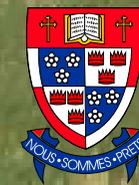


**Simulation du transport des nitrates de la zone vadose à la zone saturée  
des aquifères pour l'amélioration des pratiques de fertilisation :  
exemple de l'aquifère de Abbotsford-Sumas en Colombie-Britannique**

**Romain Chesnaux, ing. Jr., Ph.D.**  
Département des sciences appliquées  
Université du Québec à Chicoutimi

Earth Sciences  
Simon Fraser University



Conférence du GRIES, le 8 février 2012

**UQAC**  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC  
À CHICOUTIMI

## Problématique et objectifs

- Problématique : Est-il possible de prédire le potentiel de contamination des eaux souterraines par les nitrates selon leurs taux d'application ?
- Objectifs :
  - Évaluer l'efficacité de l'adoption récente dans le monde agricole des pratiques de gestion améliorée de la fertilisation des sols (« *Best Management practices* »)
  - Réaliser à partir de l'outil numérique et de données disponibles de terrain des modèles prévisionnels de contamination des aquifères
  - Émettre des recommandations quant aux quantités maximales de fertilisant (masse) pouvant être appliquées tout en respectant les concentrations maximales acceptables dans les eaux souterraines (concentration dans la zone saturée)

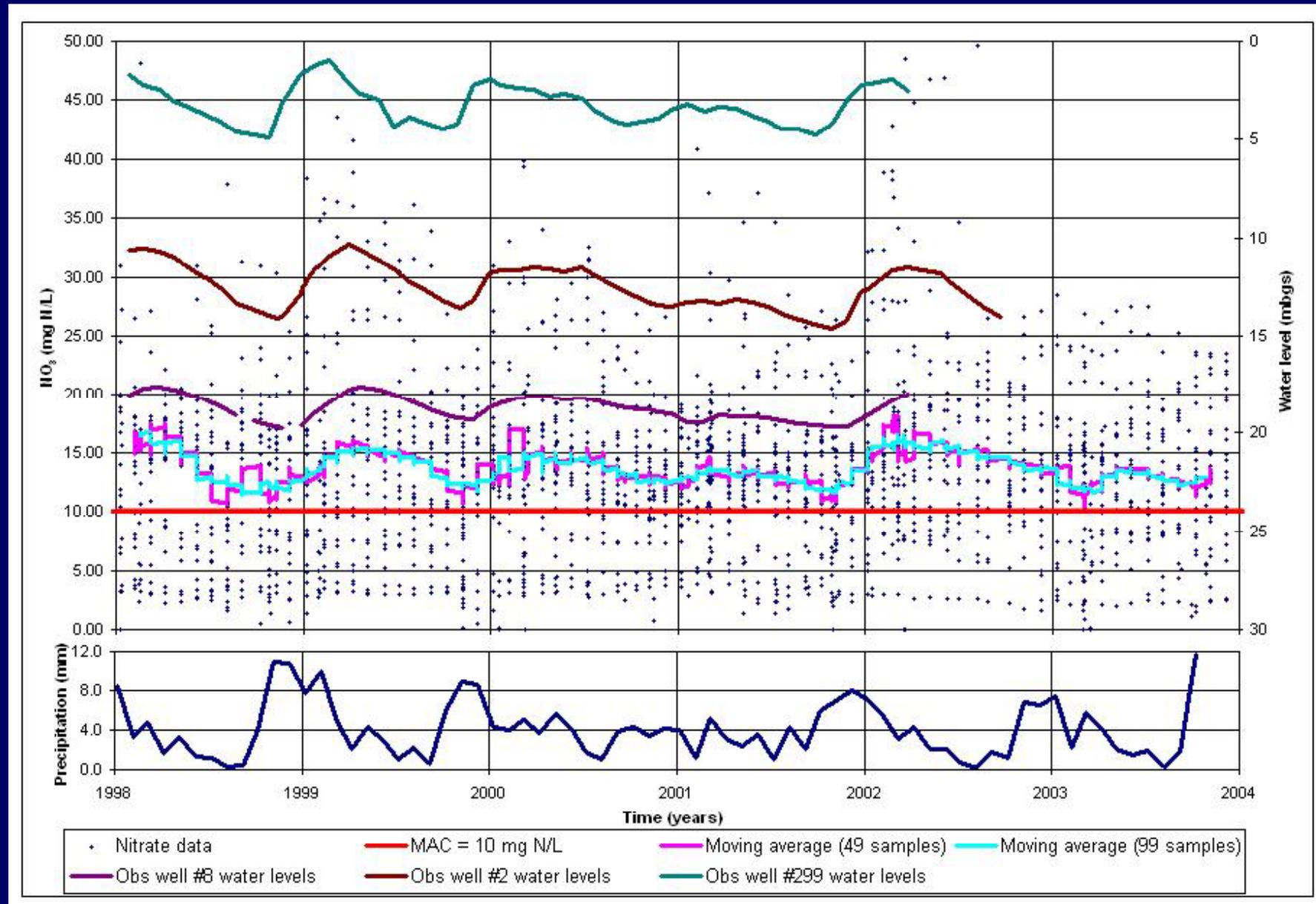
## Plan de présentation :

