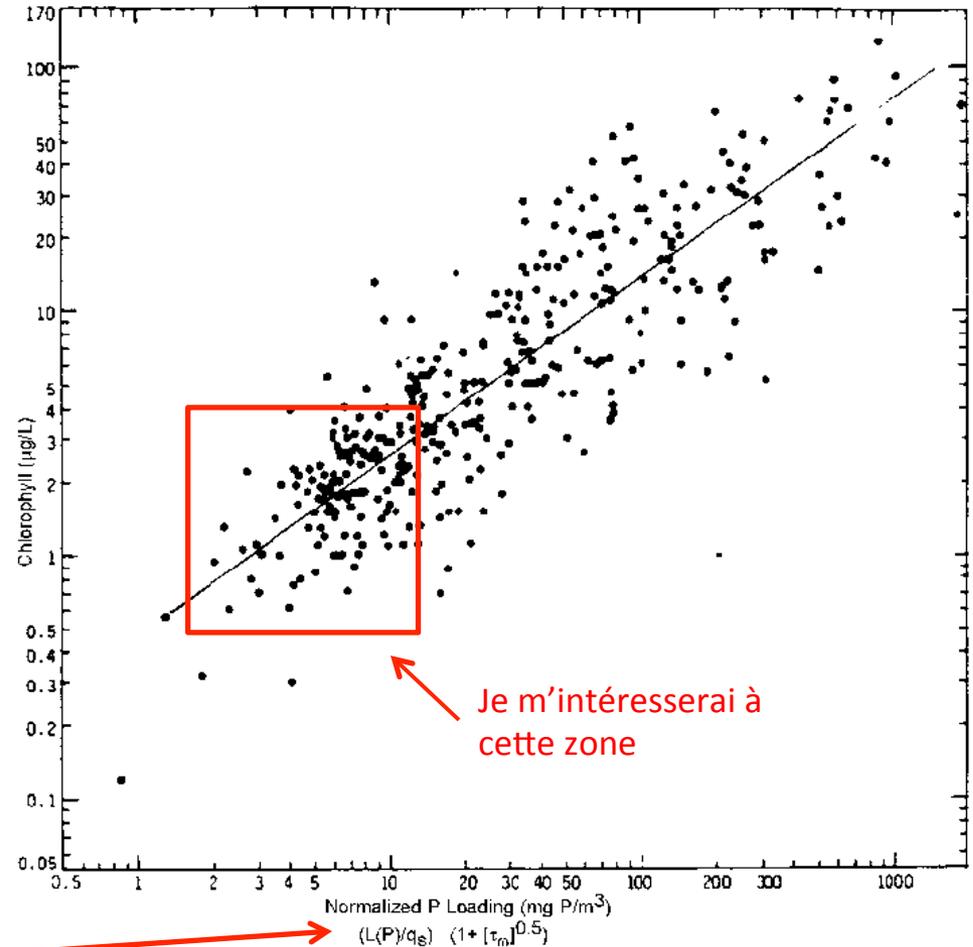
P prédit ($\mu\text{g/L}$)

R.A. Vollenweider (1970)



Repères historiques Modèles empiriques

Chlorophylle ($\mu\text{g/L}$)



Je m'intéresserai à cette zone

Charge normalisée en P
 $(L_p/q_s) (1 + [\tau_m]^{0.5})$

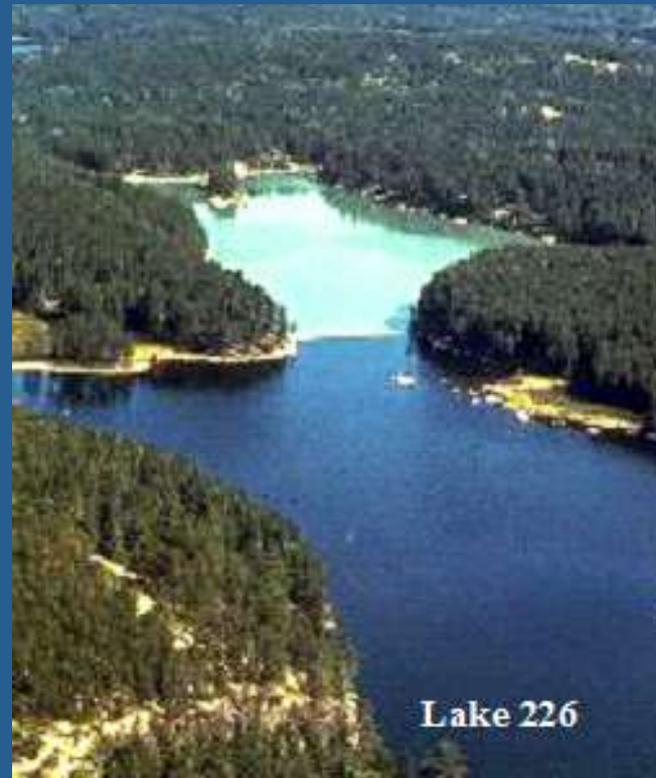
Updated Vollenweider-OECD normalized
P loading/chlorophyll response relationship

P prédit ($\mu\text{g/L}$)

Repères historiques

Première démonstration expérimentale en milieu naturel

D.W. Schindler (1971)



+N +C +P

+N +C

Le phosphore est le principal élément limitant (la biomasse algale pélagique) dans les lacs du Bouclier canadien (et d'ailleurs dans le monde)

P.J. Dillon (1975-2006)



Repères historiques Modèle « explicite »

$$[P] = \frac{L(1-R)}{q_s}$$

L = charge totale en P (mg/m²/a)

q_s = charge hydraulique (m³/m²/a) ou (m/a)

R = coefficient de rétention interne du P

L/q_s = mg/m³ = concentration

Lake and Reservoir Management 22(1):7-18, 2006
© Copyright by the North American Lake Management Society 2006

(= LCM V3.0, 2006)

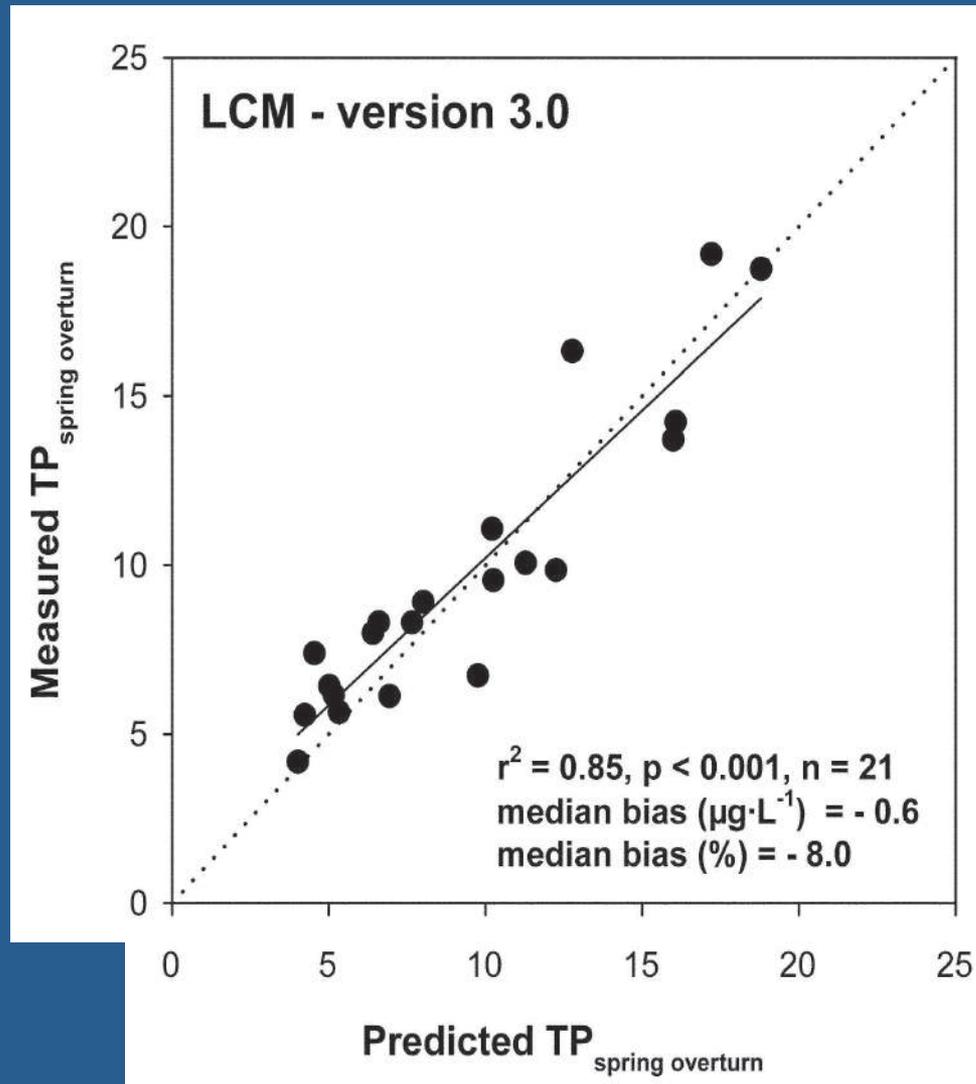
A Review of the Components, Coefficients and Technical Assumptions of Ontario's Lakeshore Capacity Model

**A.M. Paterson, P.J. Dillon¹, N.J. Hutchinson², M.N. Futter, B.J. Clark, R.B. Mills,
R.A. Reid and W.A. Scheider³**

Ontario Ministry of the Environment (MOE)
Environmental Monitoring and Reporting Branch (EMRB)
Dorset Environmental Science Centre
1026 Bellwood Acres Road, PO Box 39
Dorset, ON P0A 1E0
Canada

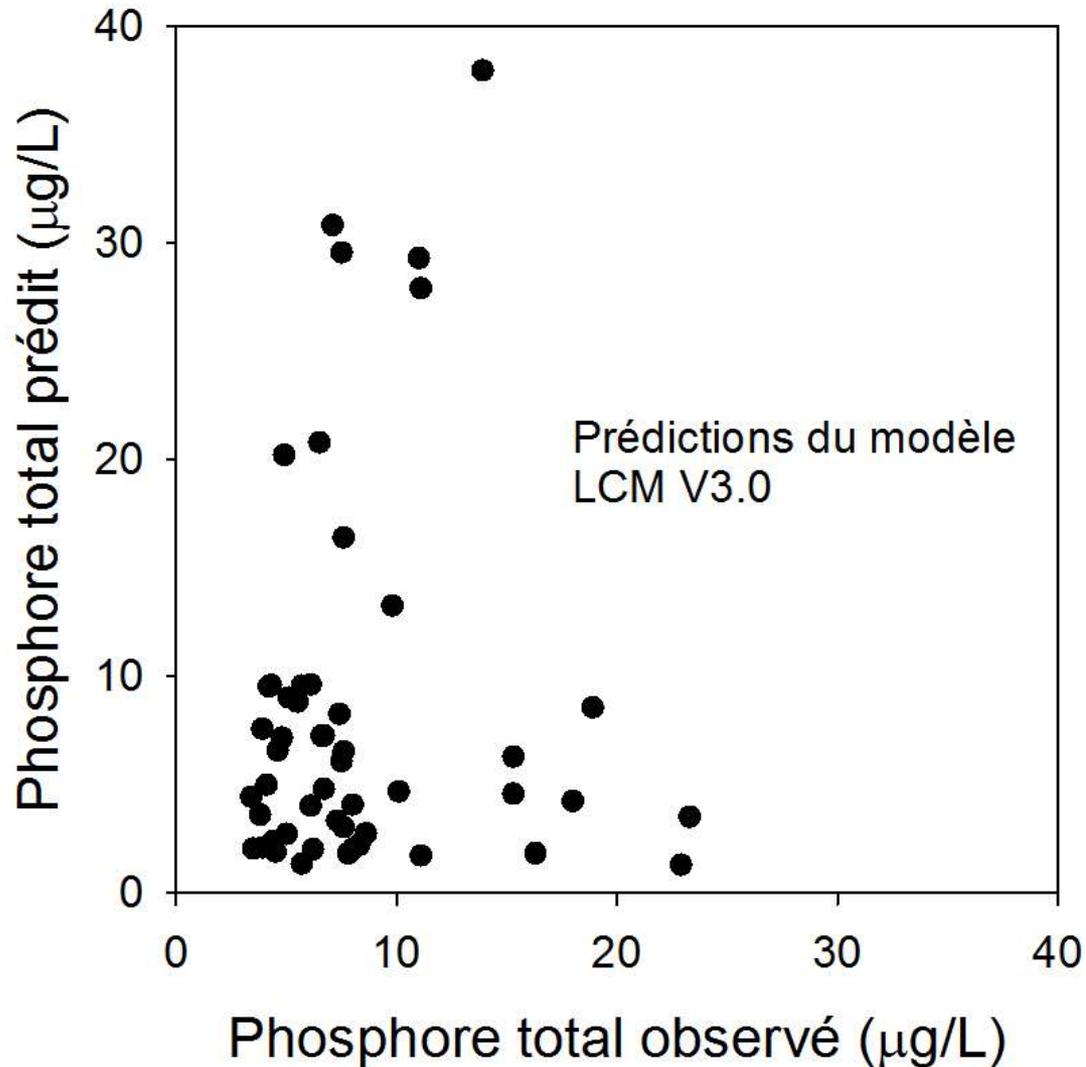
Prédictions du modèle LCM V3.0

(21 lacs habités du Bouclier précambrien d'Ontario)



Dans ce modèle, l'occupation humaine du bassin versant joue un rôle majeur

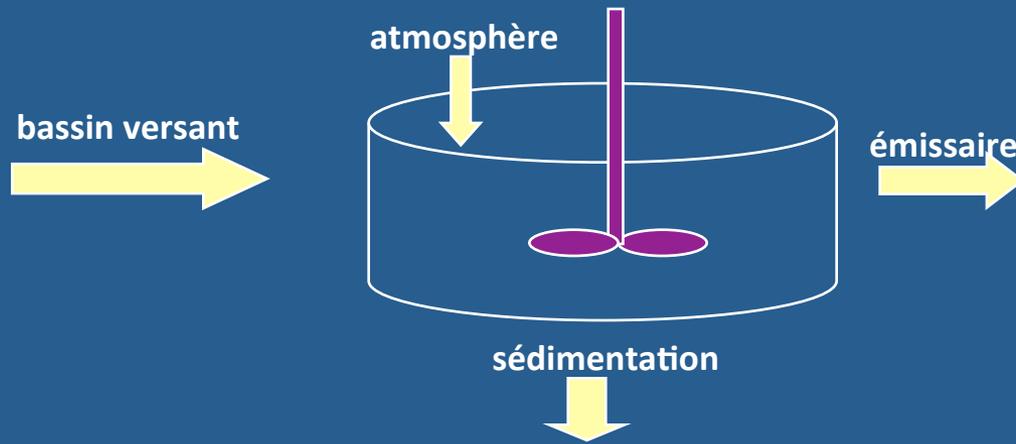
Pourtant, dans 53 lacs des Laurentides...et ailleurs en Ontario



Pourquoi ?

Au moins trois raisons liées aux suppositions initiales du LCM :

- 1- lac = réacteur homogène à l'état stationnaire
- 2- coefficients d'exportation
- 3- coefficients de rétention

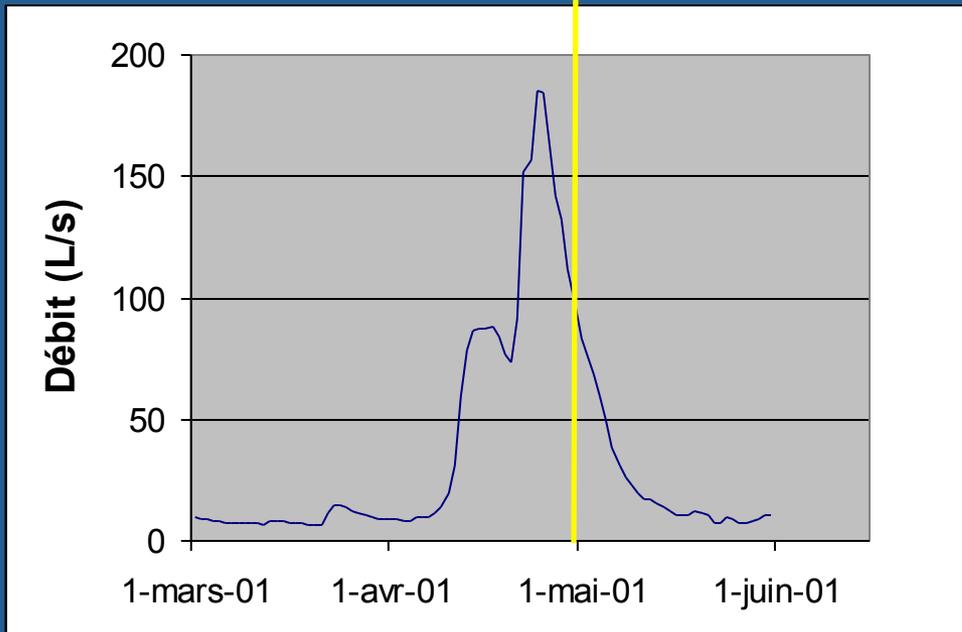


Raison 1 :

$$[P] = \frac{L}{Q} (1 - R)$$

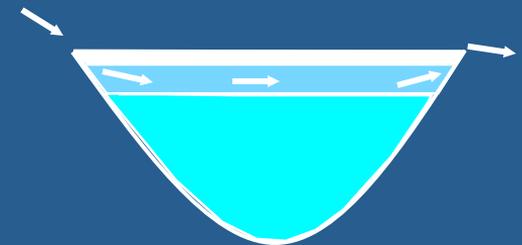
Débit à l'exutoire du lac Croche (2001)

Départ de la glace



Suppositions

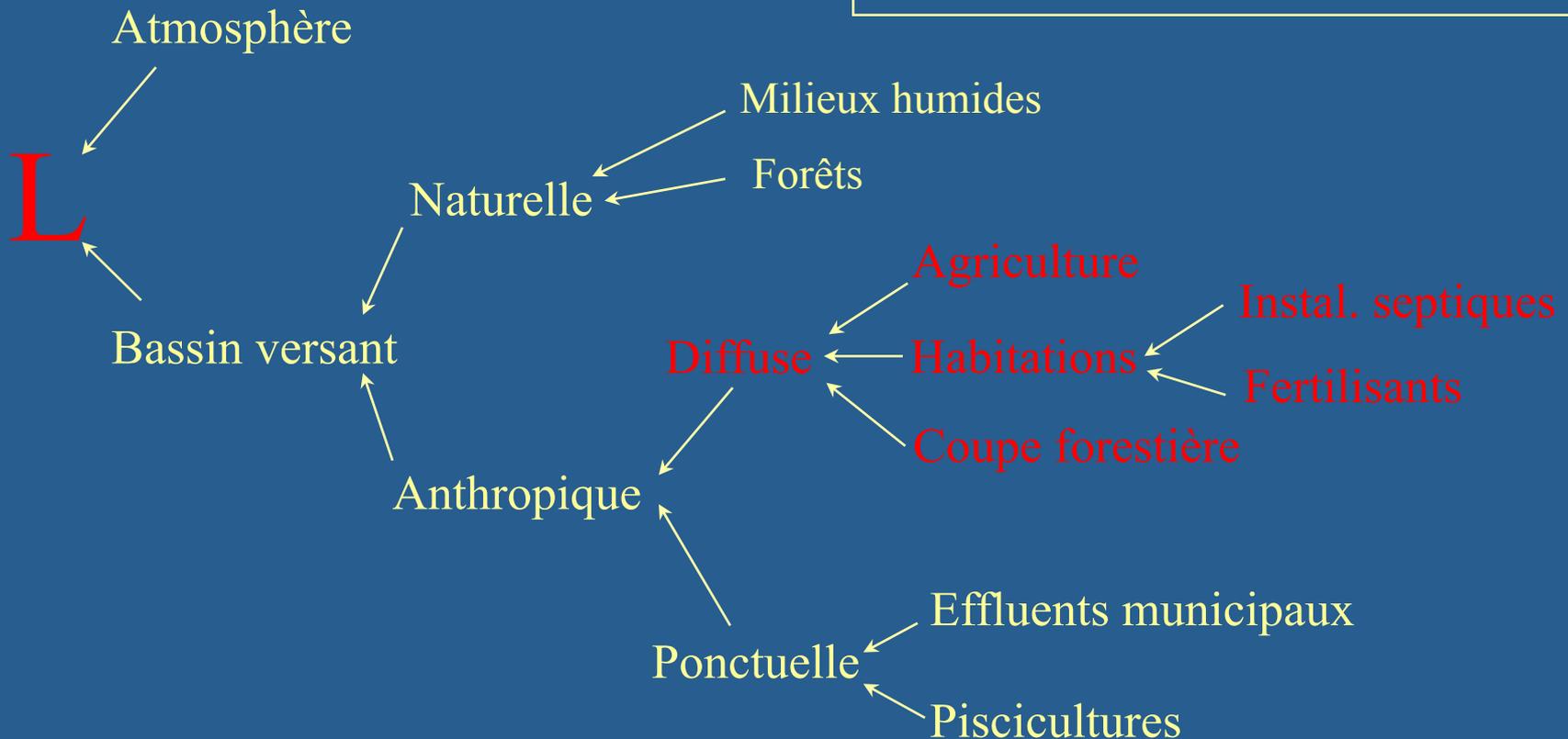
- 1- Réacteur homogène
- 2- État stationnaire