- Présentation du site et des données d'observation de la contamination par les nitrates
- Proposition d'une méthodologie pour la modélisation du transport de nitrates : 1- dans la zone vadose des aquifères à nappe libre et prédictions des concentrations arrivant à la nappe et 2-dans la zone saturée et estimation des champs de concentration et de l'âge de l'eau contaminée
- Résultats obtenus et recommandations pour une amélioration des pratiques d'amendement des sols

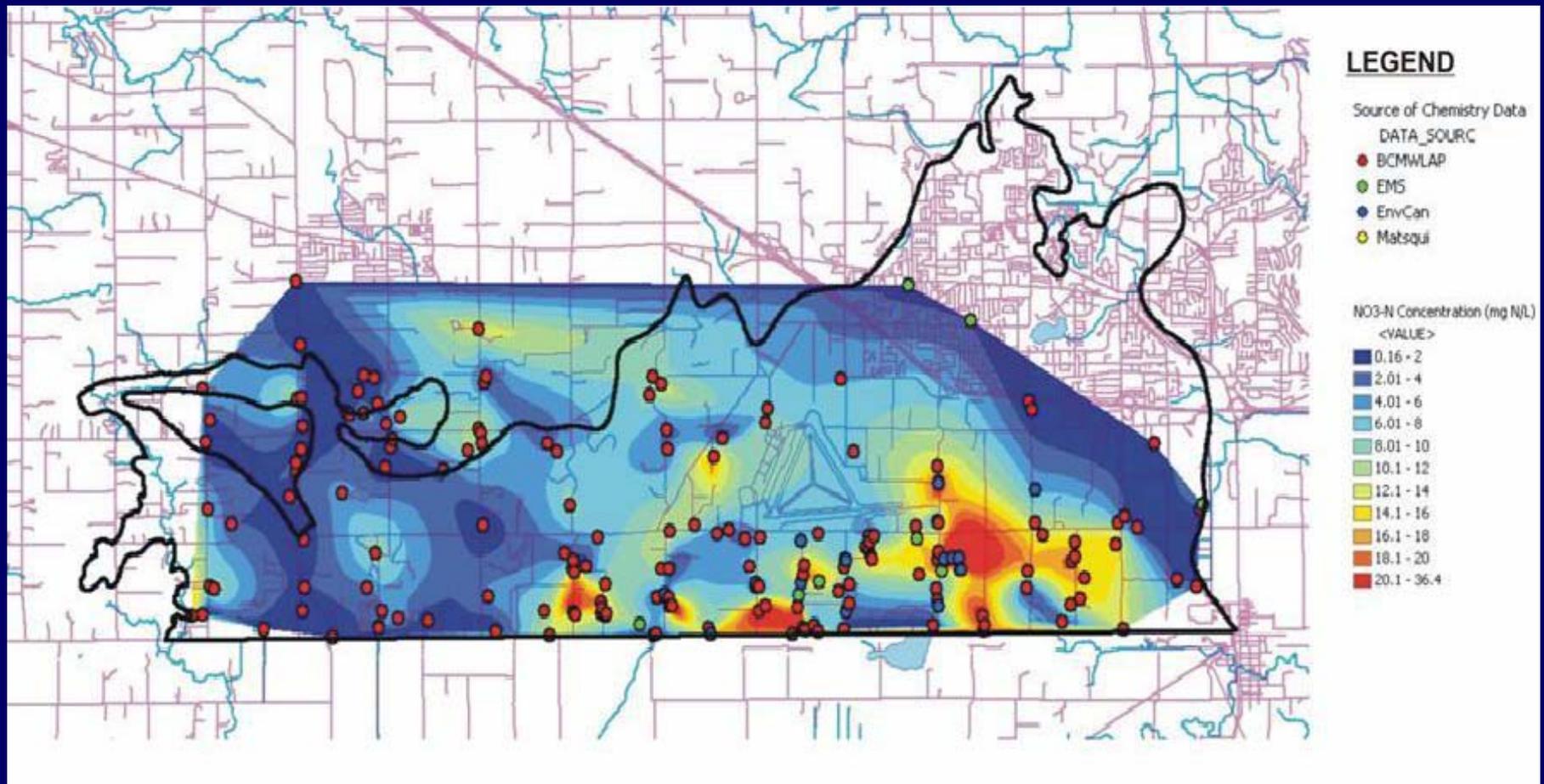
# L'aquifère transfrontalier de Abbotsford-Sumas