Raison 2 :

Modèles « explicites » : certains coefficients sont mal connus

$$[P] = \frac{L}{q_s} (1 - R)$$



Raison 2 :

Les oxydes de Fe et Al sont abondants dans les podzols acides du Bouclier précambrien et leur affinité pour le $\text{PO}_4\text{-P}$ est très grande

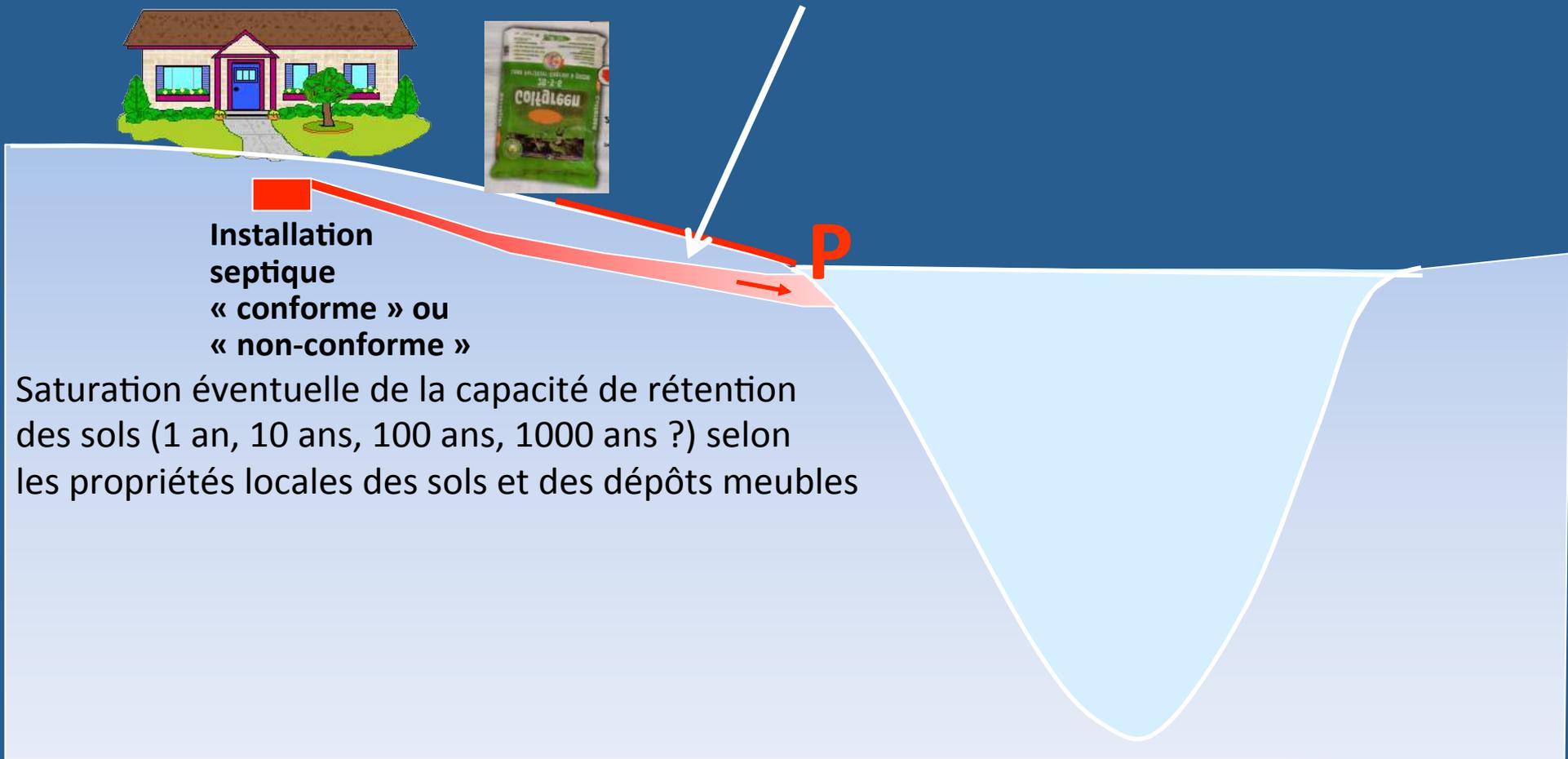
La progression et la forme du panache de saturation en P issu d'une installation septique sont extrêmement difficiles à prévoir



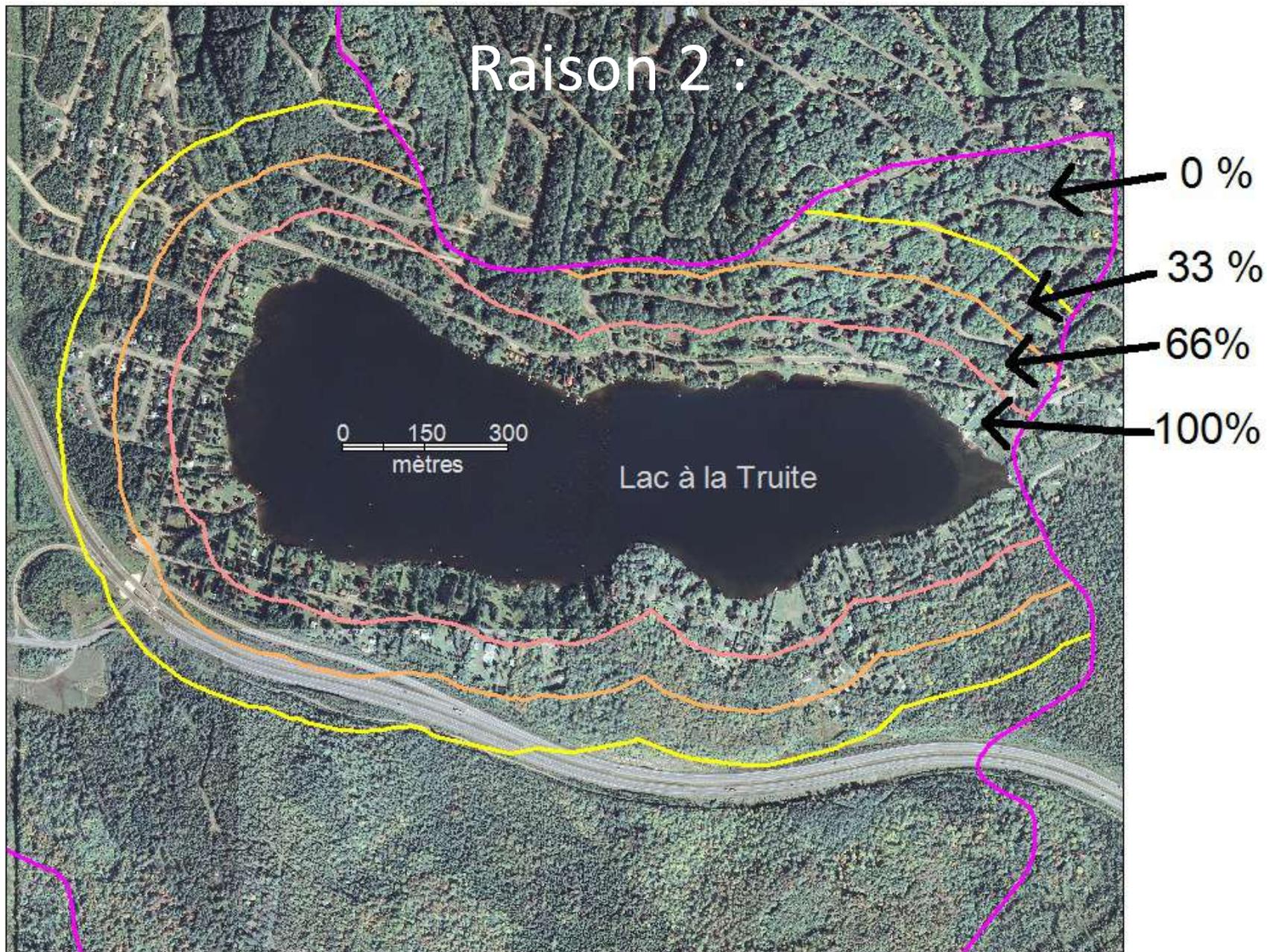
Installation
septique
« conforme » ou
« non-conforme »

P

Saturation éventuelle de la capacité de rétention des sols (1 an, 10 ans, 100 ans, 1000 ans ?) selon les propriétés locales des sols et des dépôts meubles



Raison 2 :



Raison 3 :

Modèles « explicites » Les sous-modèles de rétention sont purement empiriques

$$[P] = \frac{L}{q_s} (1 - R)$$

$$R = \frac{1}{1 + 1/(t_w f)} \quad (\text{Vollenweider})$$

$$R = \frac{v_s}{v_s + q_s} \quad (\text{Dillon et al.})$$

$$R = 0.42e^{-0.27q_s} + 0.54e^{-.01q_s} \quad (\text{Kirchner \& Dillon, 1975})$$

[P] = Concentration en P (mg/m³)

L = Charge en P (mg/m²/a)

q_s = Charge hydraulique (m³/m²/a)

R = Rétention

t_w = Temps de renouvellement (a)

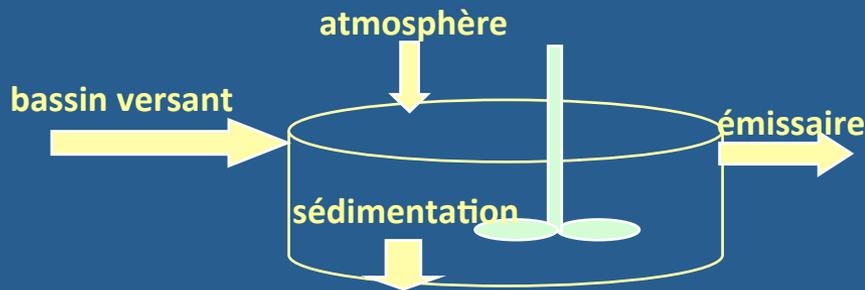
f = Coefficient de perte par sédimentation (a⁻¹)

v_s = Vitesse de sédimentation (m/a)

Raison 3 : Modèles « explicites » d'eutrophisation

$$[P] = \frac{L}{q_s} (1 - R)$$

$$R = \frac{V_s}{V_s + q_s}$$



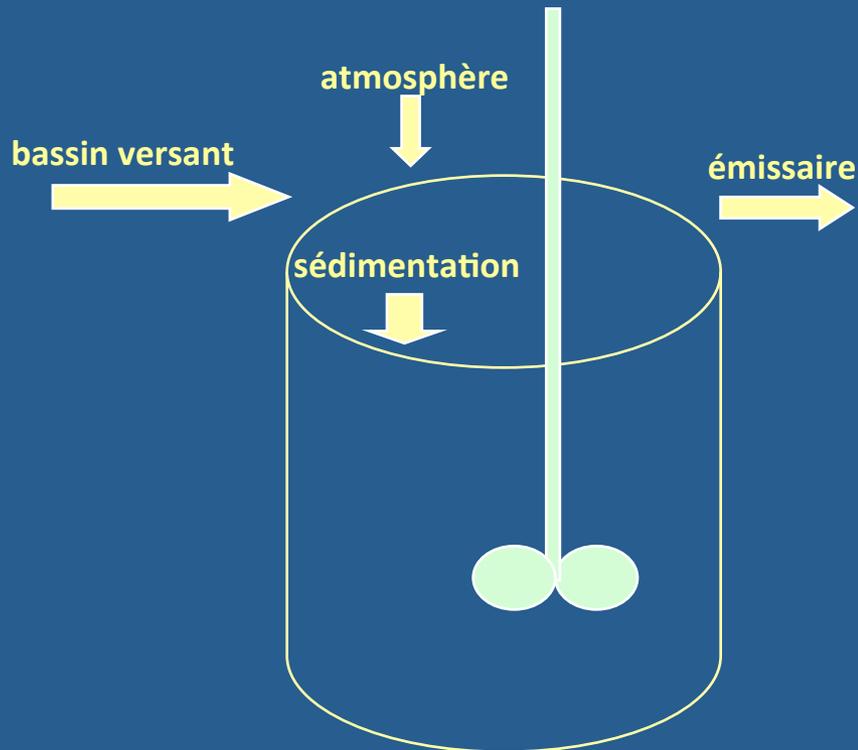
V_s = vitesse de sédimentation du P
= constante 12,4 m/a oxygène
7,2 m/a anoxique

q_s = charge hydraulique (m/a)

Raison 3 : Modèles « explicites » d'eutrophisation

$$[P] = \frac{L}{q_s} (1 - R)$$

$$R = \frac{V_s}{V_s + q_s}$$



V_s = vitesse de sédimentation du P
= constante 12,4 m/a oxygène
7,2 m/a anoxique

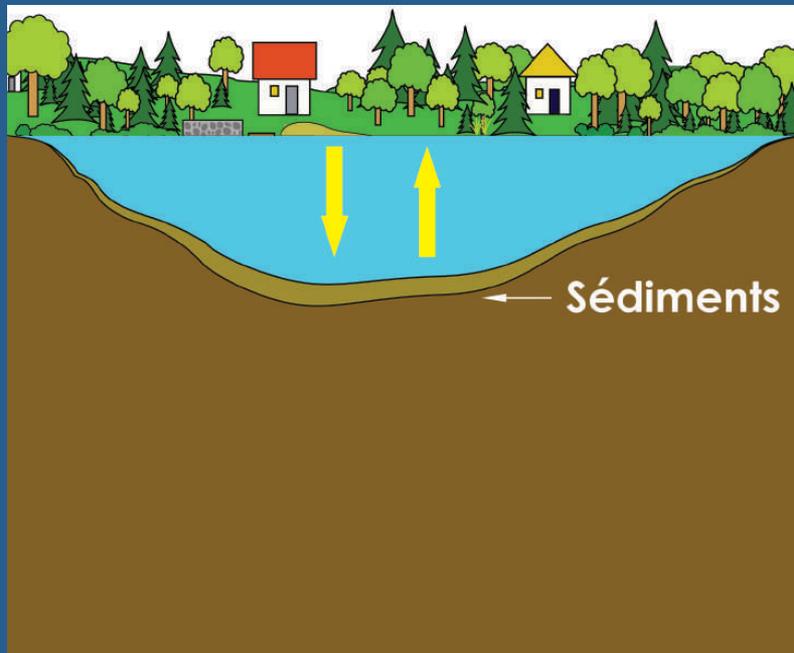
q_s = charge hydraulique (m/a)

Il n'y a aucune notion de volume récepteur ou de temps de séjour hydraulique dans cette expression !

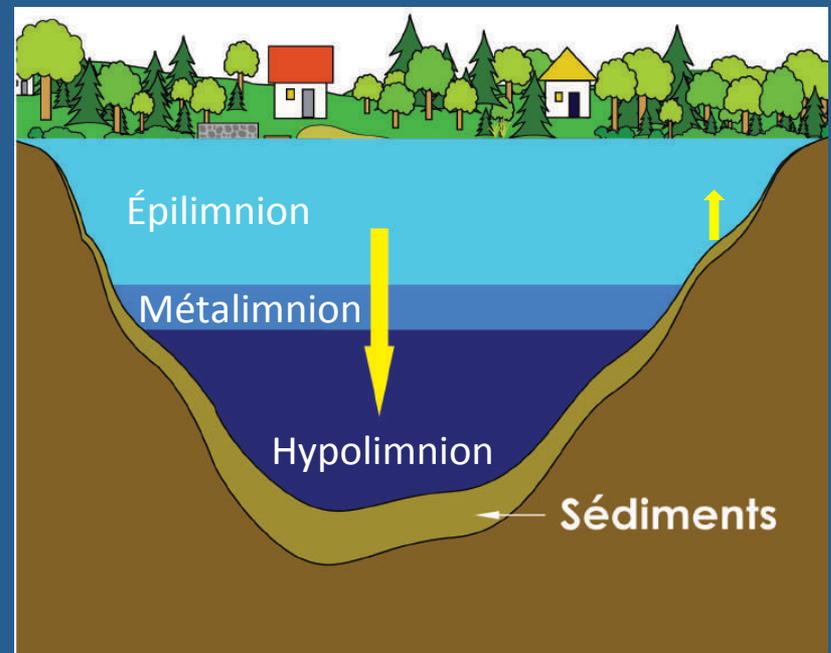
Raison 3 :

$$R = \frac{v_s}{v_s + q_s}$$

Corollaire du modèle LCM :
ces deux systèmes devraient avoir des [P] identiques !



Superficie du lac : 1 km²
Superficie du bassin versant : 10 km²
Habitations : 100



Superficie du lac : 1 km²
Superficie du bassin versant : 10 km²
Habitations : 100

Raison 3b :

$$R = \frac{v_s}{v_s + q_s}$$

Lac Morin : 5 $\mu\text{g/L P}$



Lac Beaulac : 6 $\mu\text{g/L P}$



Est-t'il raisonnable de penser que R est égal dans ces deux situations ?

Conclusion : Des considérations théoriques indiquent que LCM3 ne devrait pas fonctionner

On recommence :

D'où vient le phosphore dans les lacs de villégiature (Laurentides) ?

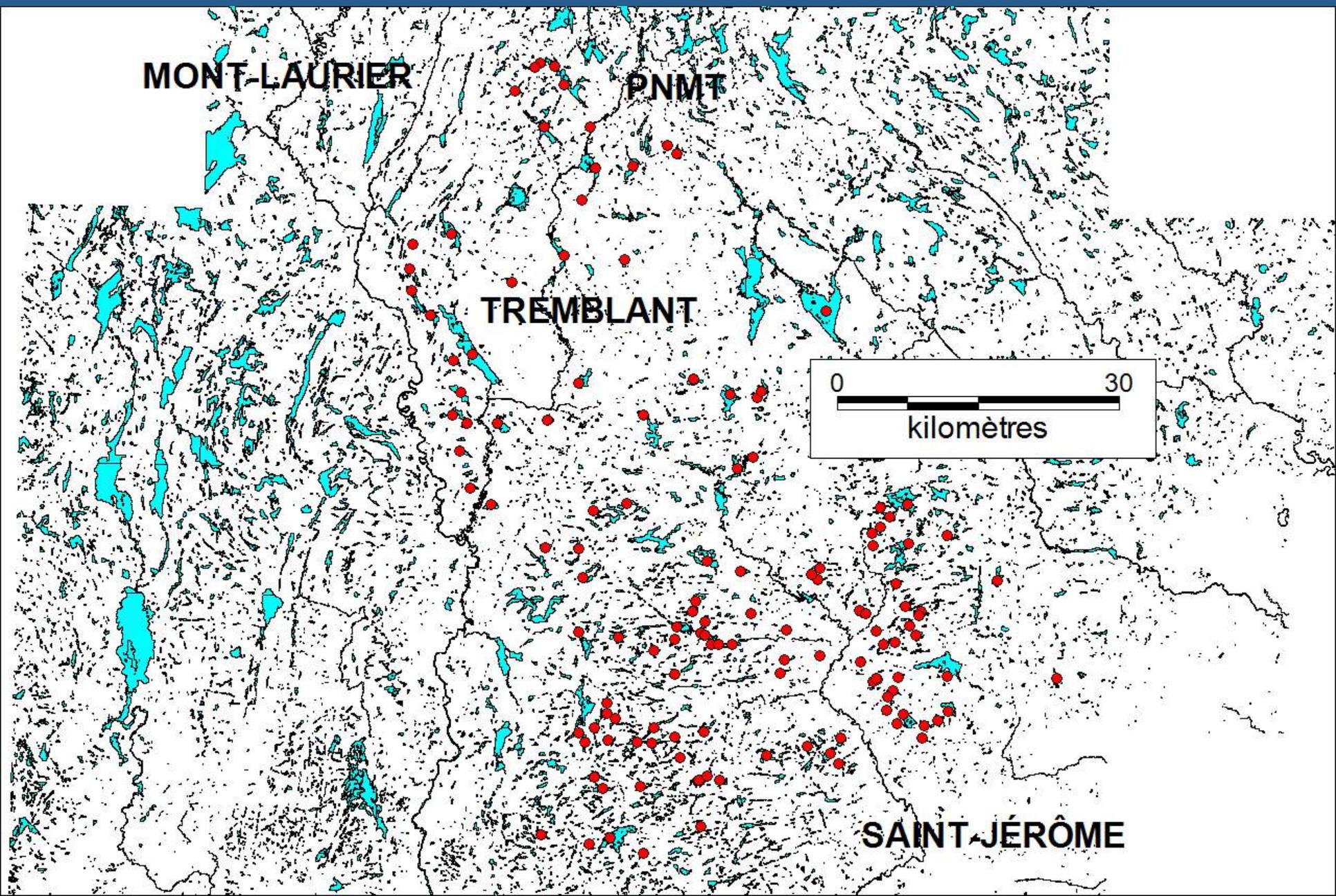
des habitations ?

d'autres activités humaines dans le bassin versant ?

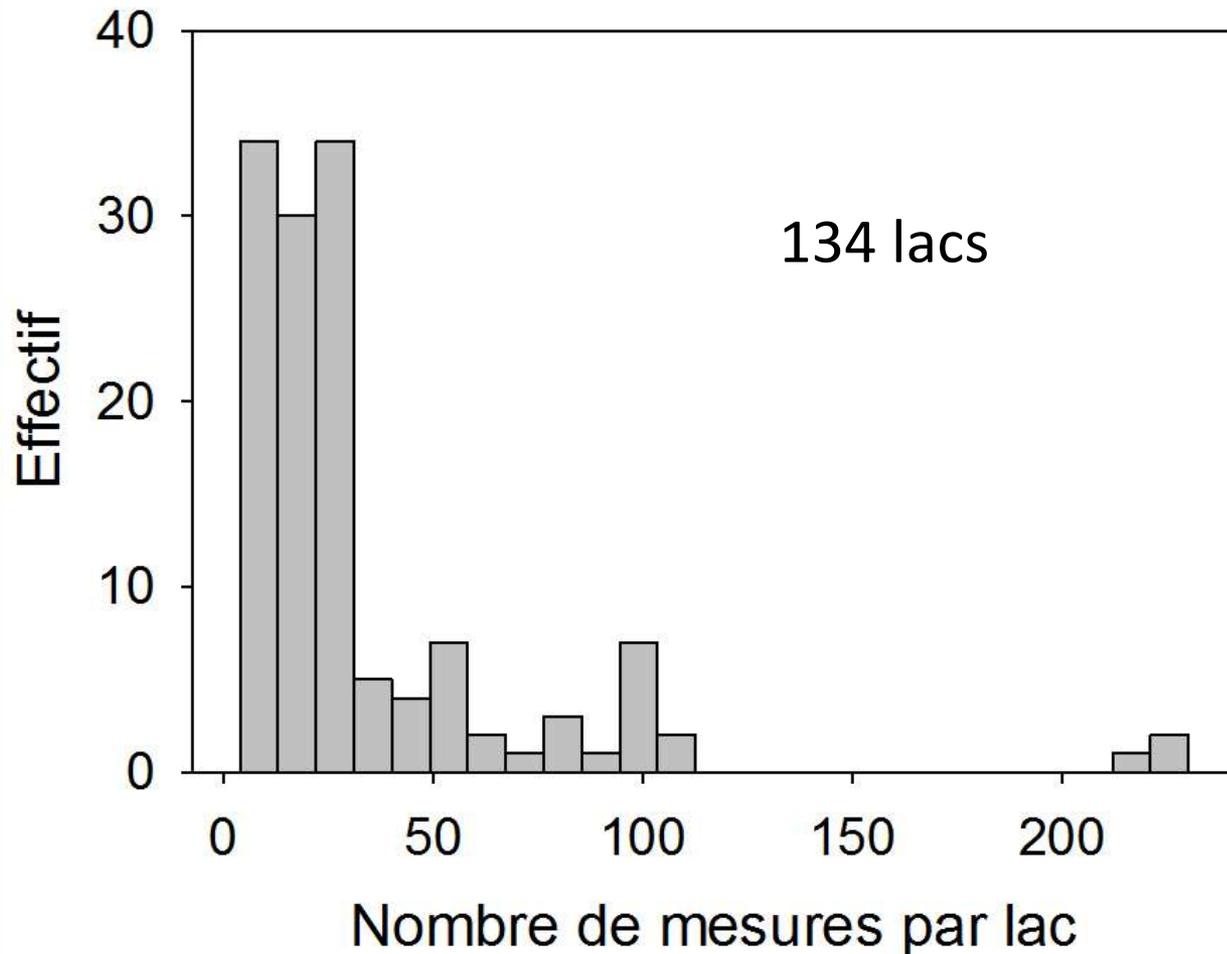
d'autres propriétés naturelles des lacs et de leurs bassins versants ?

Quelles sont les relations empiriques entre le P des lacs et les propriétés de leurs bassins versants et de leurs cuvettes ?

Base de données acquise entre 1998 et 2009 (134 lacs, 4 700 km²)



4 743 observations, épilimion seulement
1^{er} juin au 1^{er} octobre
entre 1998 et 2009



Lac Croche, SBL (0 habitations dans le bassin versant)



Lac René, Saint-Hippolyte 38 habitations dans le bassin versant



Lac Rond, Sainte-Adèle (284 habitations dans le bassin versant)

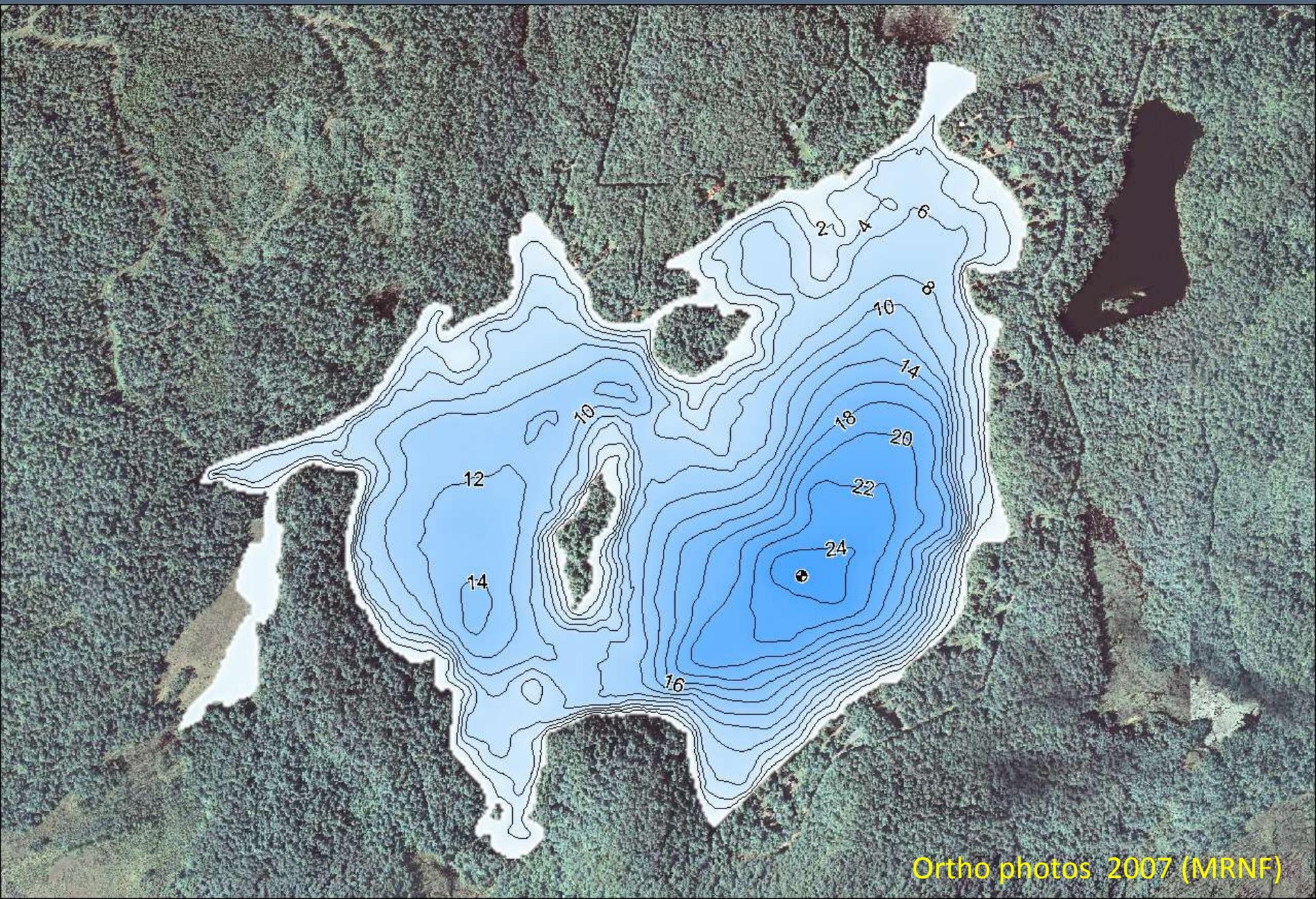


Orthophotos 2007 (MRNF)

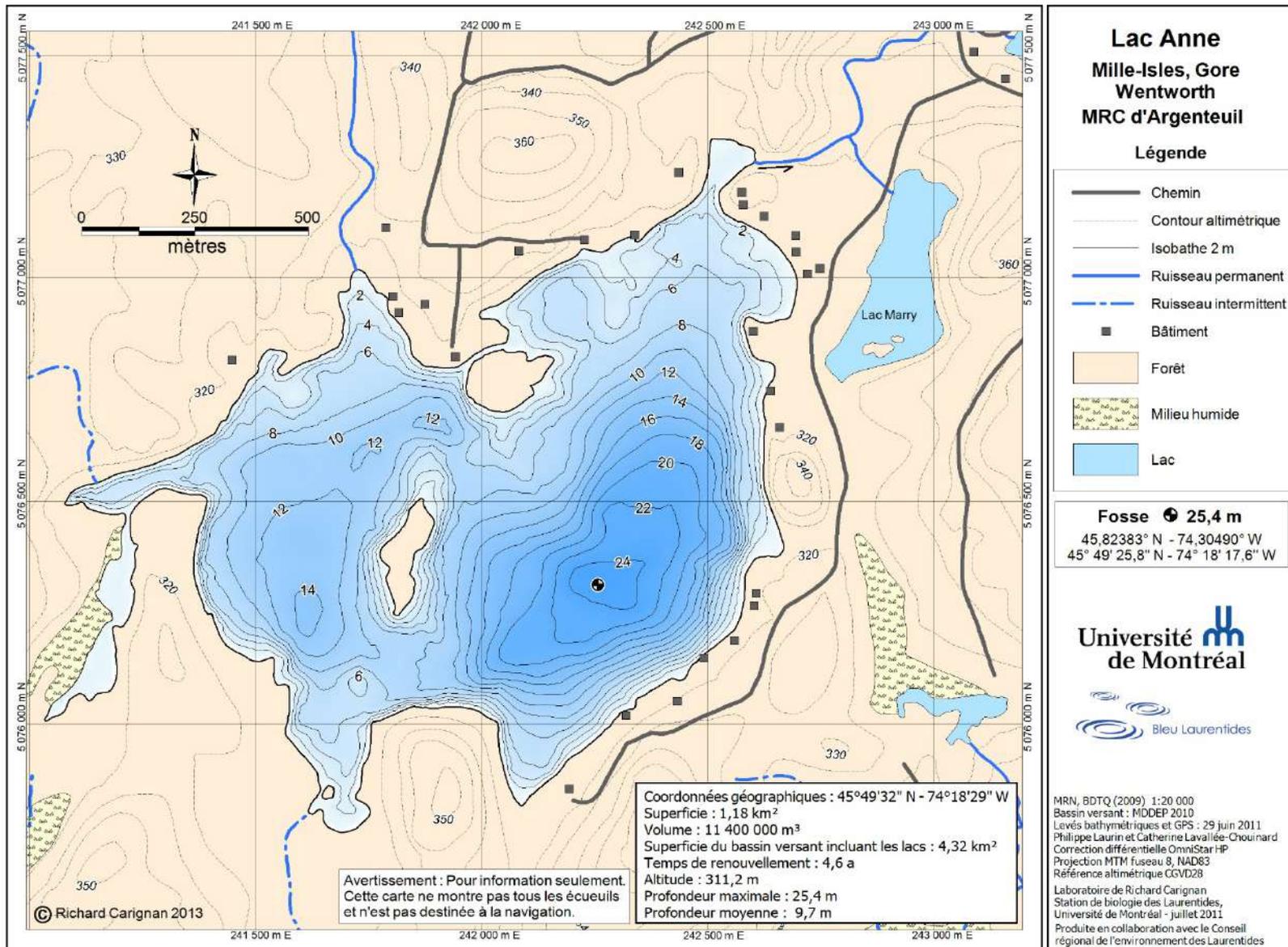
Lac Anne, Wentworth (25 habitations dans le bassin versant)



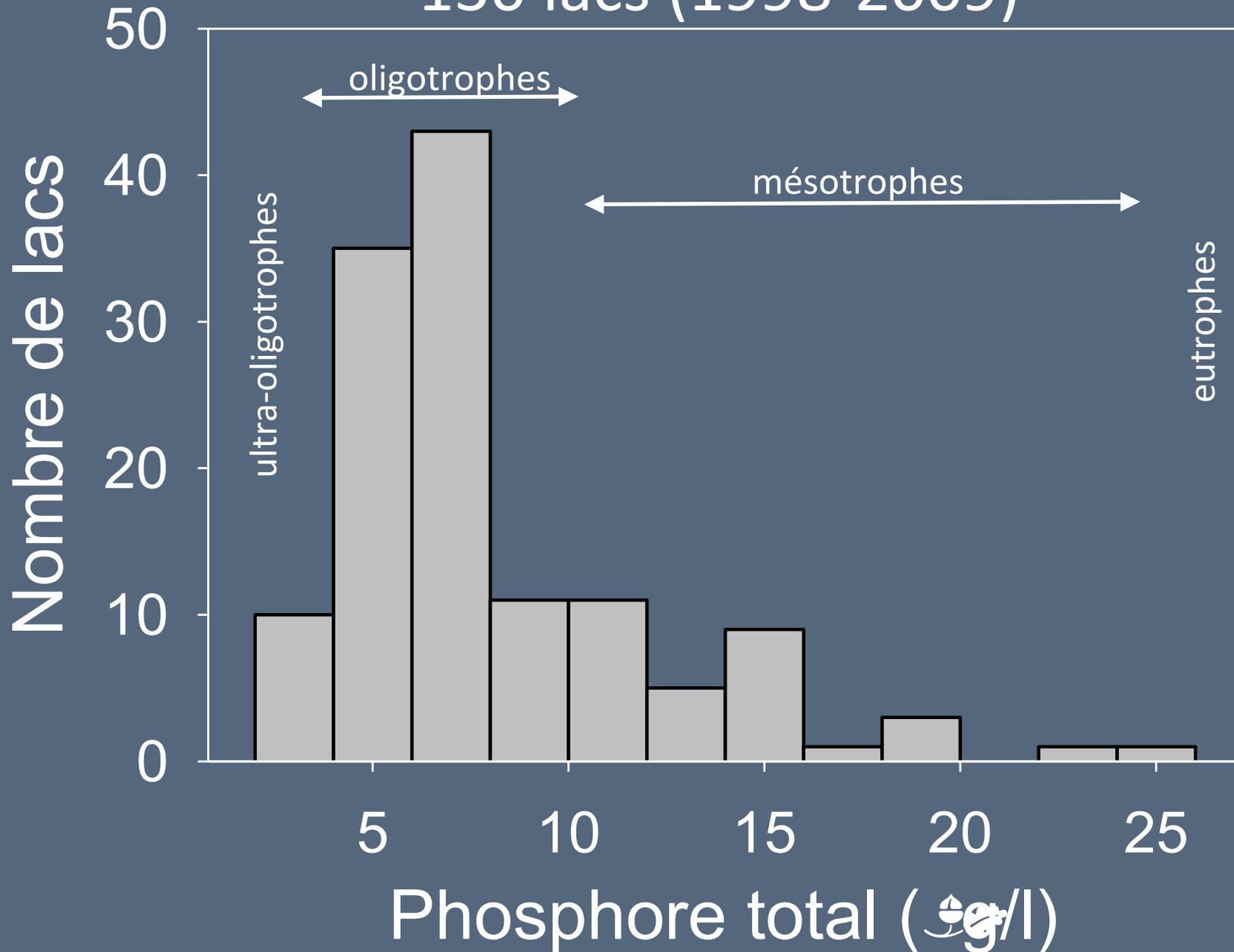
Lac Anne, Wentworth (25 habitations dans le bassin versant)

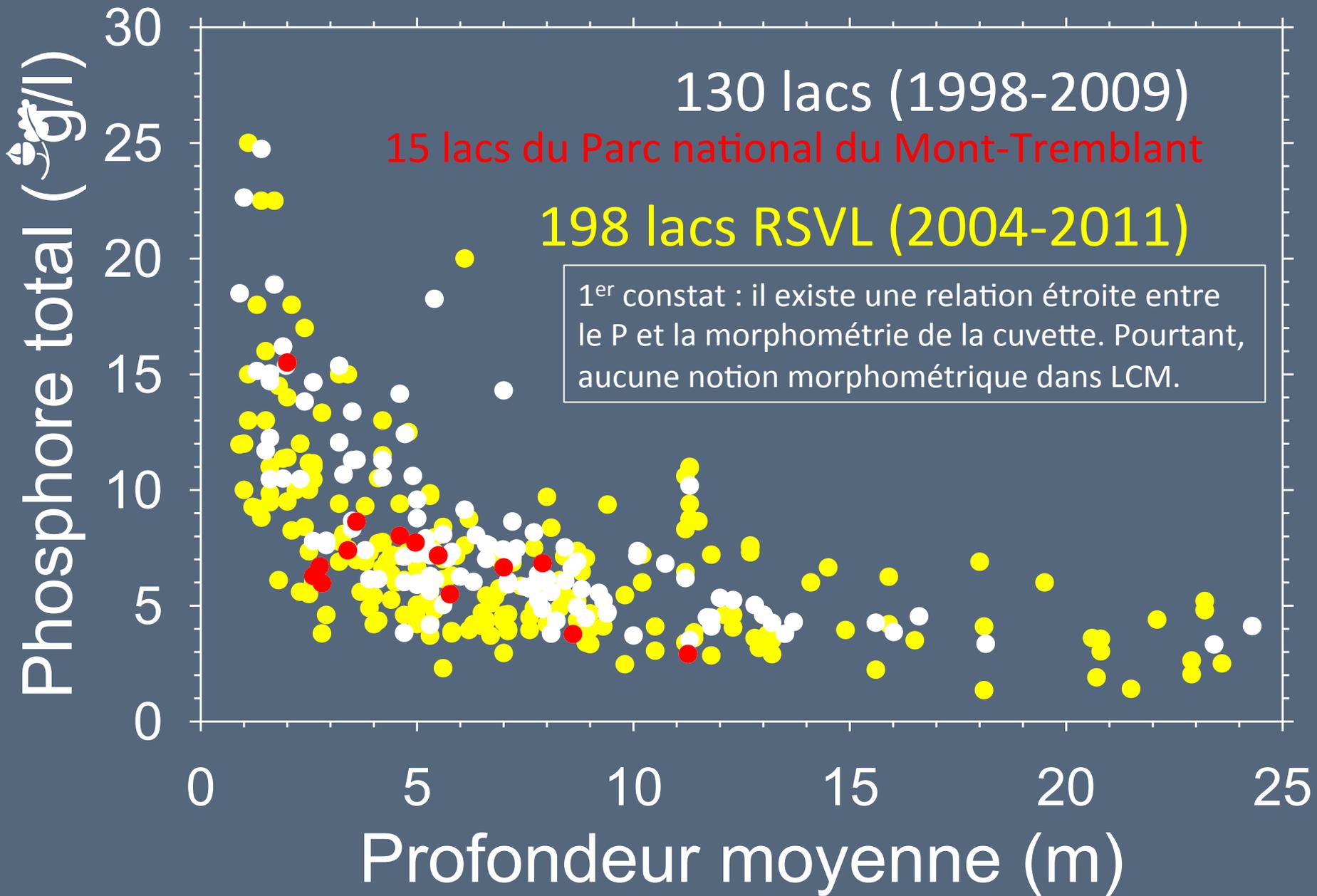


Ces données morphométriques et hypsométriques précises sont disponibles pour 280 lacs des Laurentides sur le site www.crelaurentides.org