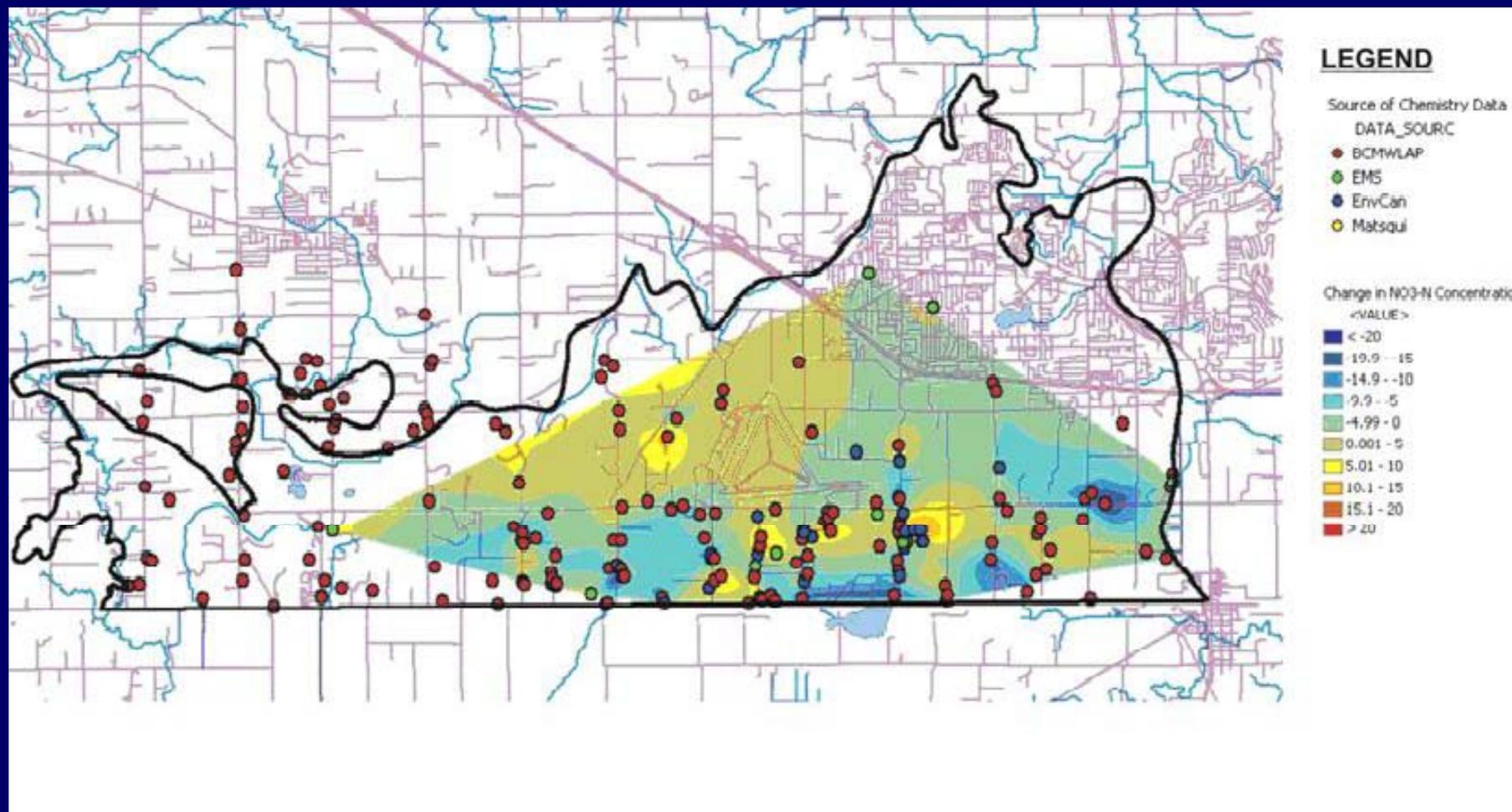
# CONTAMINATION PAR LES NITRATES

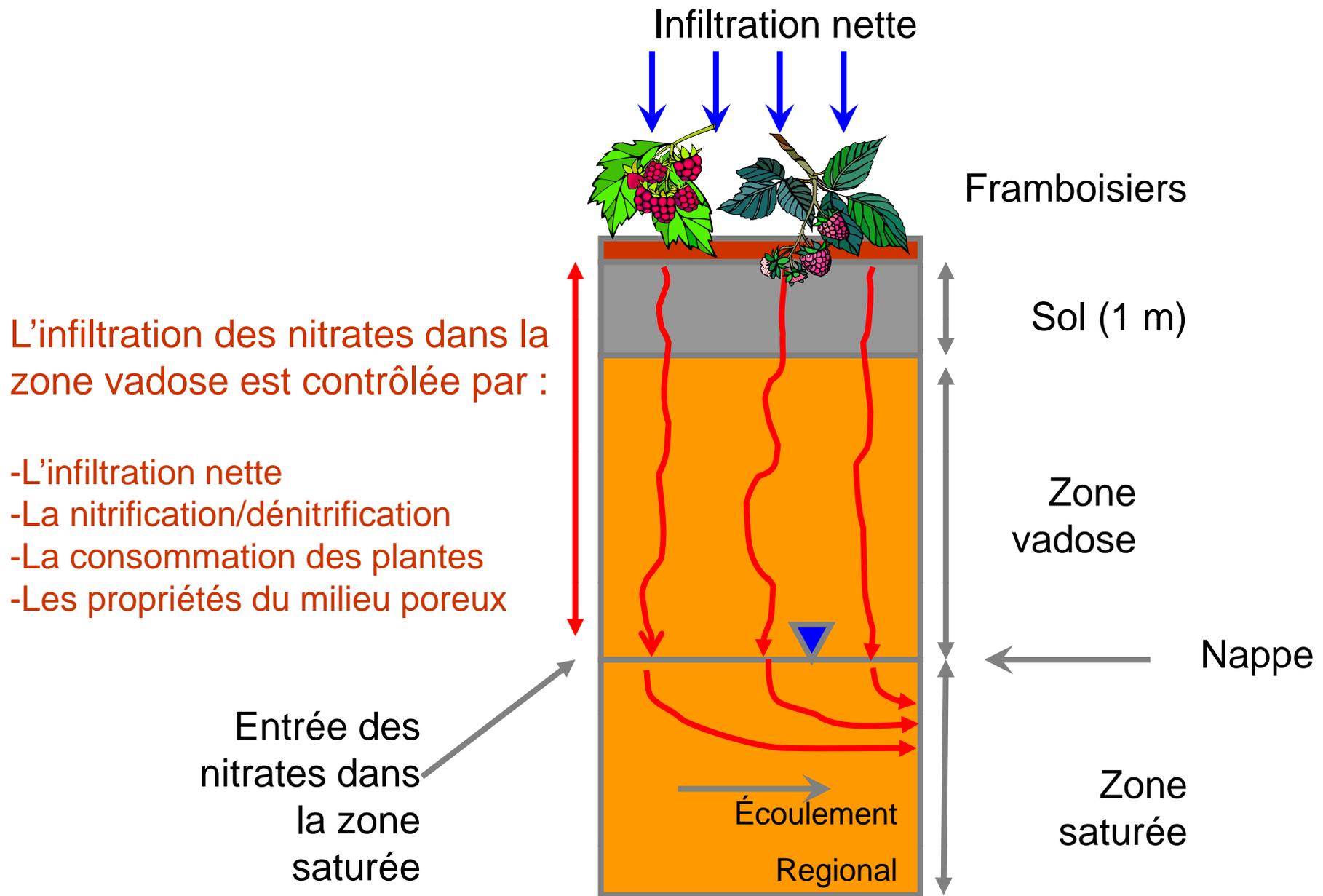


# Distribution des nitrates 2002-2004



## Variation des concentrations en nitrates entre 1992 et 2004





# Méthodologie adoptée pour la simulation du transport de nitrate dans l'aquifère

1 : Simulation en 1D de la migration des nitrates dans la zone vadose de l'aquifère à partir des logiciels SEEP/W et CTRAN/W de GeoSlope

2 : Détermination des concentrations en nitrate arrivant à la nappe