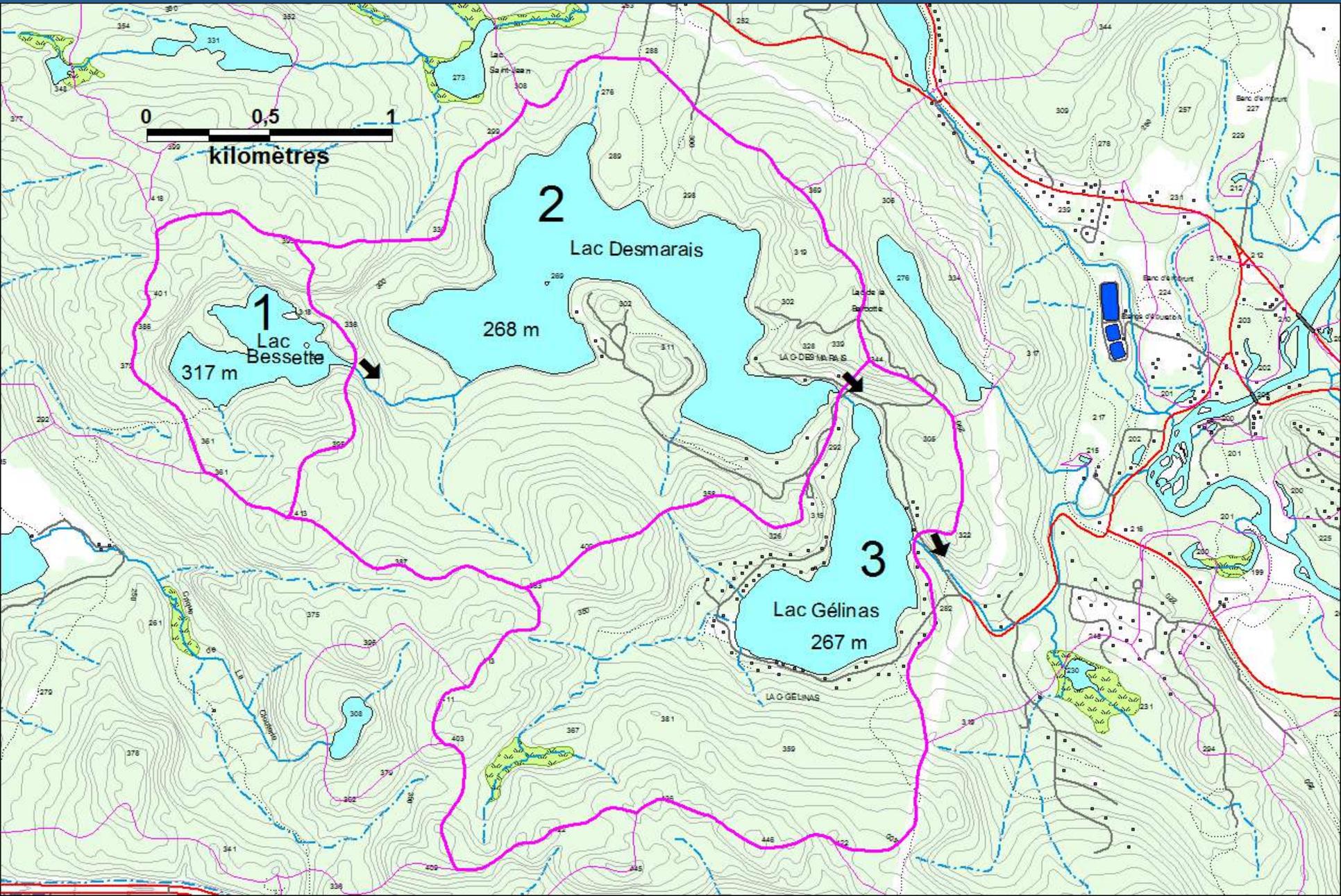


130 lacs (1998-2009)





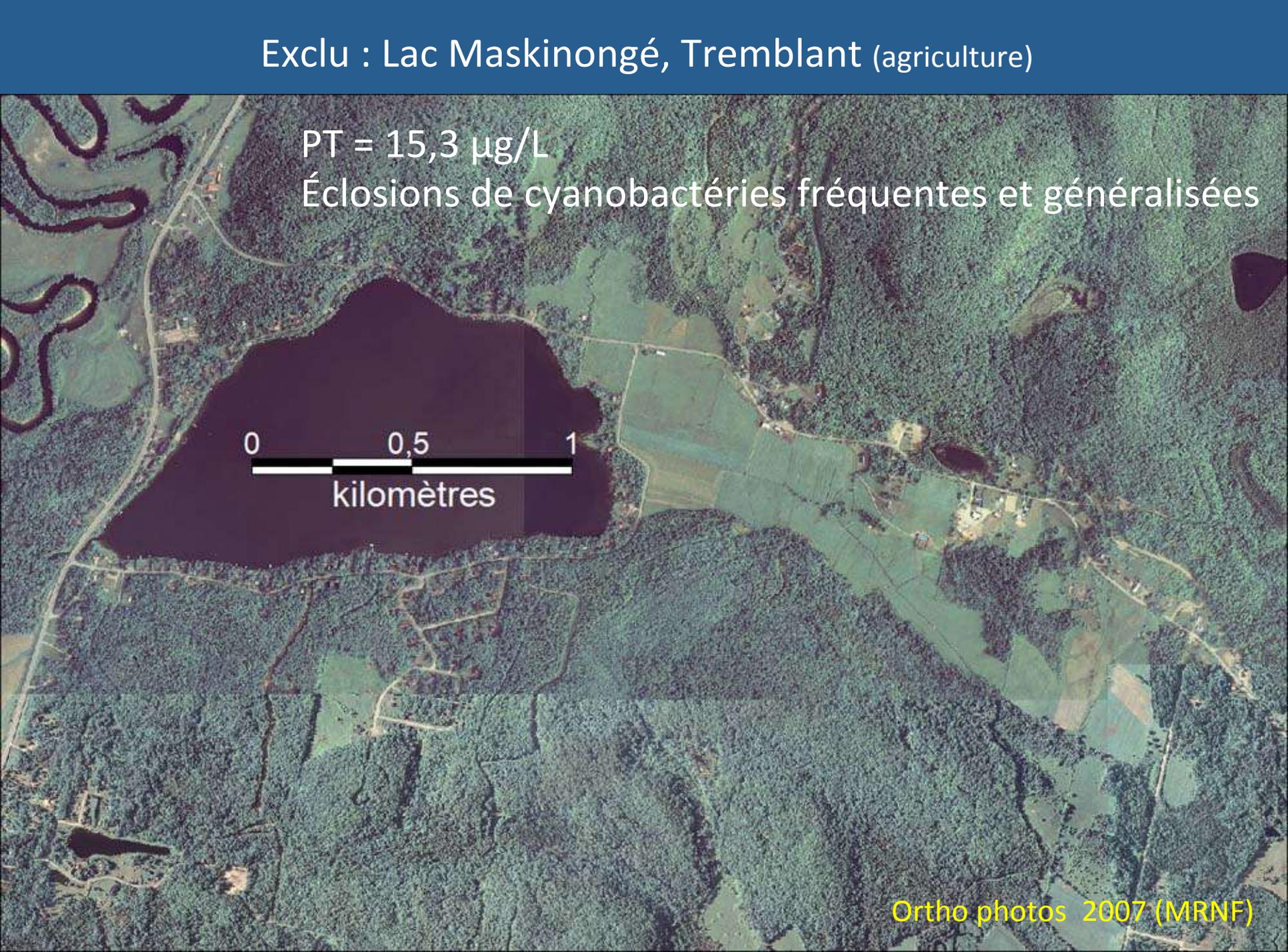
Lac Gélinas : ordre hydrologique = 3



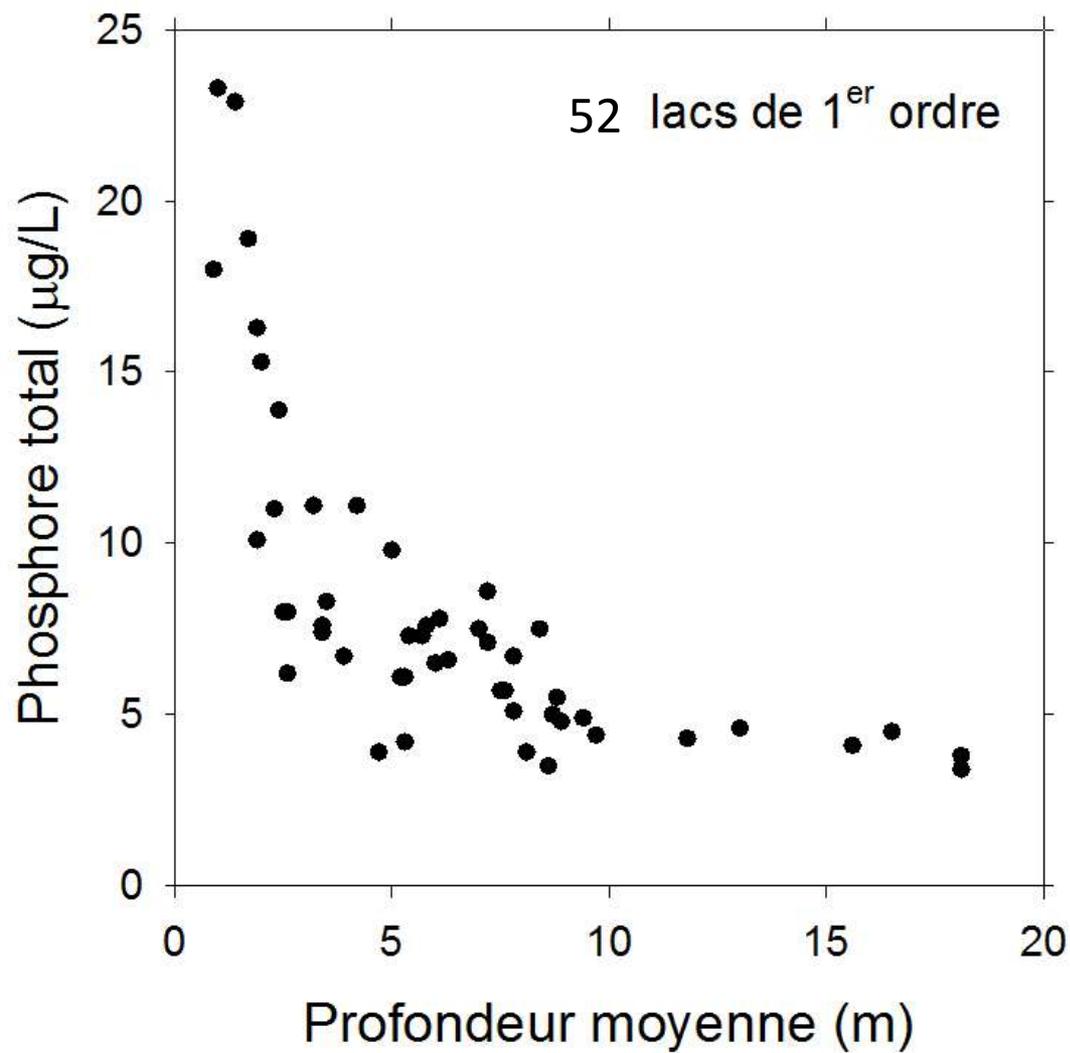
Exclu : Lac Maskinongé, Tremblant (agriculture)

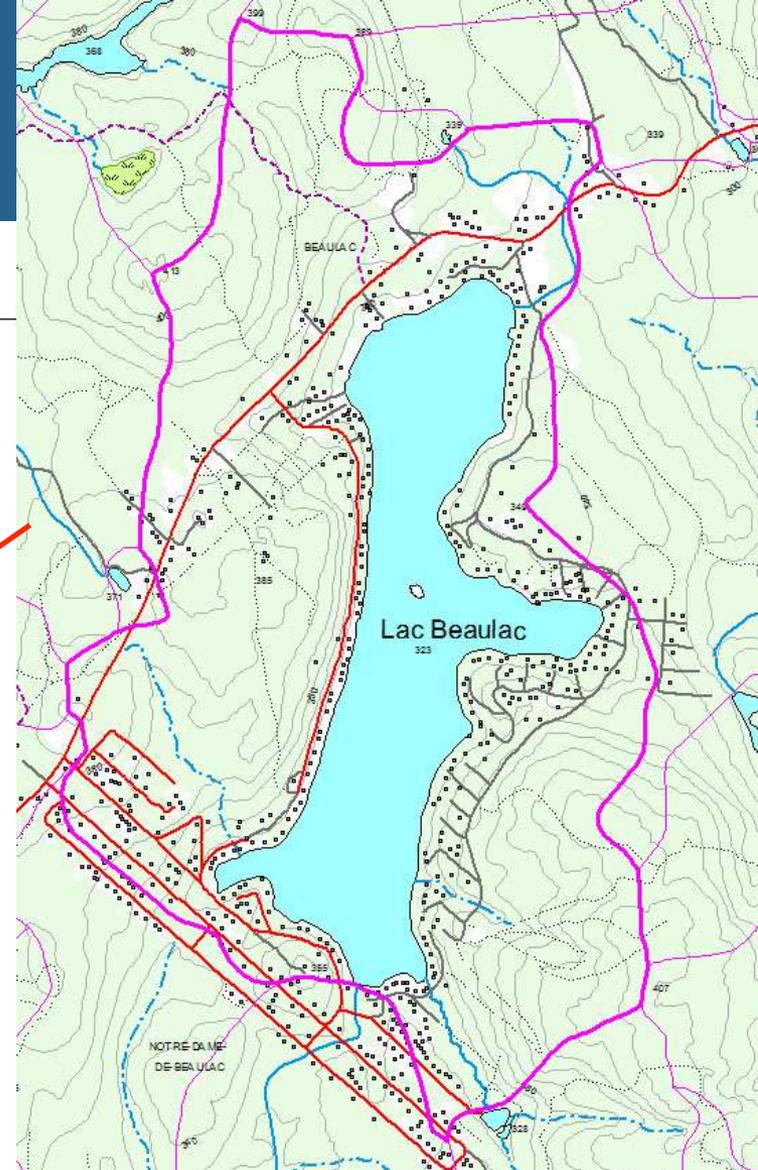
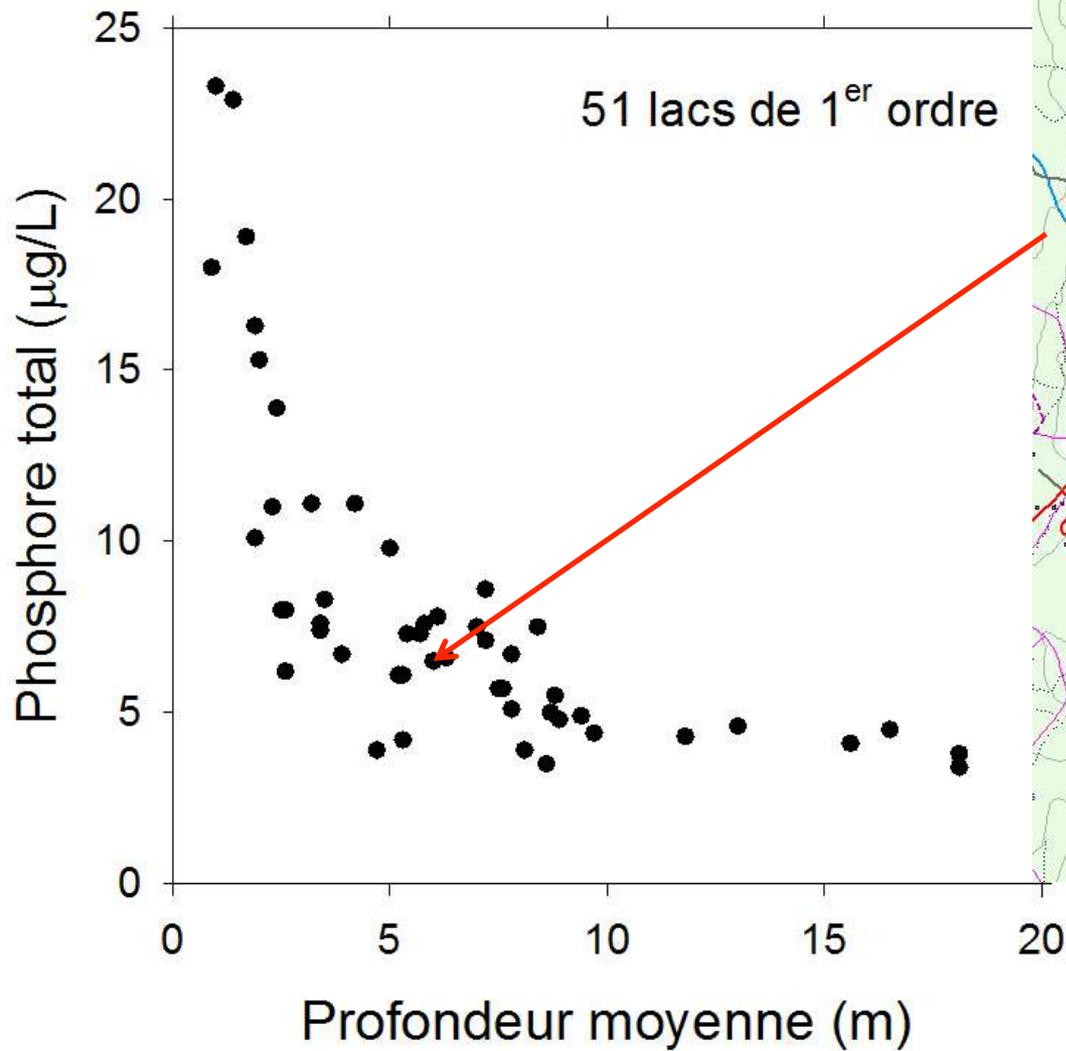
PT = 15,3 $\mu\text{g/L}$

Éclosions de cyanobactéries fréquentes et généralisées

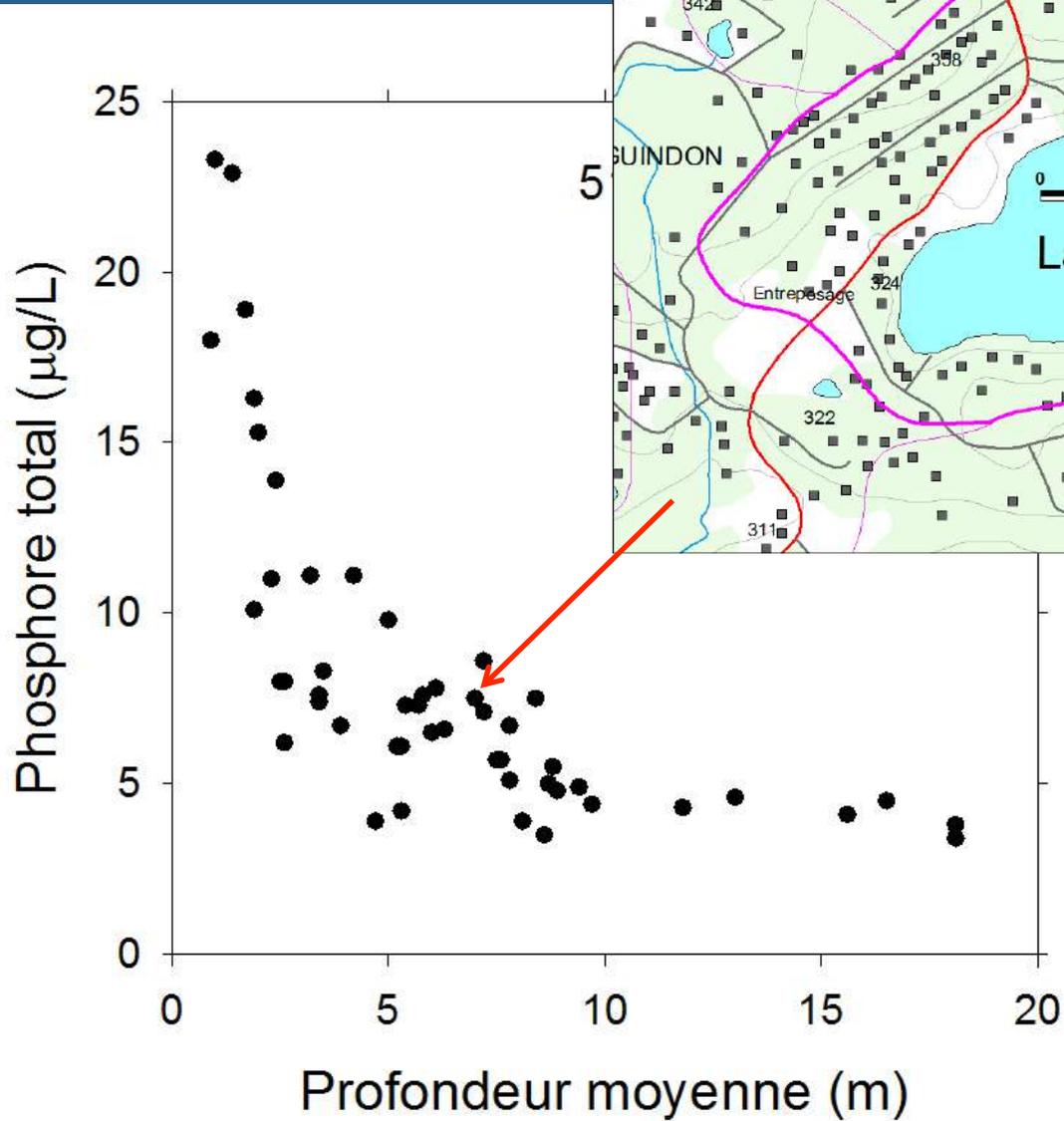


0 0,5 1
kilomètres

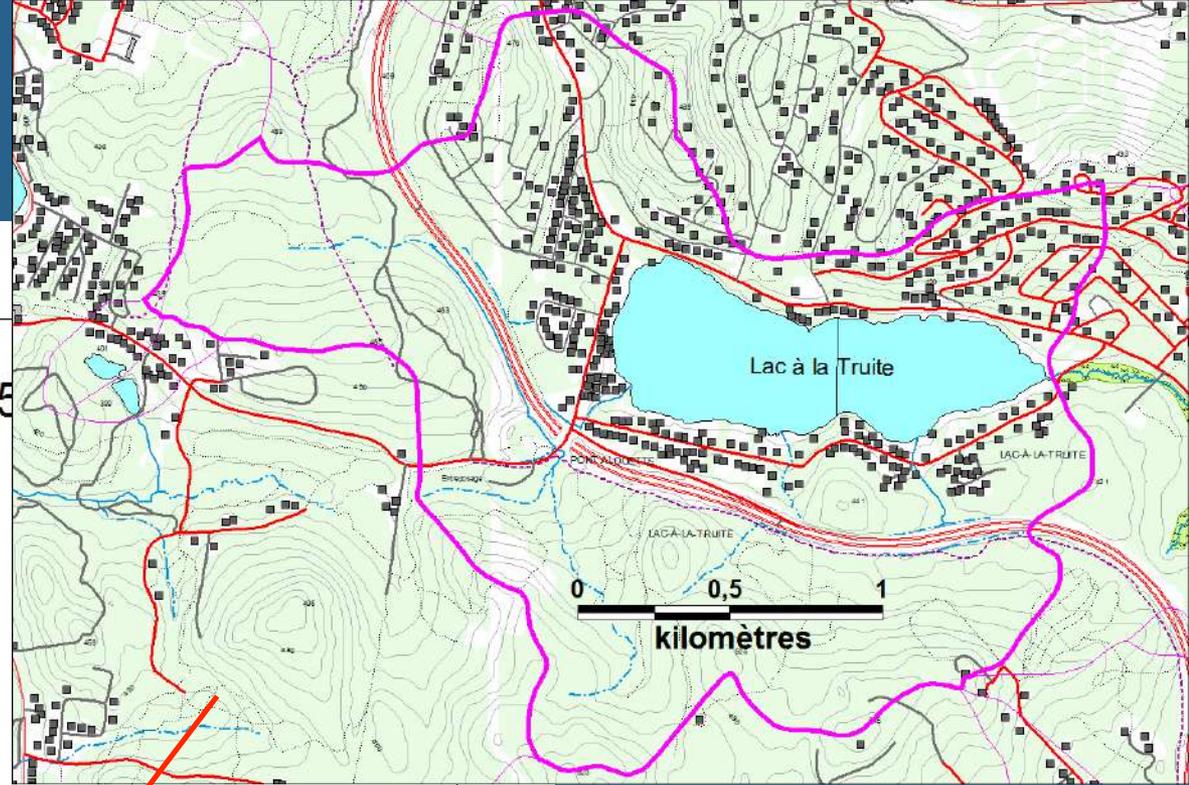
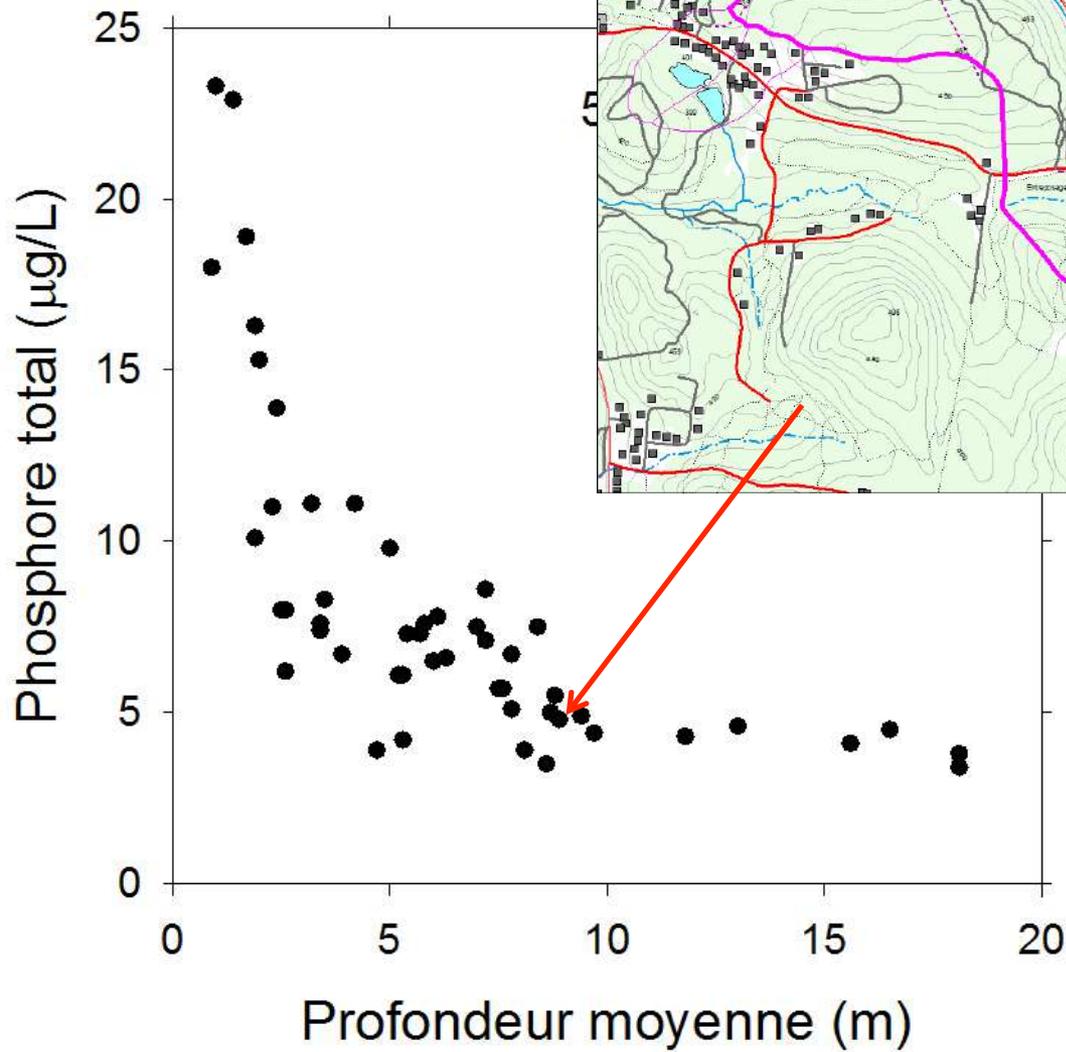




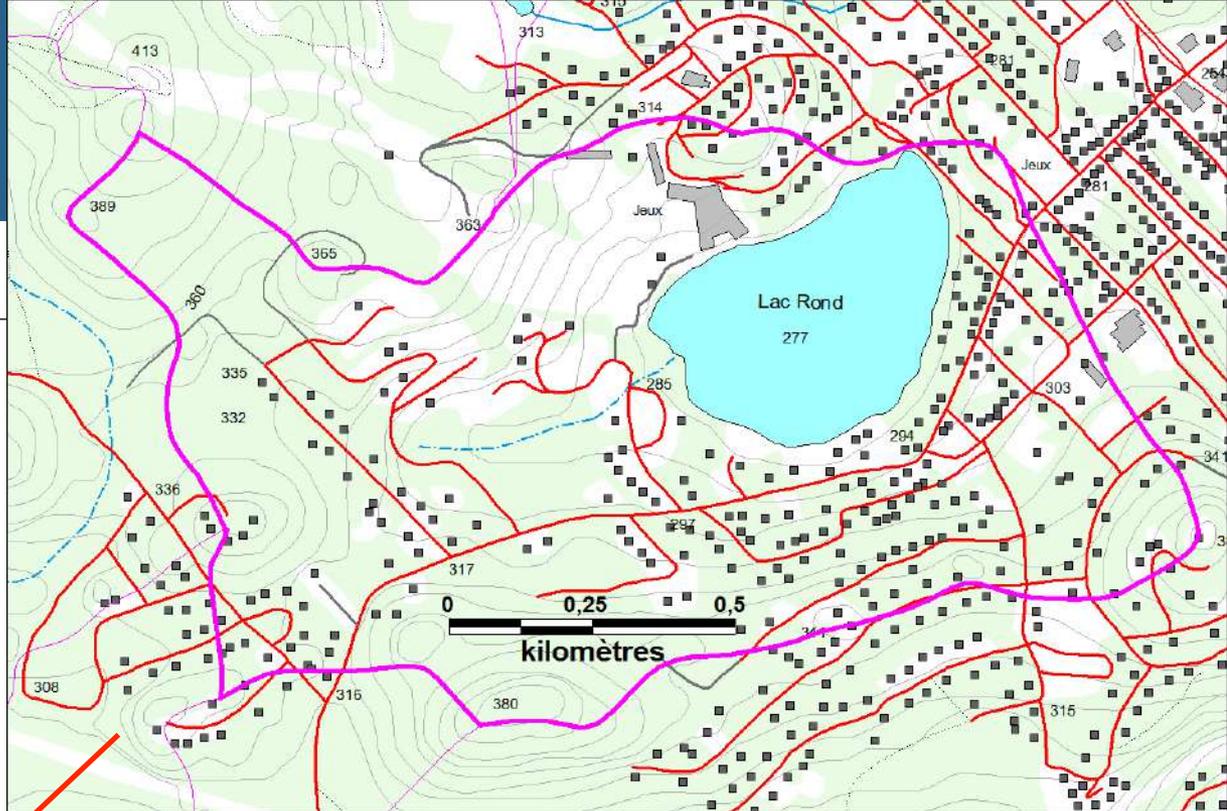
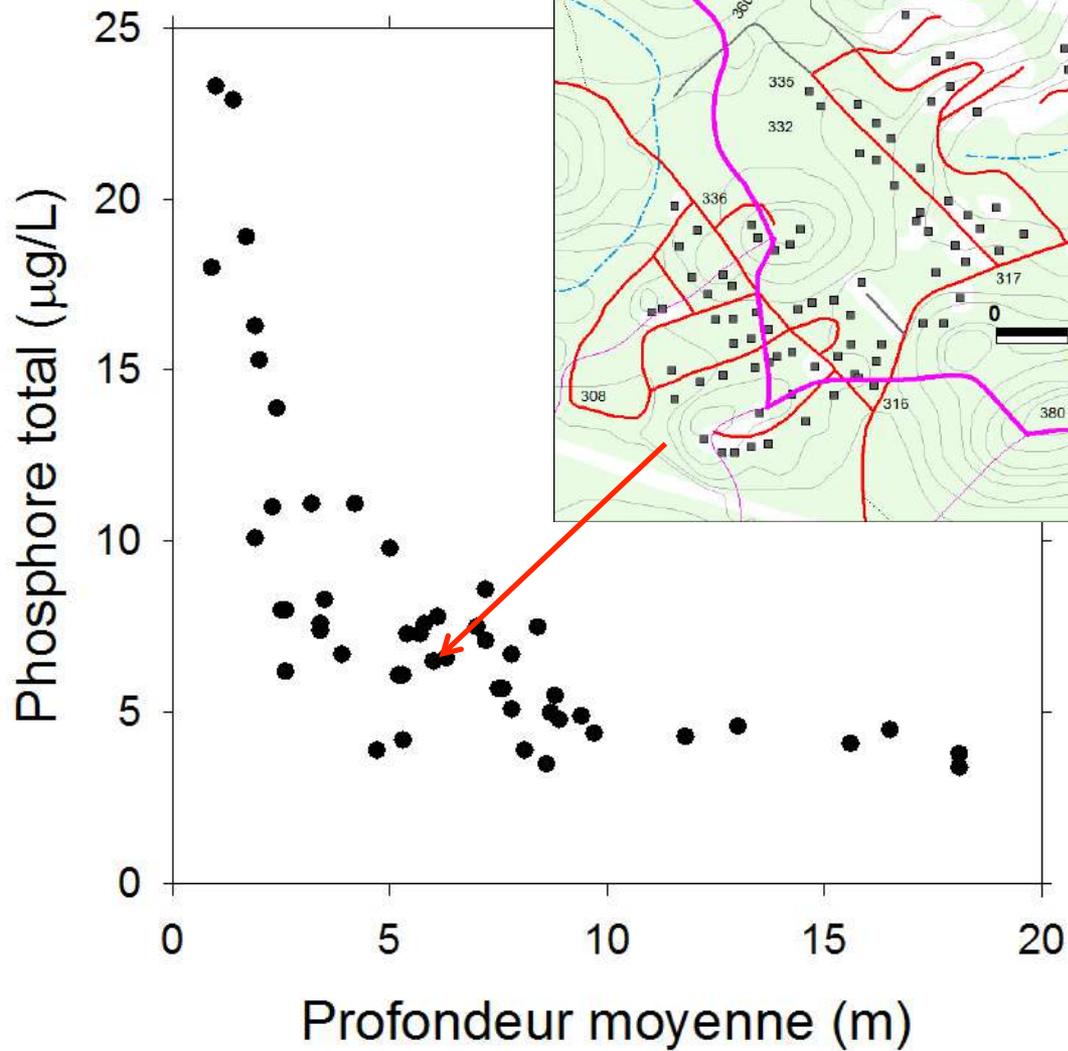
504 habitations !



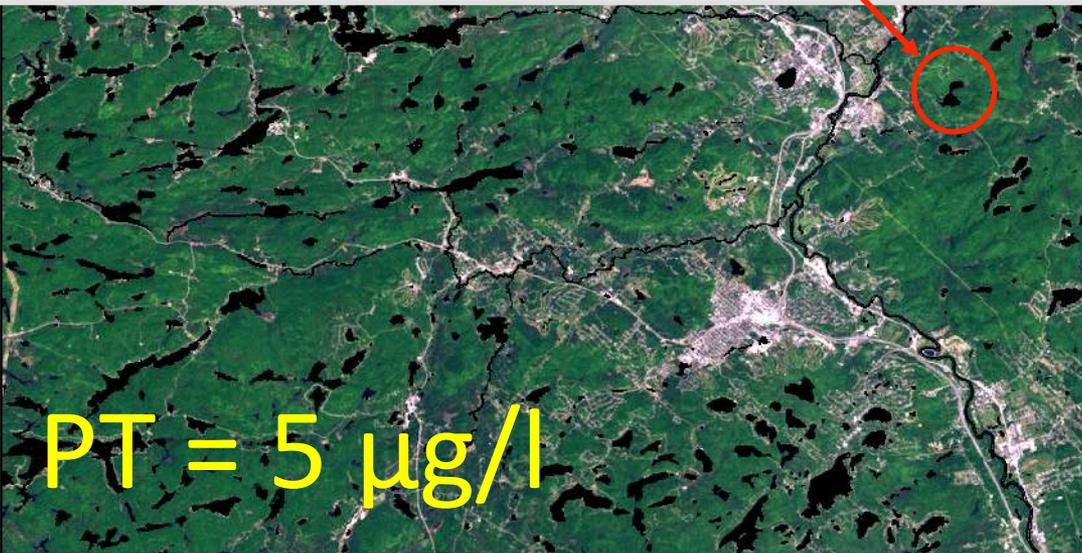
187 habitations !



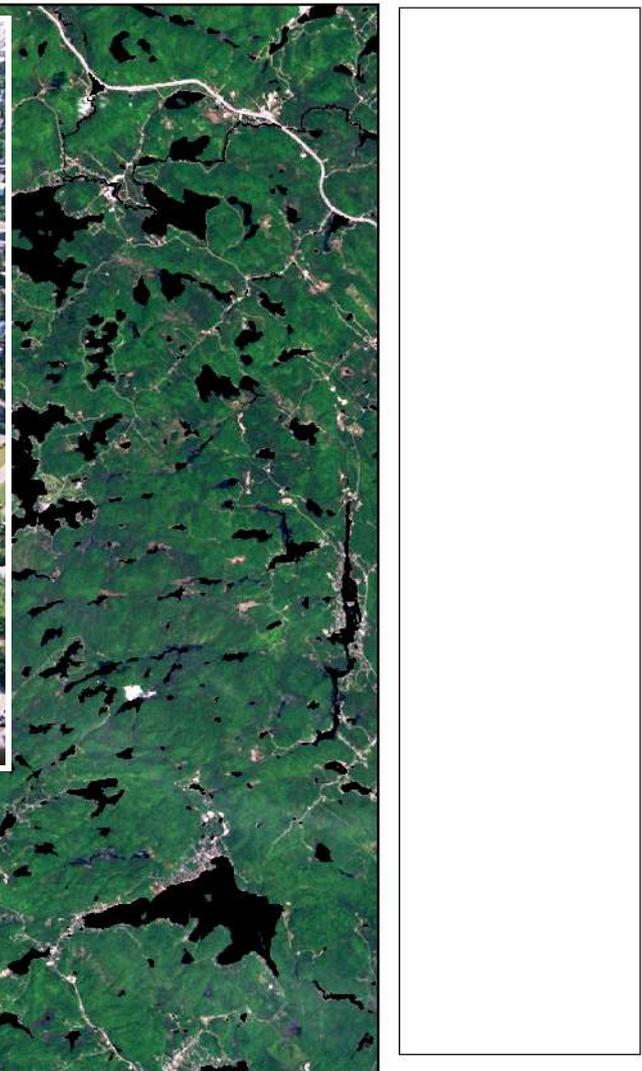
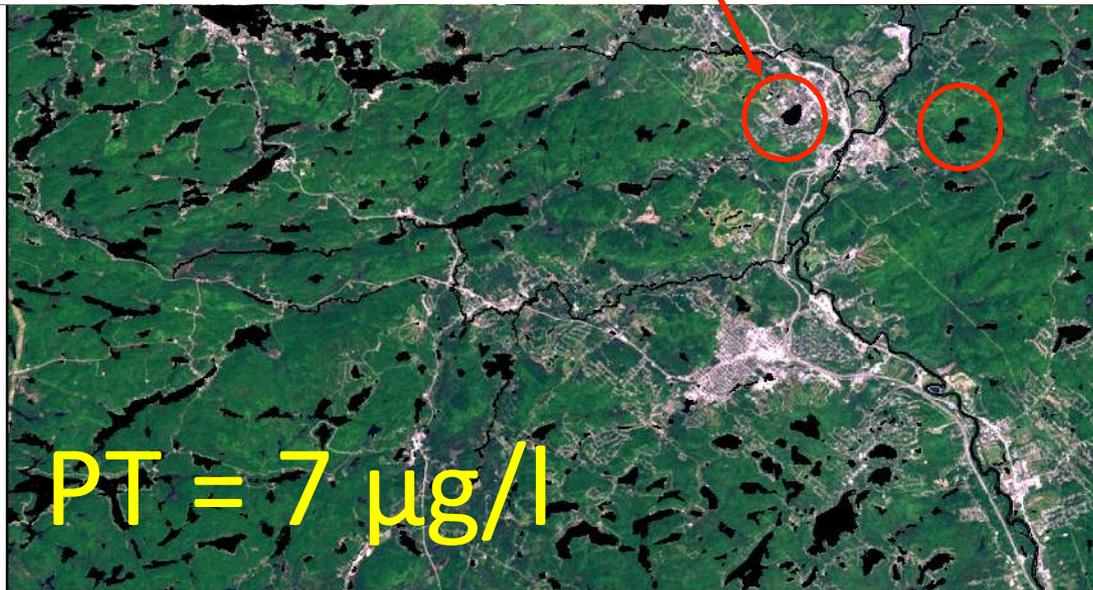
361 habitations !