3 : Utilisation de Help (recharge), Modflow (écoulement en conditions saturées), Modpath (traçage de particule) et MT3DMS (couplé à Modflow, transport en milieu saturé)

4 : Traçage des particules d'eau et détermination des champs de concentration en nitrates

# Méthodologie adoptée pour la simulation du transport de nitrate dans l'aquifère

$$1) \mathbf{v} = -K_w \text{grad}(h)$$

$$2) -\text{div}(\mathbf{v}) + Q = \frac{\partial \theta_w}{\partial t}$$

$$3) \theta_w(u_w)$$

$$4) K_w(u_w)$$

Éqs. 1, 2, 3 et 4 : SEEP/W

Éq. 5 : CTRAN/W

$$5) \left( \theta_w + \rho_d \frac{\partial S}{\partial C} \right) \frac{\partial C}{\partial t} = \theta_w D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - \lambda \theta_w C - \lambda S \rho_d$$

$K_w$  conductivité hydraulique,

$\theta_w$  teneur en eau volumique,

$u_w$  pression interstitielle,

$Q$  terme source,

$\rho_d$  masse volumique sèche,

$S$  coefficient d'adsorption,

$C$  concentration du soluté,

$V$  vitesse de Darcy calculée par SEEP/W,

$D$  coefficient de dispersion hydrodynamique,

$z$  élévation,

$t$  temps,

$\lambda$  constante de désintégration radioactive.

# Méthodologie adoptée pour la simulation du transport de nitrate dans l'aquifère

Analyse granulométrique du sol et de l'aquifère

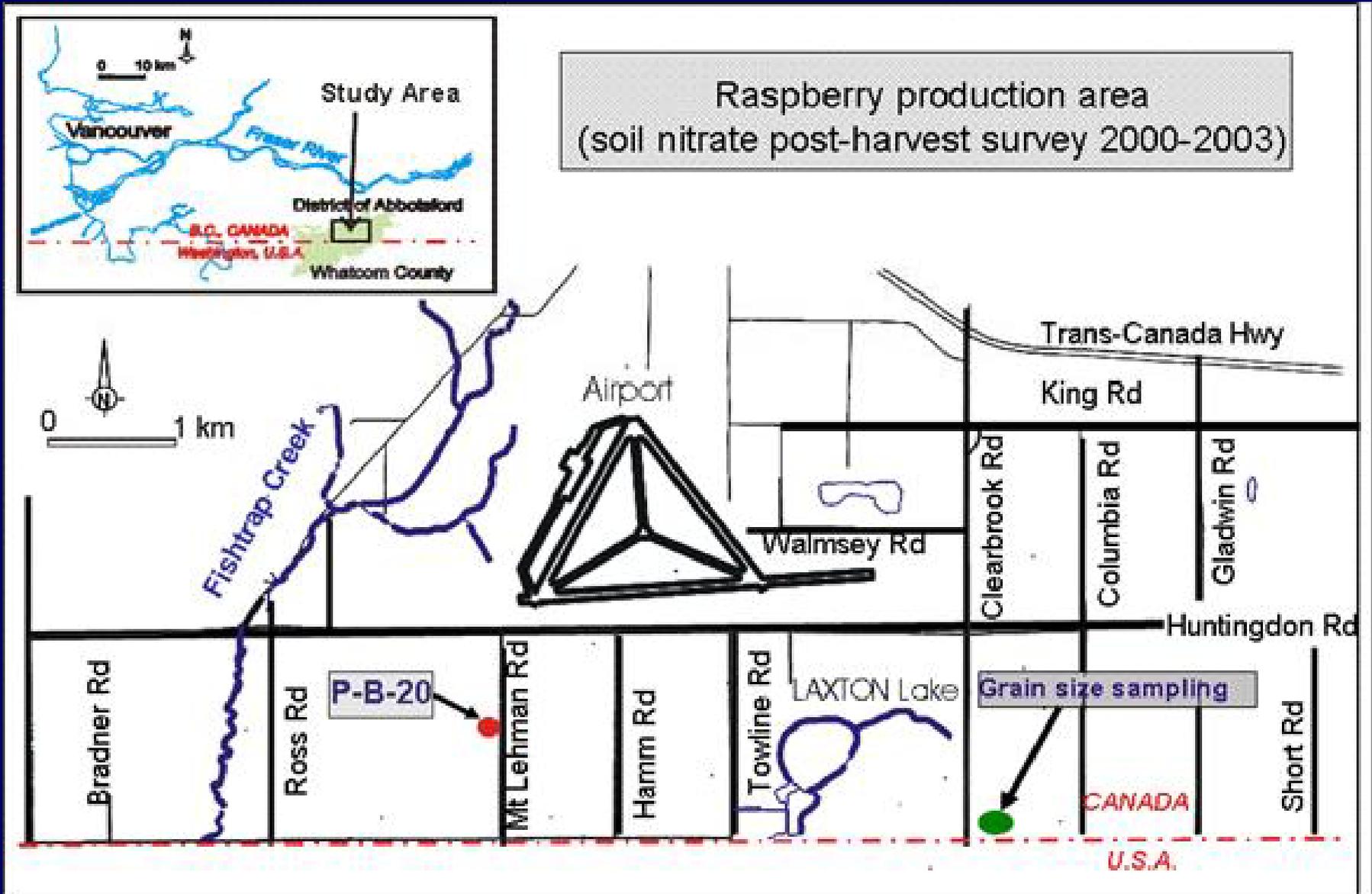
Arya et Paris, 1981; Aubertin et al., 2003; Fredlund et Xing, 1994; et Van Genuchten, 1980