284 habitations !



LES LAURENTIDES
LANDSAT-7, JUIN 2001
0 5 10
kilomètres



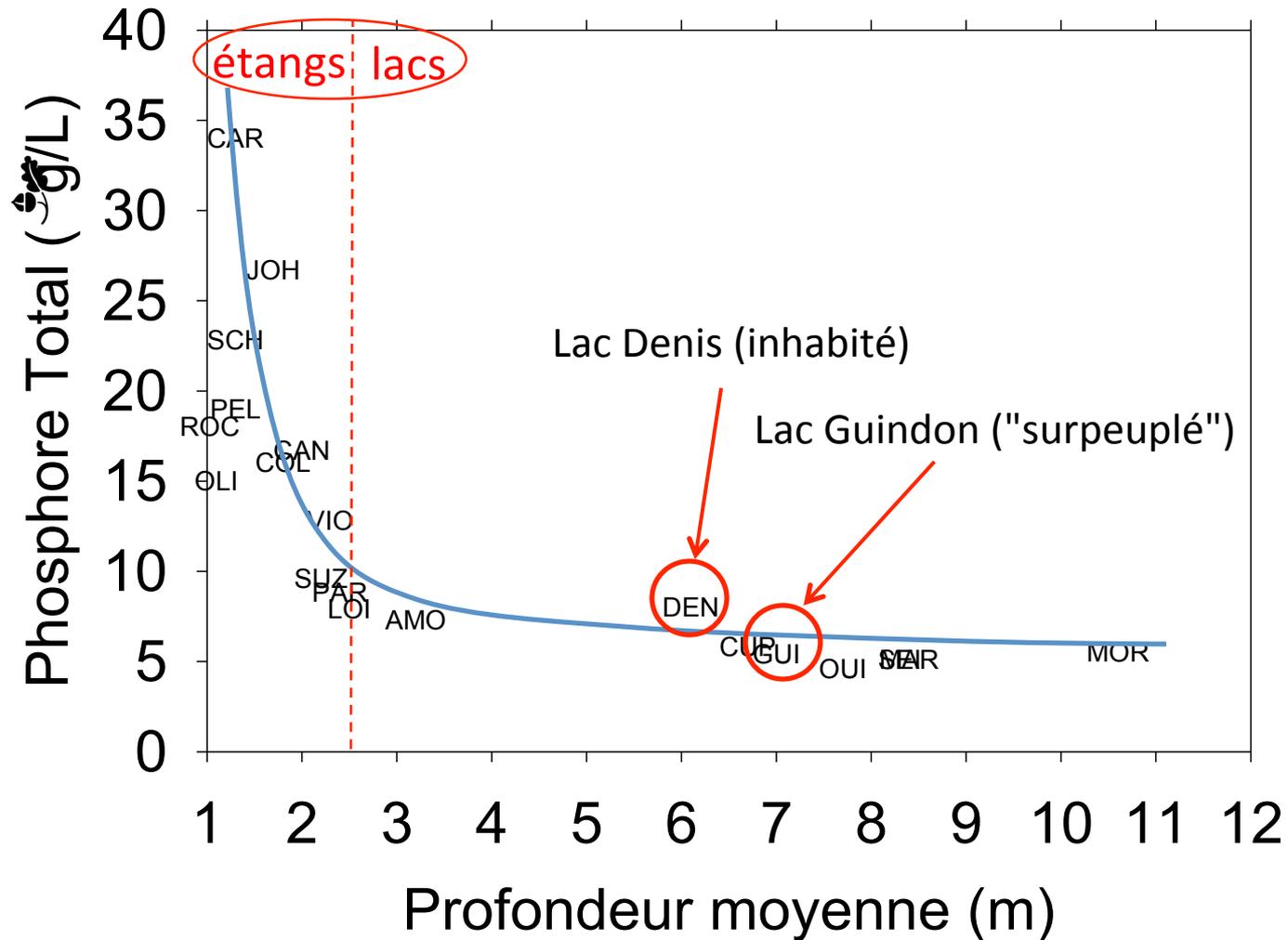
LES LAURENTIDES

LANDSAT-7, JUIN 2001

0 5 10

kilomètres

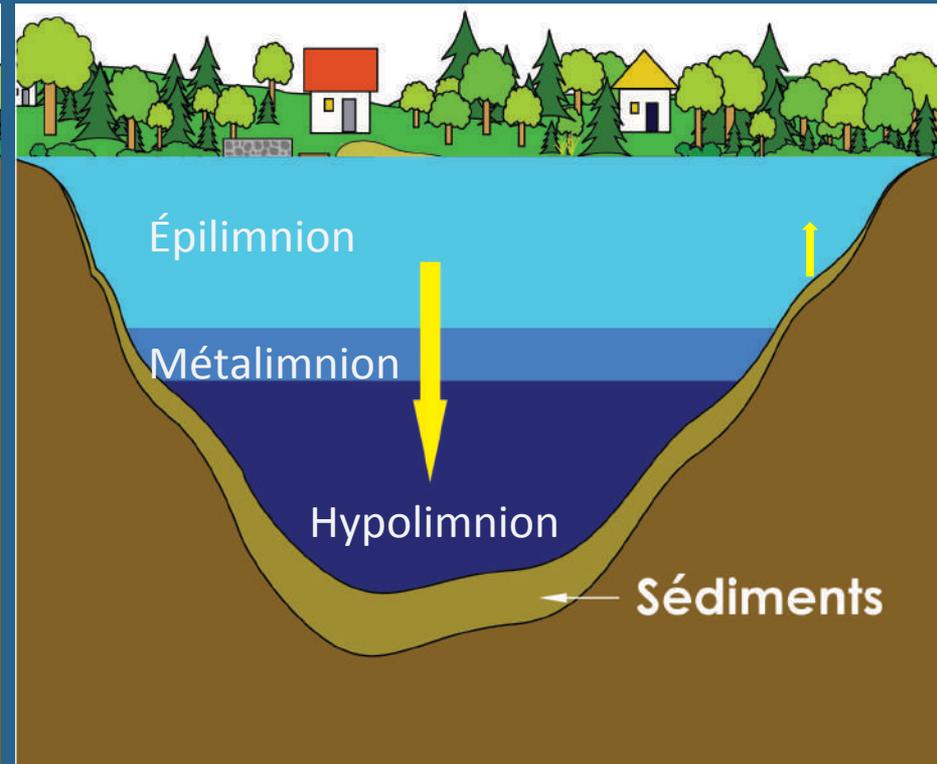
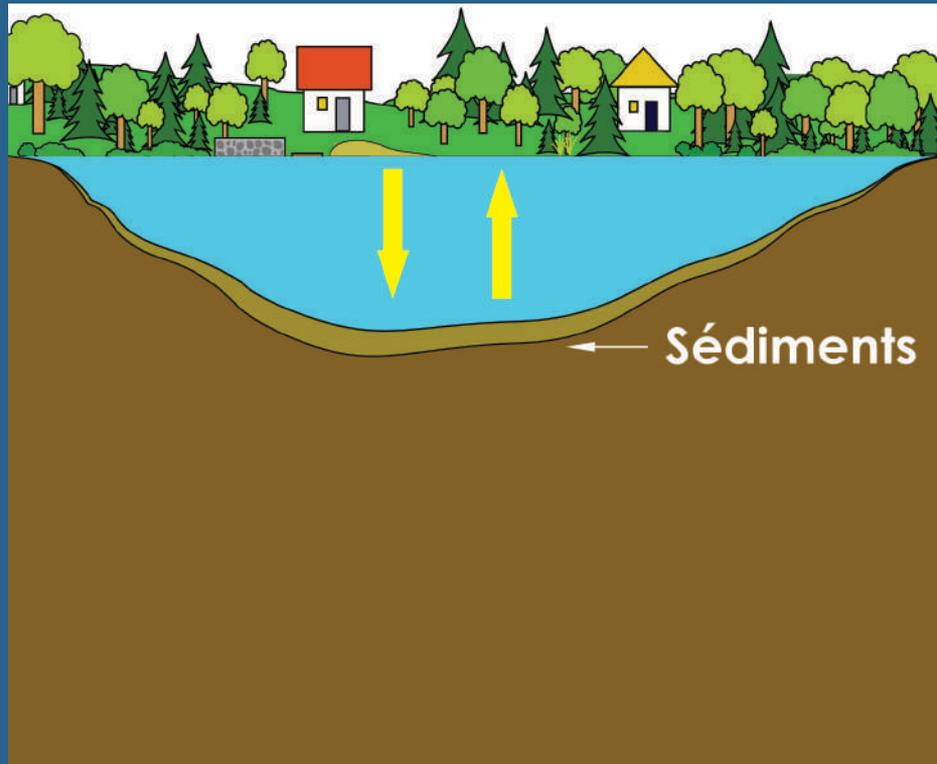
Phosphore total à SAdL



Recyclage du phosphore dans les étangs et lacs

Étang (polymictique)

Lac (dimictique)



Exemple : Lac Canard
Sainte-Anne-des-Lacs

Exemple : Lac Guindon
Sainte-Anne-des-Lacs

Walden Pond, Massachusetts



Source : Wikipedia

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Location | Concord, Massachusetts |
| Coordinates |  42.4392°N 71.3397°W |
| Type | kettlehole |
| Basin countries | United States |
| Surface area | 61 acres (25 ha) |
| Max. depth | 102 ft (31 m) ^[1] or 107 ft (33 m) ^[2] |
| Shore length¹ | 1.7 miles (2.7 km) |
| Walden Pond | |
| U.S. National Register of Historic Places | |
| U.S. National Historic Landmark | |
| Nearest city | Concord, Massachusetts |
| Area | 250 acres (100 ha) |
| Built | 1845 |
| Governing body | State |
| NRHP Reference # | 66000790 ^[3] |
| Significant dates | |
| Added to NRHP | October 15, 1966 |
| Designated NHL | December 29, 1962 |

¹ Shore length is not a well-defined measure.



Étang de Thau

L'étang de Thau est le plus grand étang de la région Languedoc-Roussillon. Il a une superficie d'environ 7 500 hectares et une profondeur moyenne de cinq mètres. [Wikipédia](#)

Profondeur moyenne : 4,00 m

Superficie : 70,12 km²

Longueur : 21 km

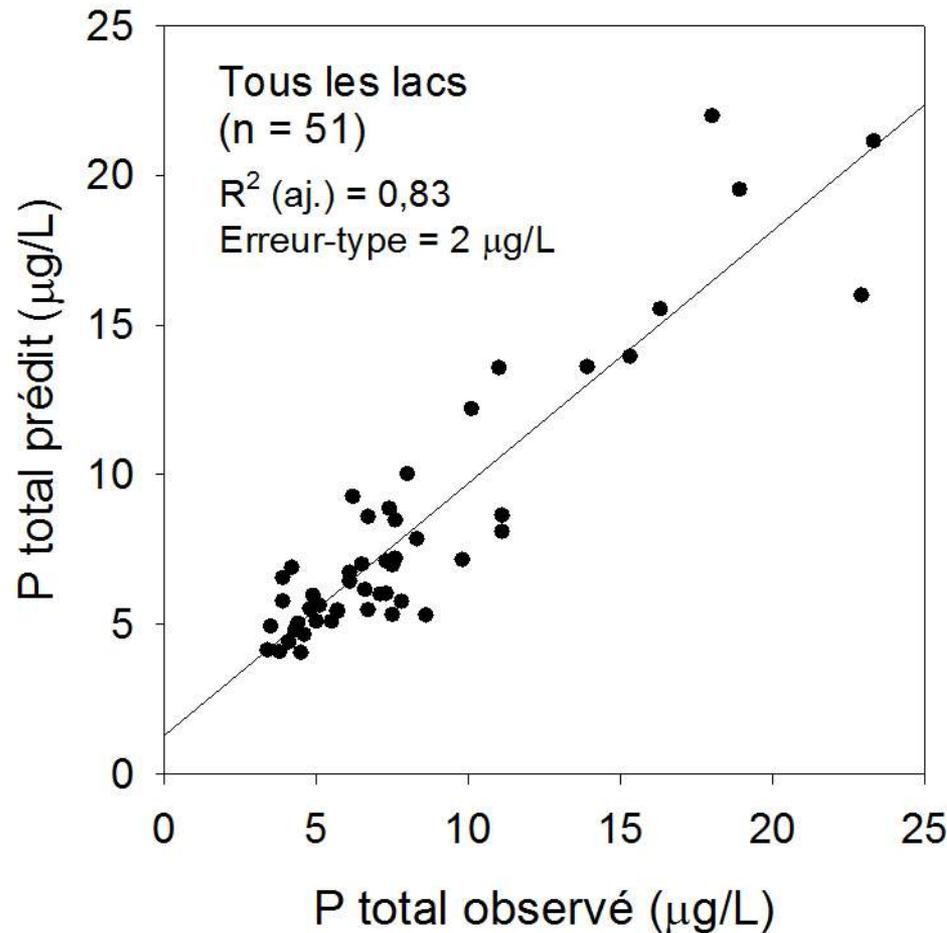
Altitude : 0 cm

Largeur : 8 km

Villes : Sète, Mèze, Marseillan

Source : Wikipedia

En régression multiple, seulement trois variables significatives :



| Variable | % variance | p |
|------------------|------------|---------|
| 1/ZM | 78,5 | <0,0000 |
| Mhum/VOL | 3,0 | 0,0006 |
| Batim_50m/VOLépi | 3,0 | 0,016 |

Agriculture (non durable)



Atmosphère



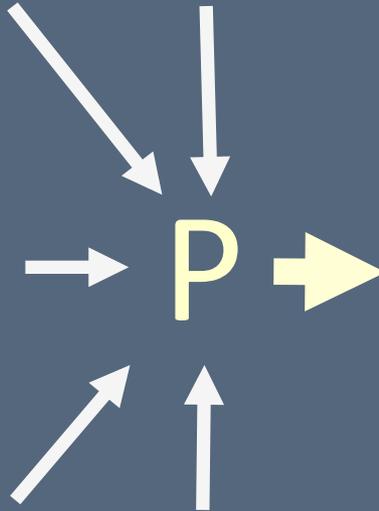
Habitations



Milieux humides



Forêts



Dans les lacs des Laurentides, en général, l'intensité de la villégiature n'a que peu d'influence sur la concentration en **phosphore** dans la colonne d'eau et sur l'abondance des **cyanobactéries**

Les modèles de capacité de support basés sur :

- un coefficient d'exportation associé aux habitations et
 - une concentration en phosphore à ne pas dépasser
- ... sont inadéquats et sans avenir

Dans les Laurentides, les propriétés telles le phosphore et la chlorophylle de la colonne d'eau sont des indicateurs peu sensibles de perturbation des lacs

Ceci ne veut pas dire que les sources diffuses de P et de N provenant de la villégiature n'ont aucune incidence sur la qualité des écosystèmes lacustres



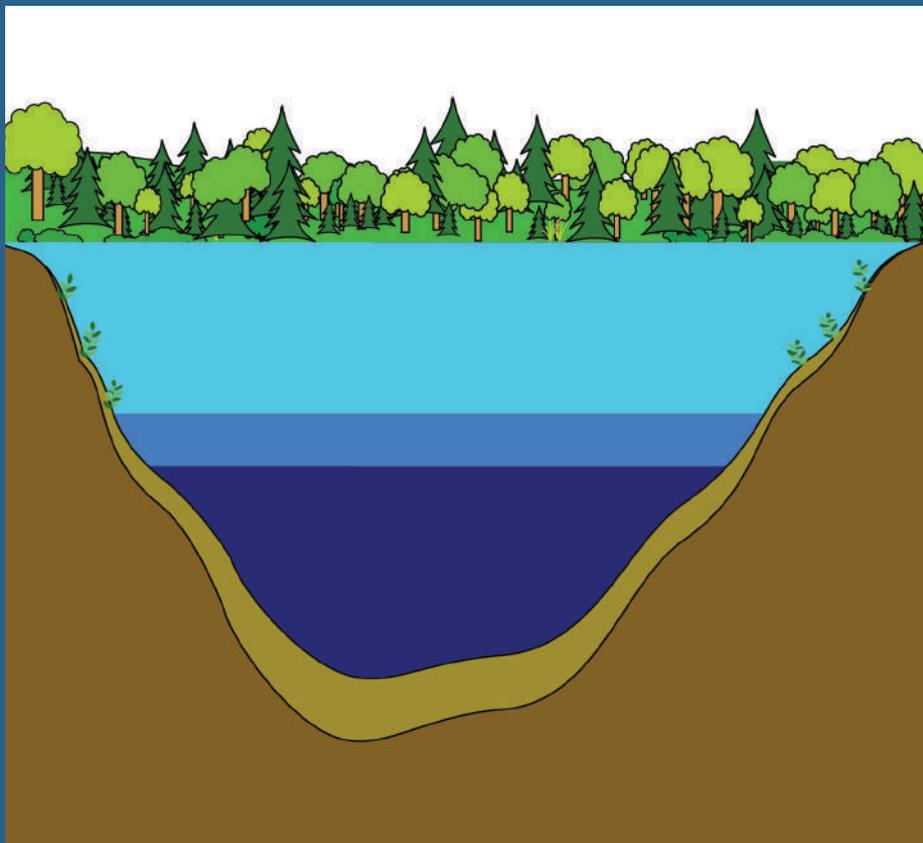
Myriophyllum spicatum
Lac Pémichangan,
sept. 2009

© R. Carignan

Beaucoup d'autres choses changent avant le phosphore, la biomasse planctonique et l'incidence des cyanobactéries