$$\theta_w(z_w)$$

Fredlund et al., 1994; Green et Corey, 1971; Van Genuchten, 1980

$$K_w(z_w)$$

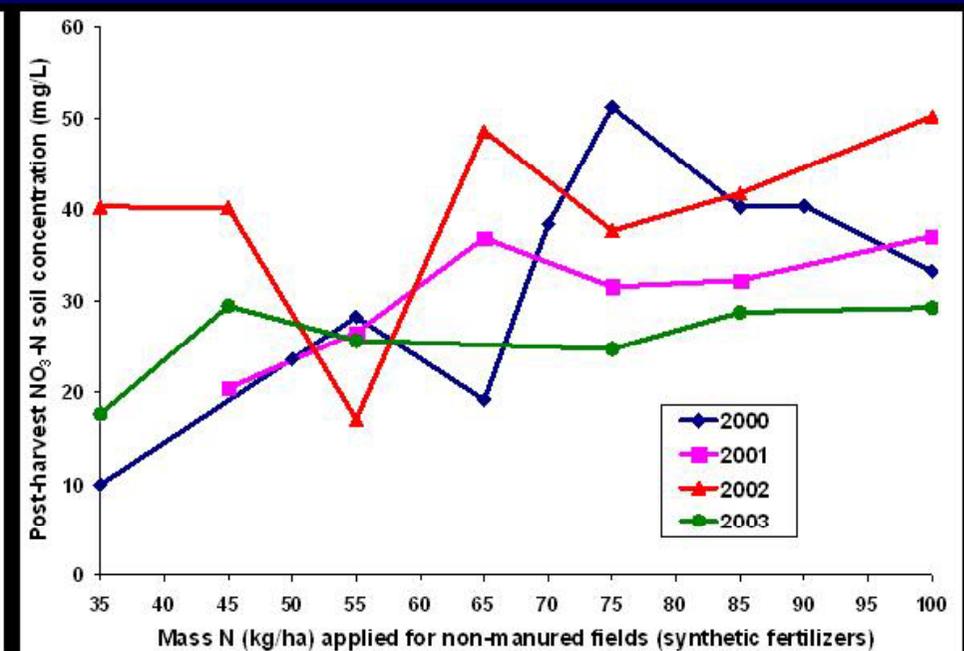
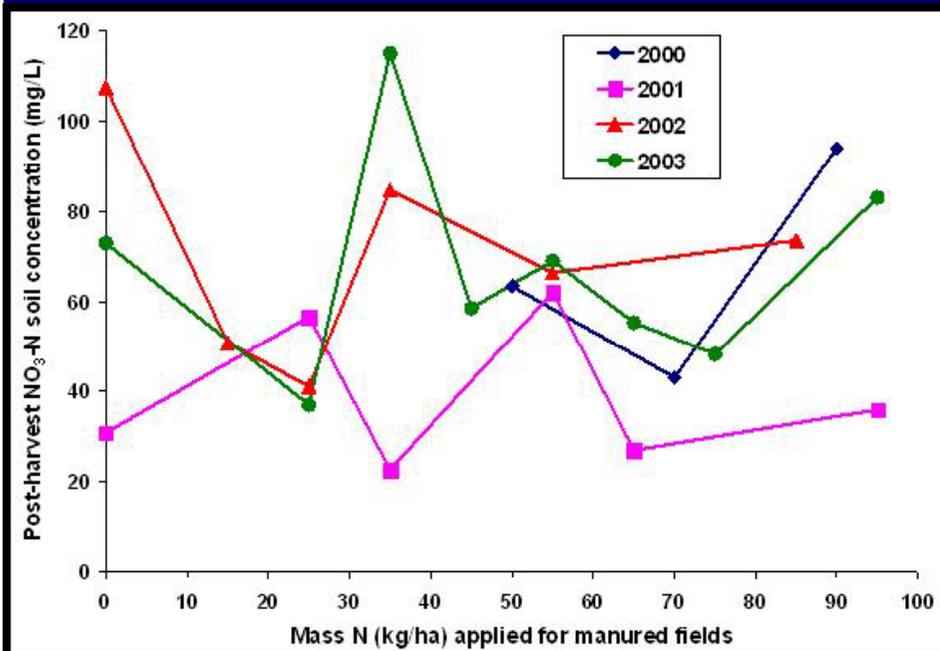
# Aire d'intérêt pour la modélisation du transport des nitrates dans la zone vadose



# Concentrations résiduelles après récolte mesurées dans des champs avec et sans épandage de fumier (observations réalisées de 2000 à 2003)