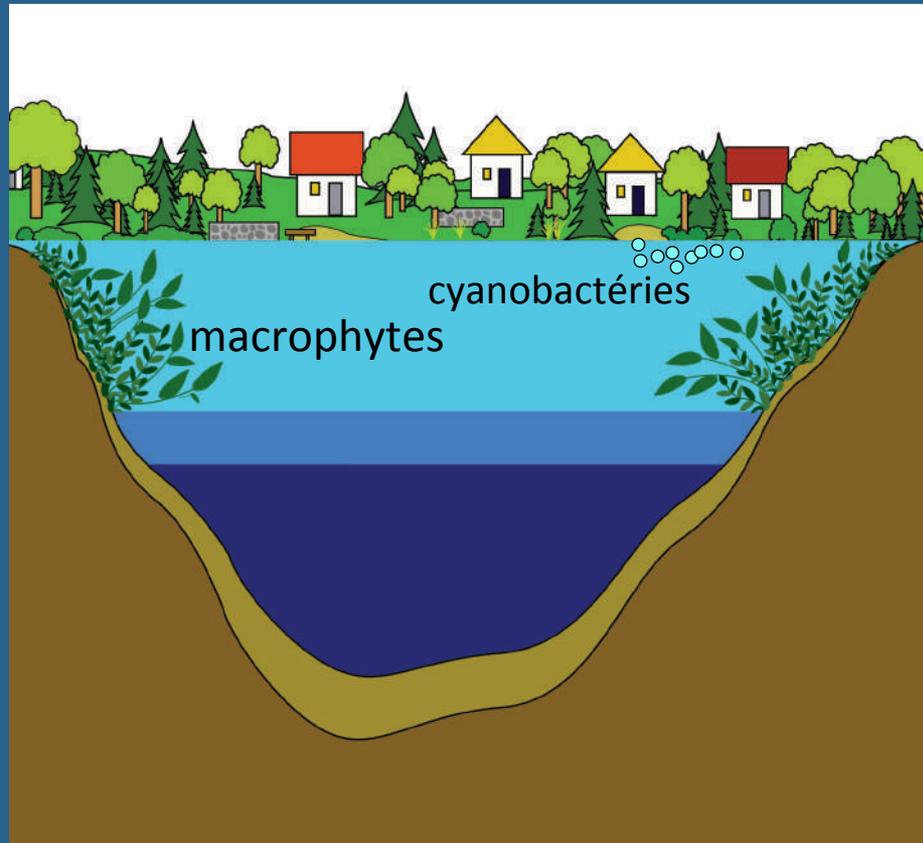
Impacts humains sur les écosystèmes lacustres dans les Laurentides

Non habité



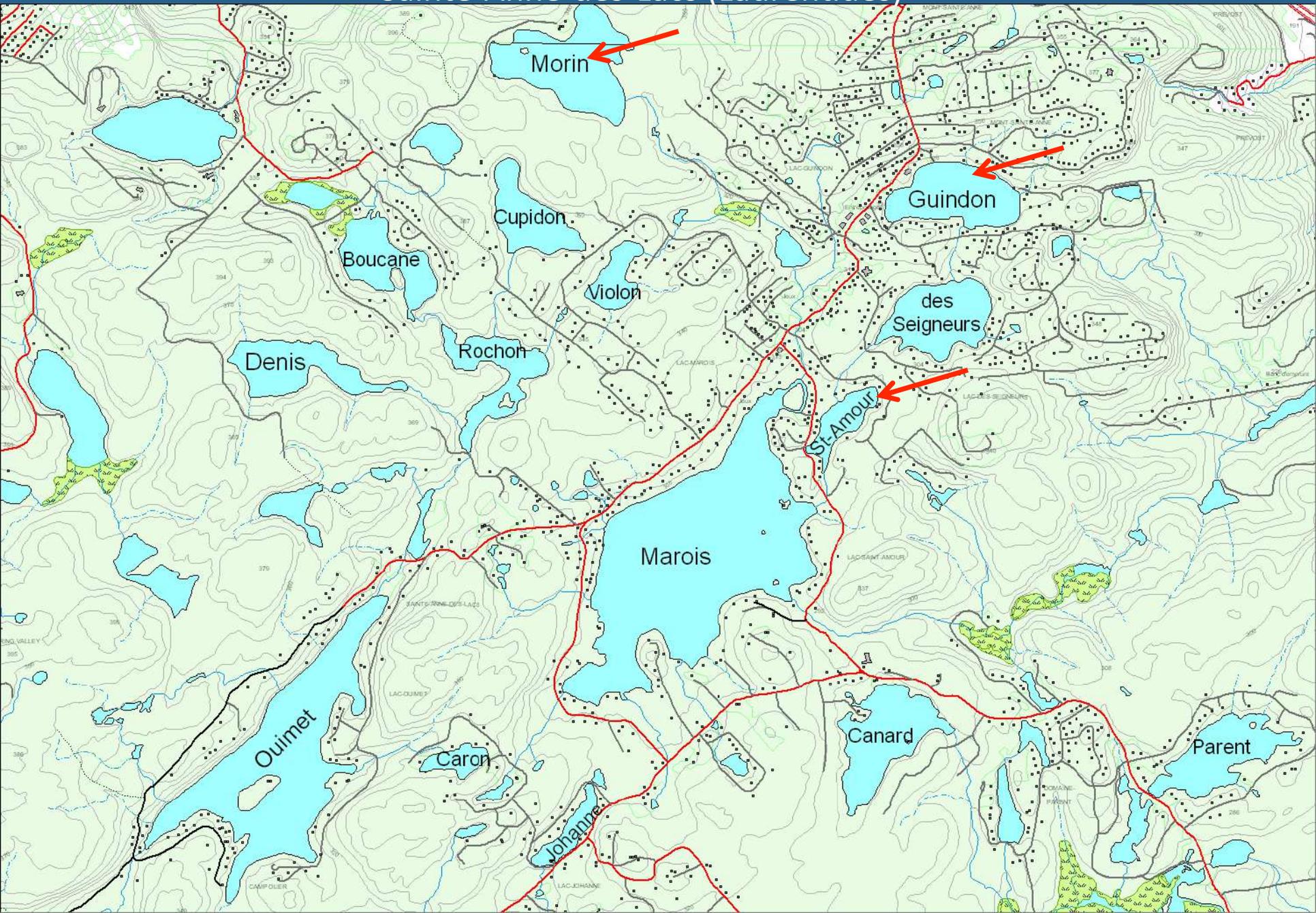
Exemples : Lac Denis
Lac Morin

Habité

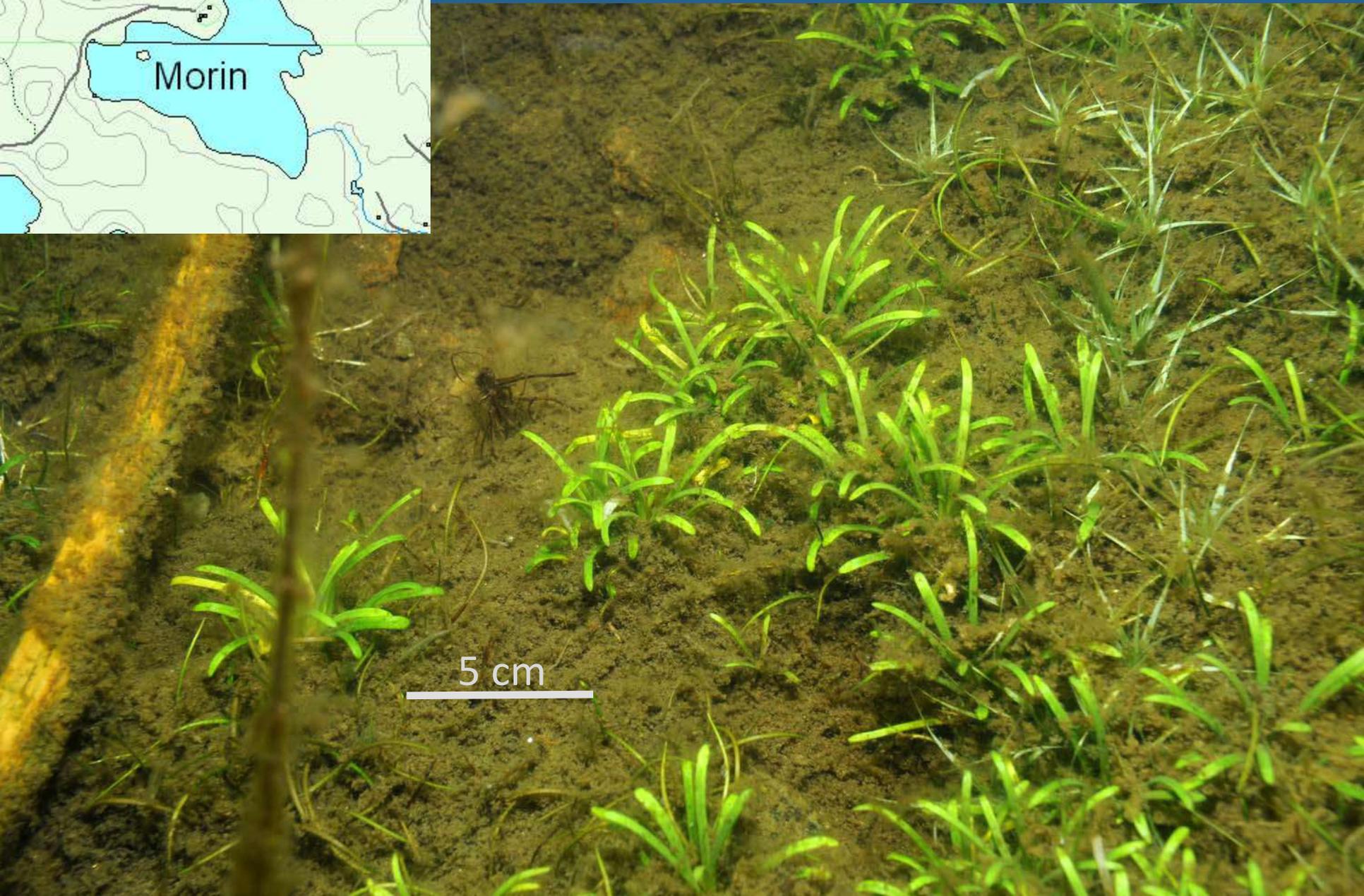


Exemples : Lac Guindon
Lac Saint-Amour

Sainte-Anne-des-Lacs (Laurentides)



Zone littorale, lac Morin, août 2009



Zone littorale, lac Saint-Amour, août 2008



Zone littorale (*Potamogeton Robinsii*), Lac Saint-Amour, août 2009

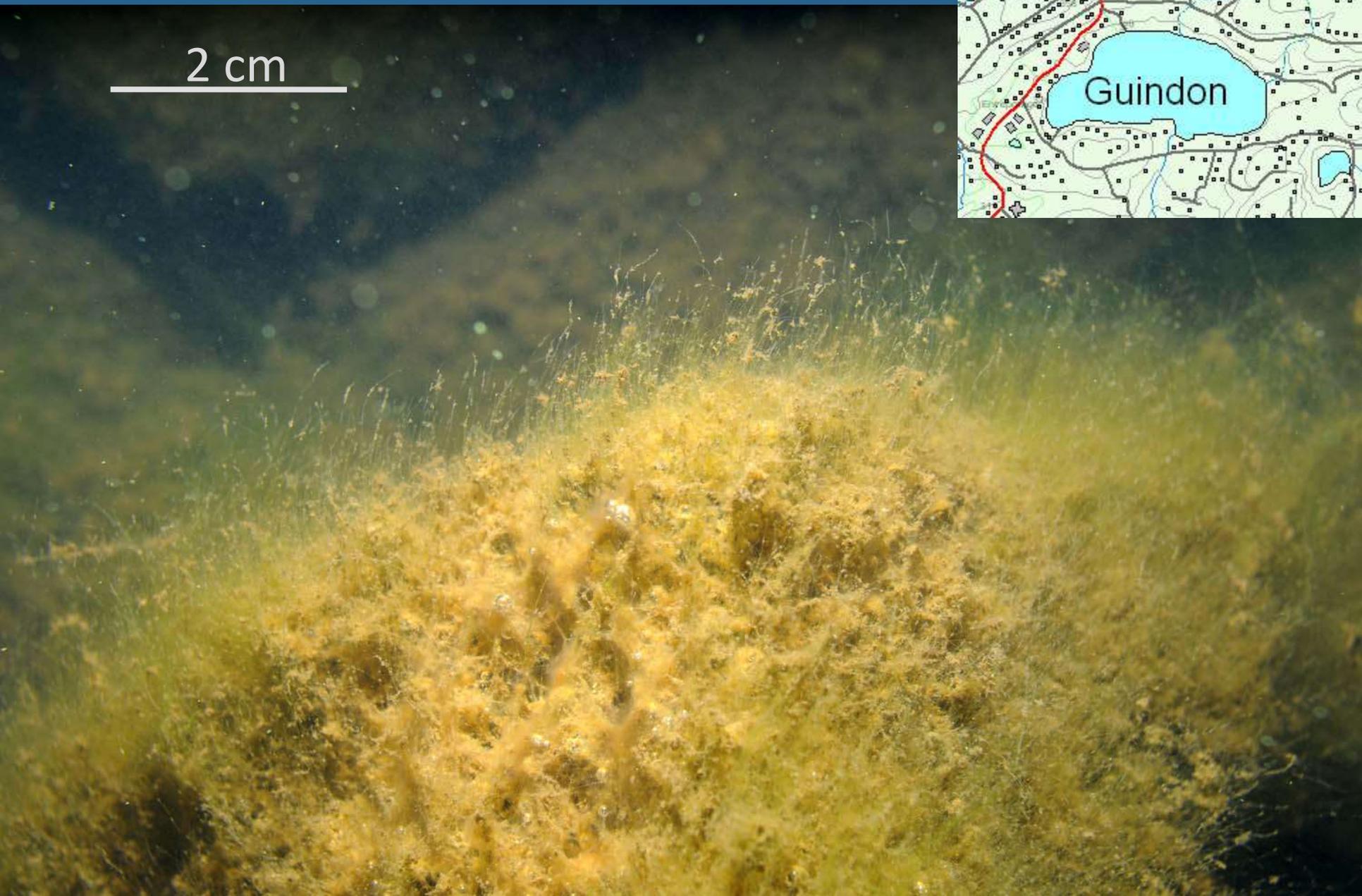


Roche, lac Morin, août 2009



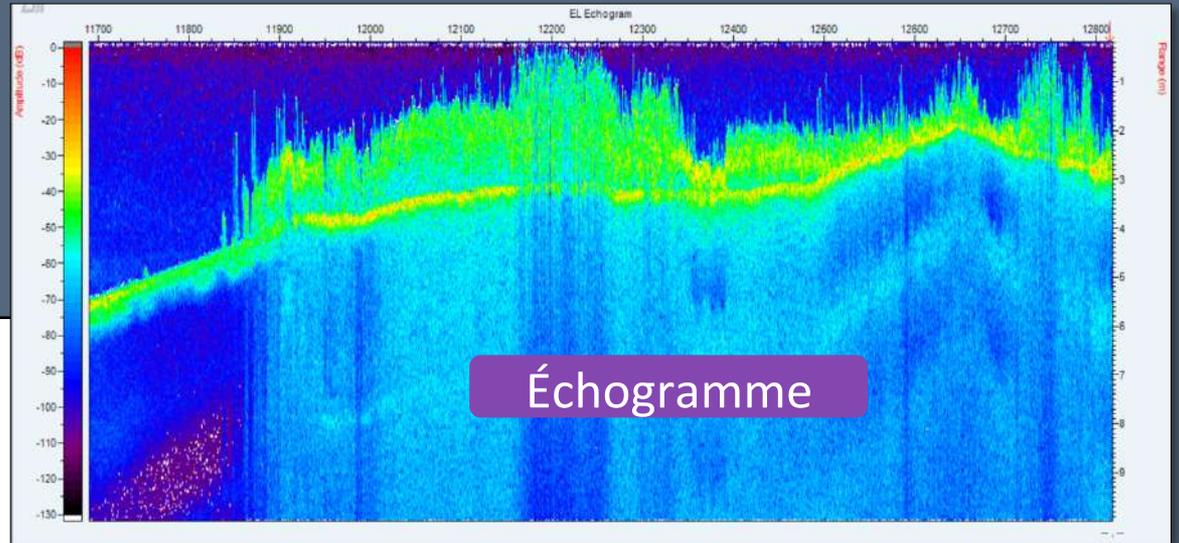
Roche, lac Guindon, juillet 2009

2 cm

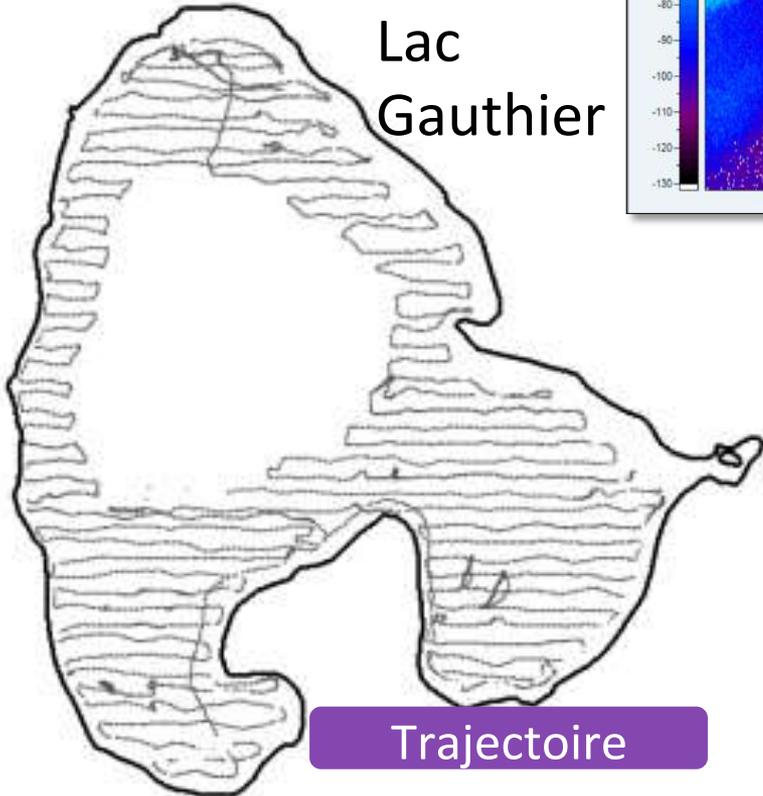


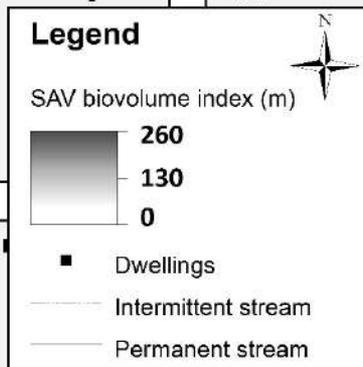
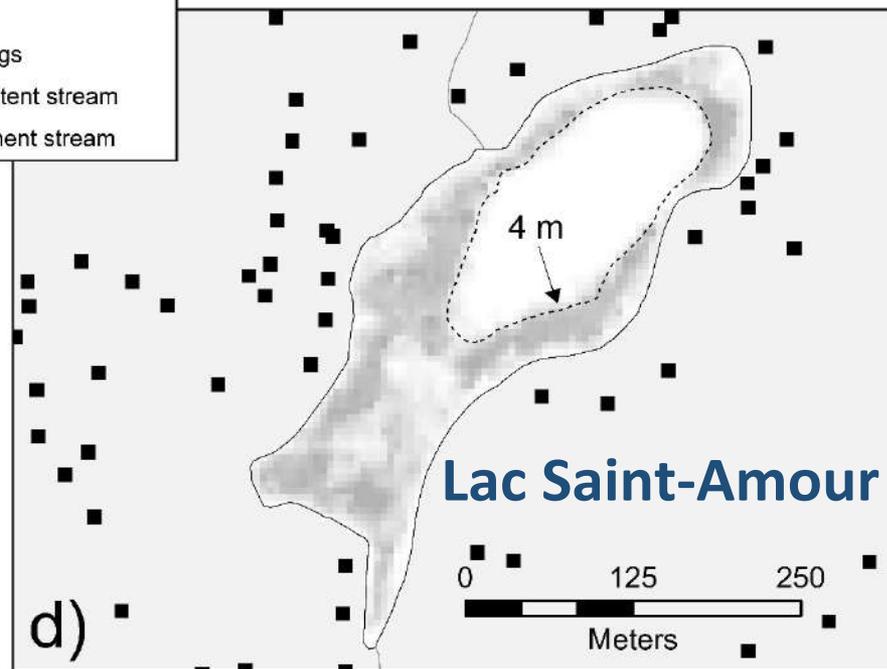
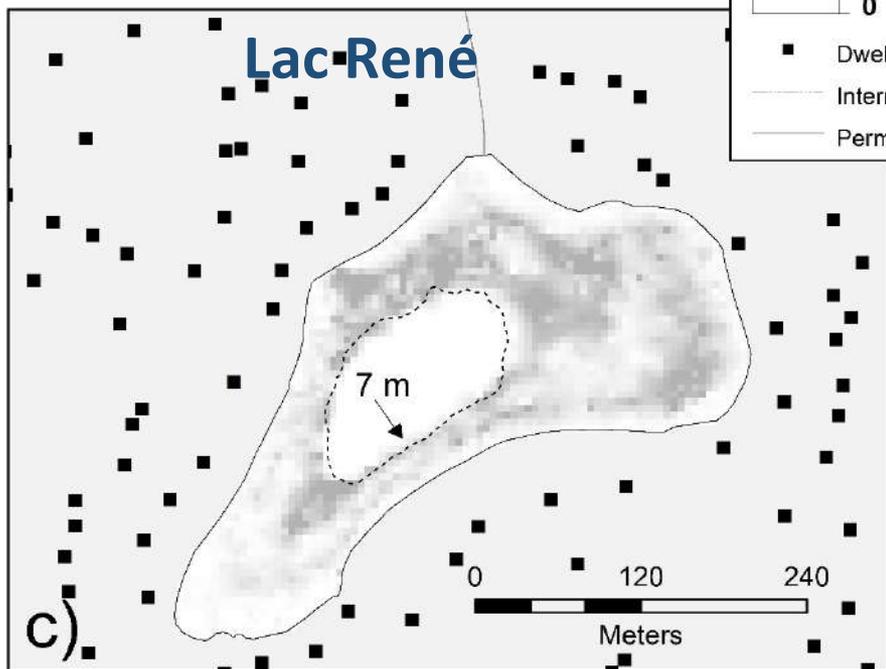
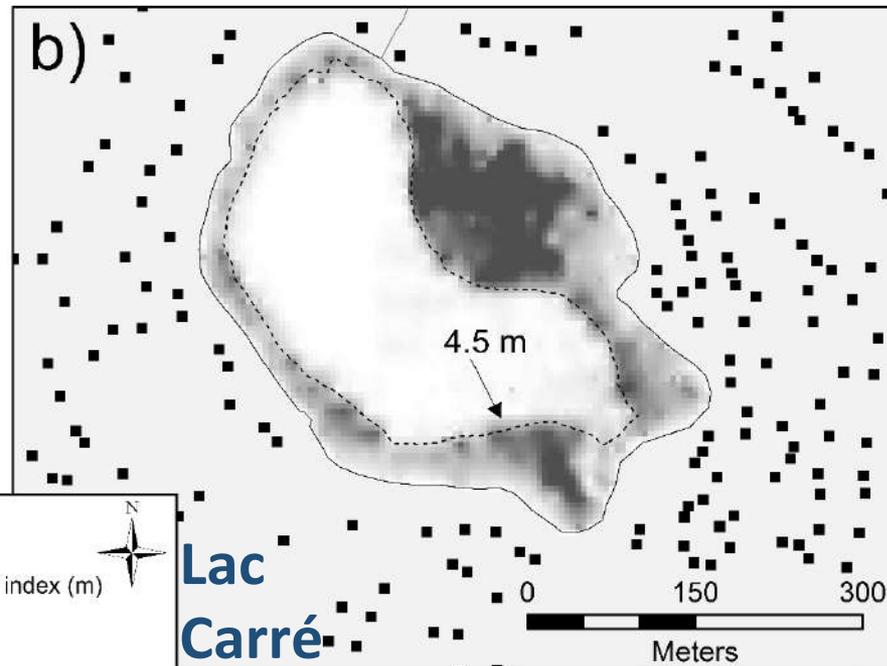
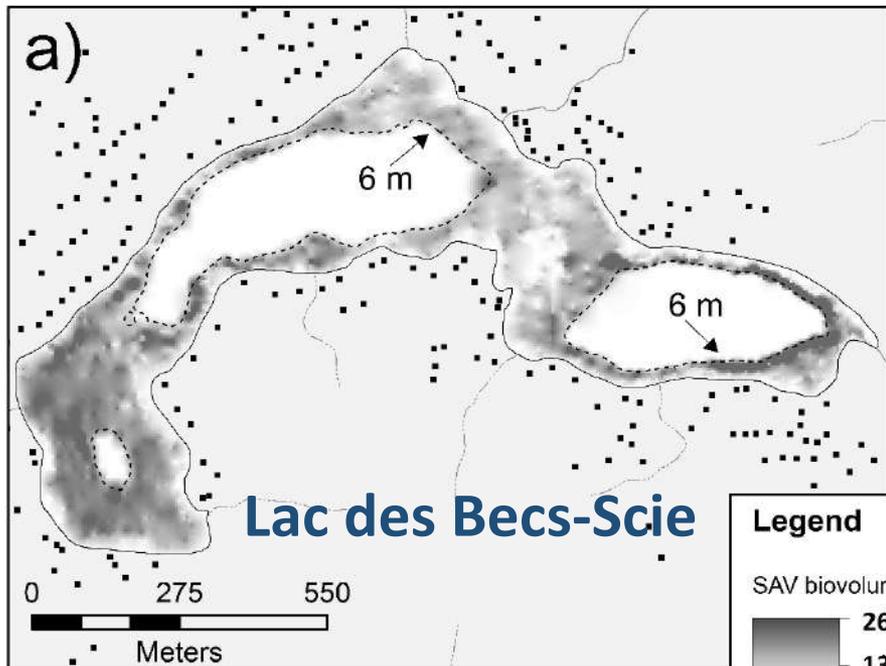
Cartographie des macrophytes dans 33 lacs (Ariane Denis-Blanchard)

Échosondeur
BioSonics DT-X



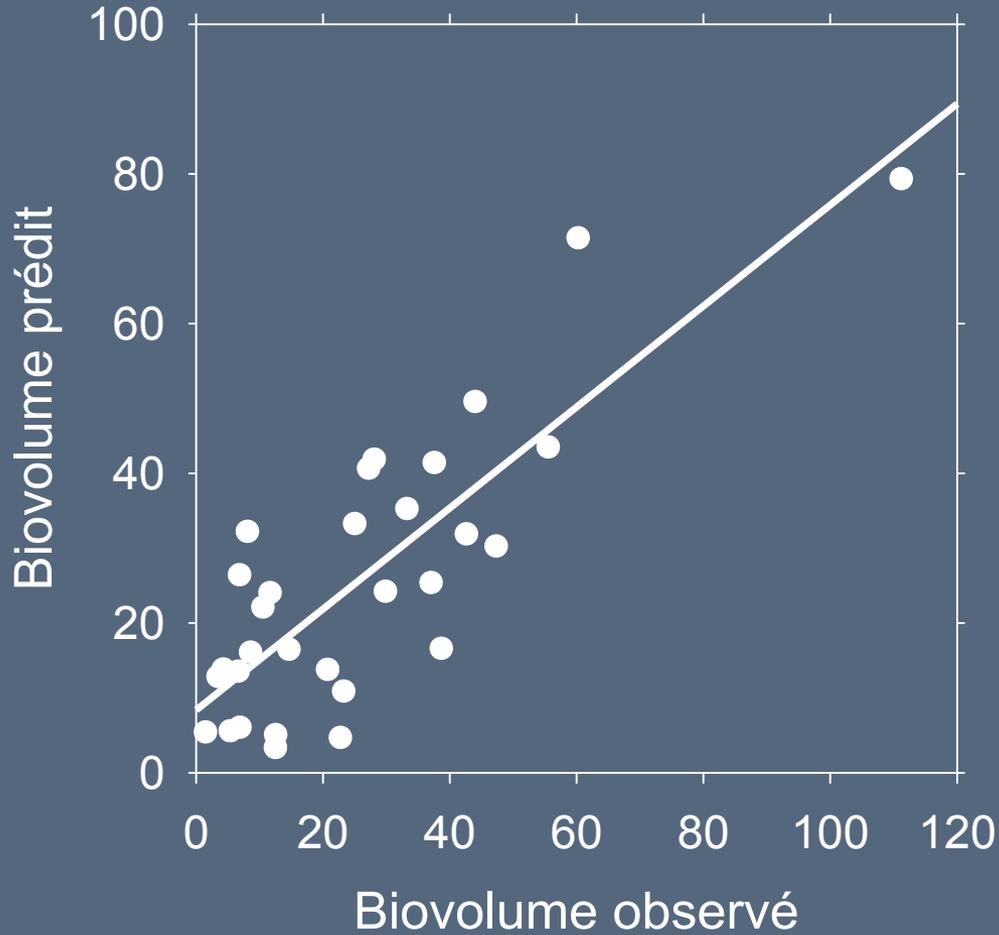
Lac
Gauthier





Biovolume des macrophytes

En régression multiple, seulement deux variables significatives :



| Variable | % variance | p |
|-----------------------|------------|----------|
| FIS DD (+) | 59,4 | < 0,0000 |
| Superficie du lac (+) | 5,6 | 0,0019 |
| | | |
| | | |

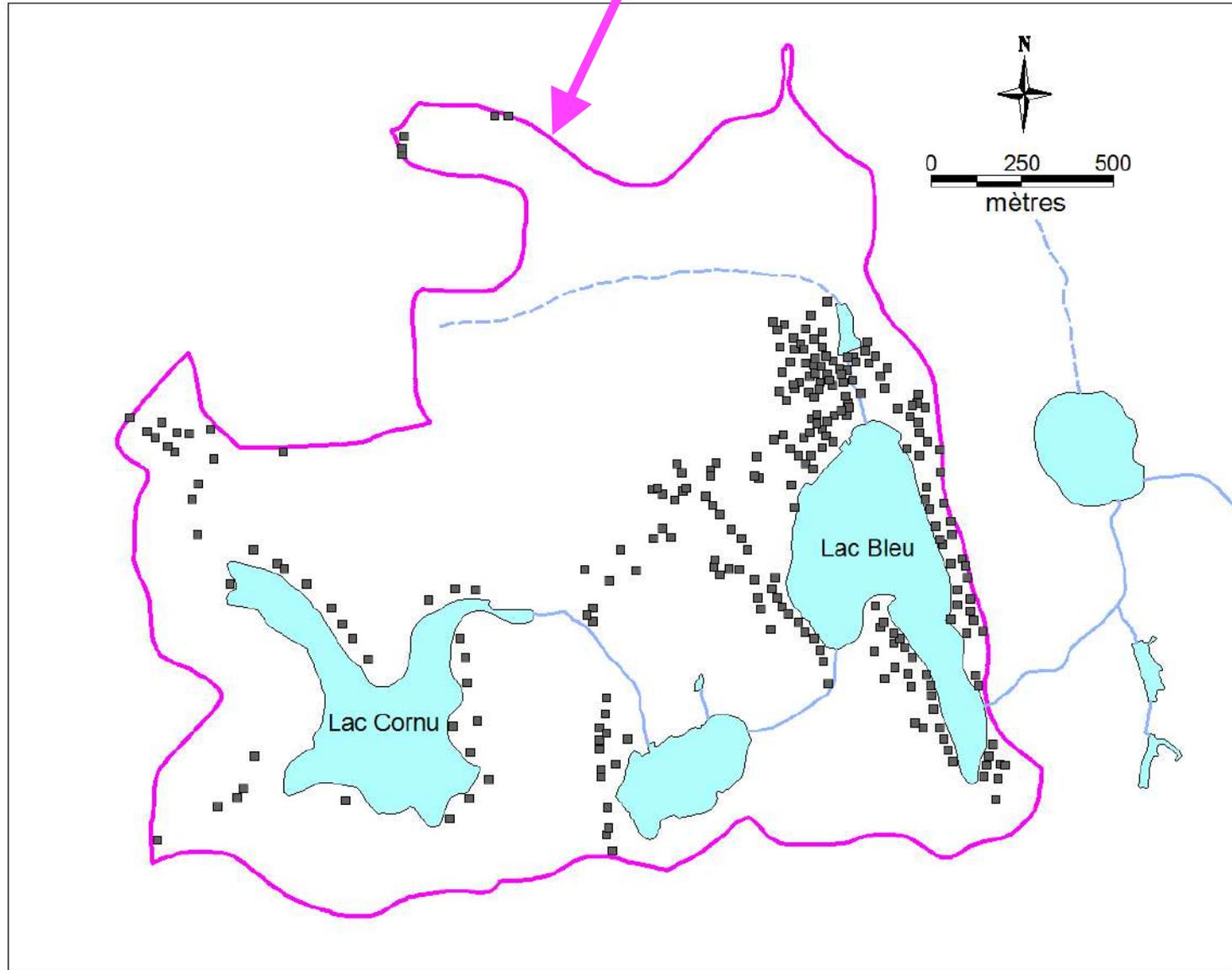
FIS = nombre de bâtiments/superficie lac

$r^2_{aj.} = 65 \%$

N = 31 lacs

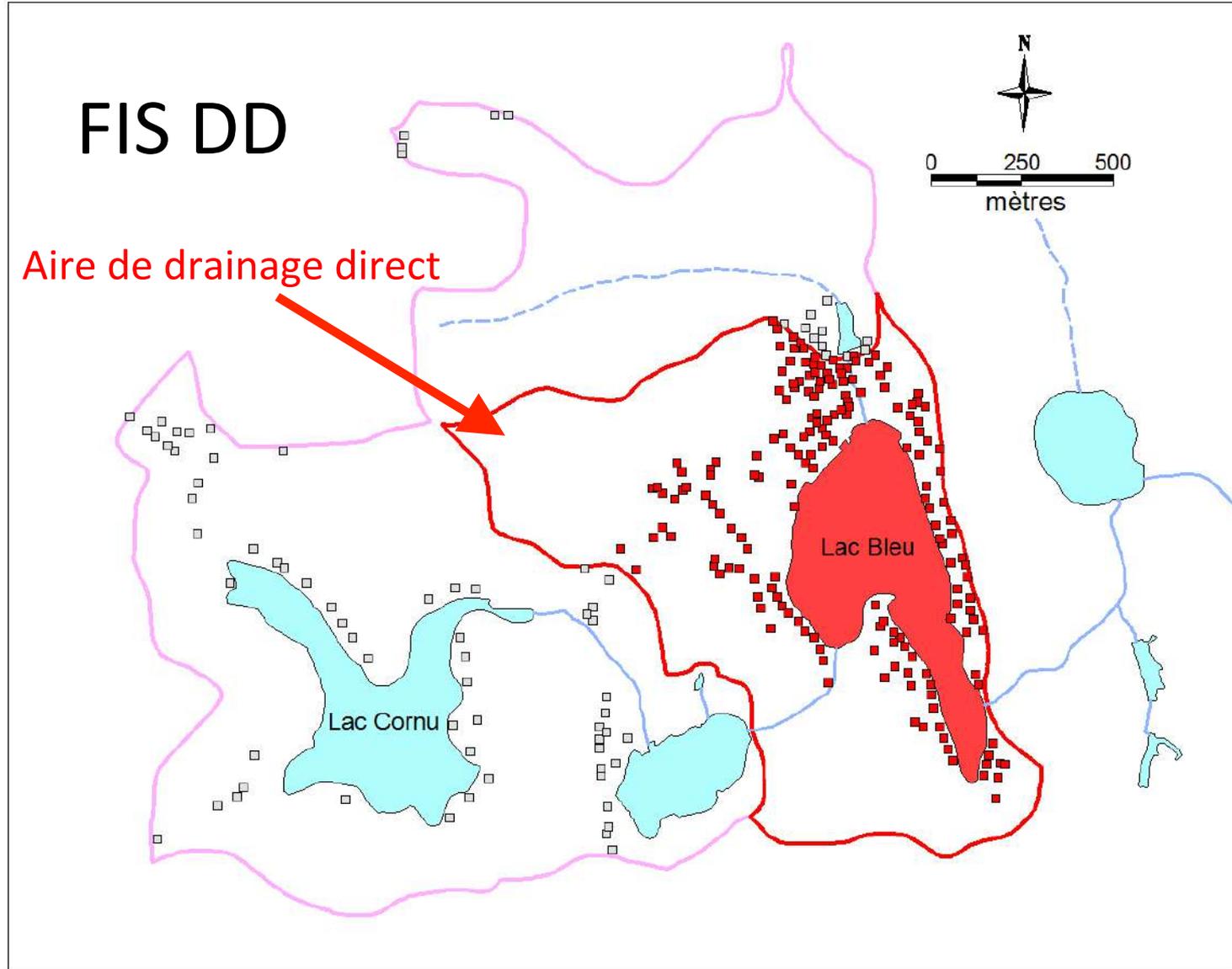
Lac Bleu, Saint-Hippolyte

Bassin versant

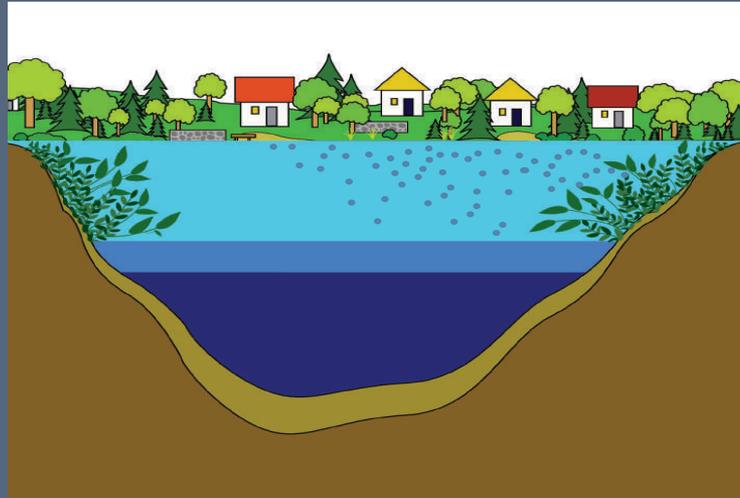


Lac Bleu, Saint-Hippolyte

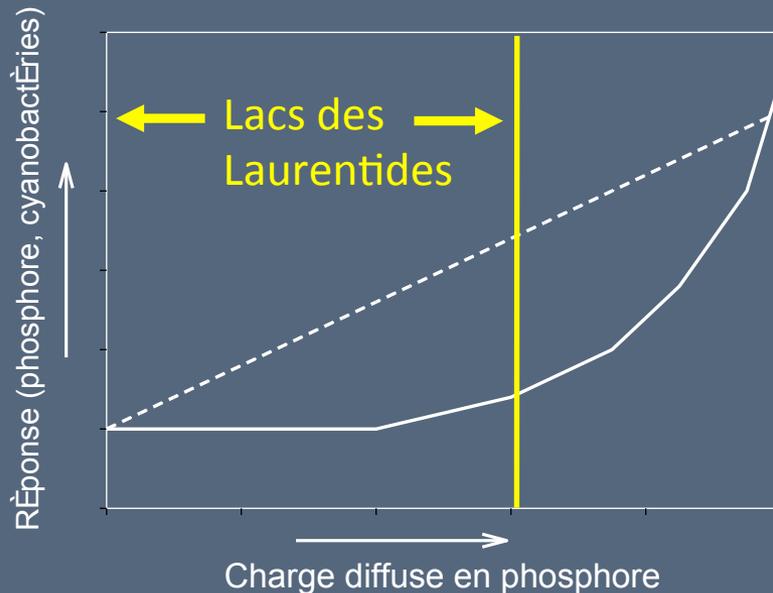
Nombre de bâtiments dans l'aire de drainage direct/superficie du lac



Impacts humains sur les écosystèmes lacustres dans les



L'effet cumulé des charges diffuses sur les concentrations en P dans la colonne d'eau n'est pas linéaire



Une grande partie de la charge diffuse en P est initialement séquestrée dans la zone littorale par les macrophytes, les épiphytes et les sédiments et ne s'exprime pas dans la colonne d'eau

Conclusions

Lacs de villégiature

Les concentrations en P et en chlorophylle planctonique ne sont pas des indicateurs sensibles de l'eutrophisation anthropique (implications futures pour le RSVL)

Se concentrer sur les indicateurs précoces de l'eutrophisation due aux charges diffuses de P et de N dans la zone littorale

- Levés hydro-acoustiques pour estimer l'abondance des macrophytes dans un grand nombre de lacs
- Quantifier le développement du périphyton

Remerciements : MDDLCCC pour le prêt de l'échosondeur, CRE-Laurentides pour les dessins, Anne Léger pour l'édition des vidéos