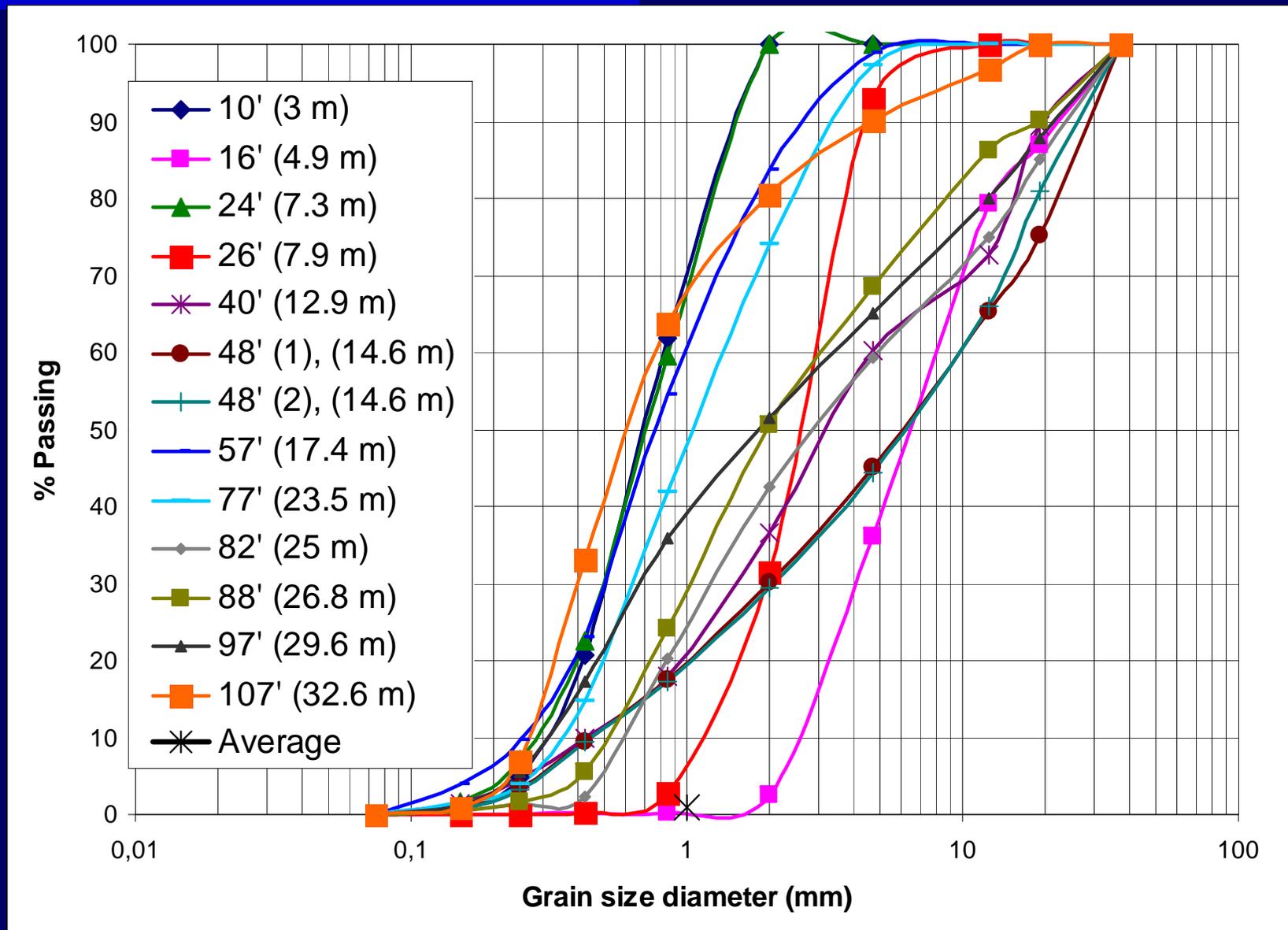
a) Champs avec épandage de fumier (nitrate organique)

b) Champs avec épandage de nitrate synthétique (nitrate inorganique)



Données tirées de Mouritzen (rapports de 2000 à 2003)

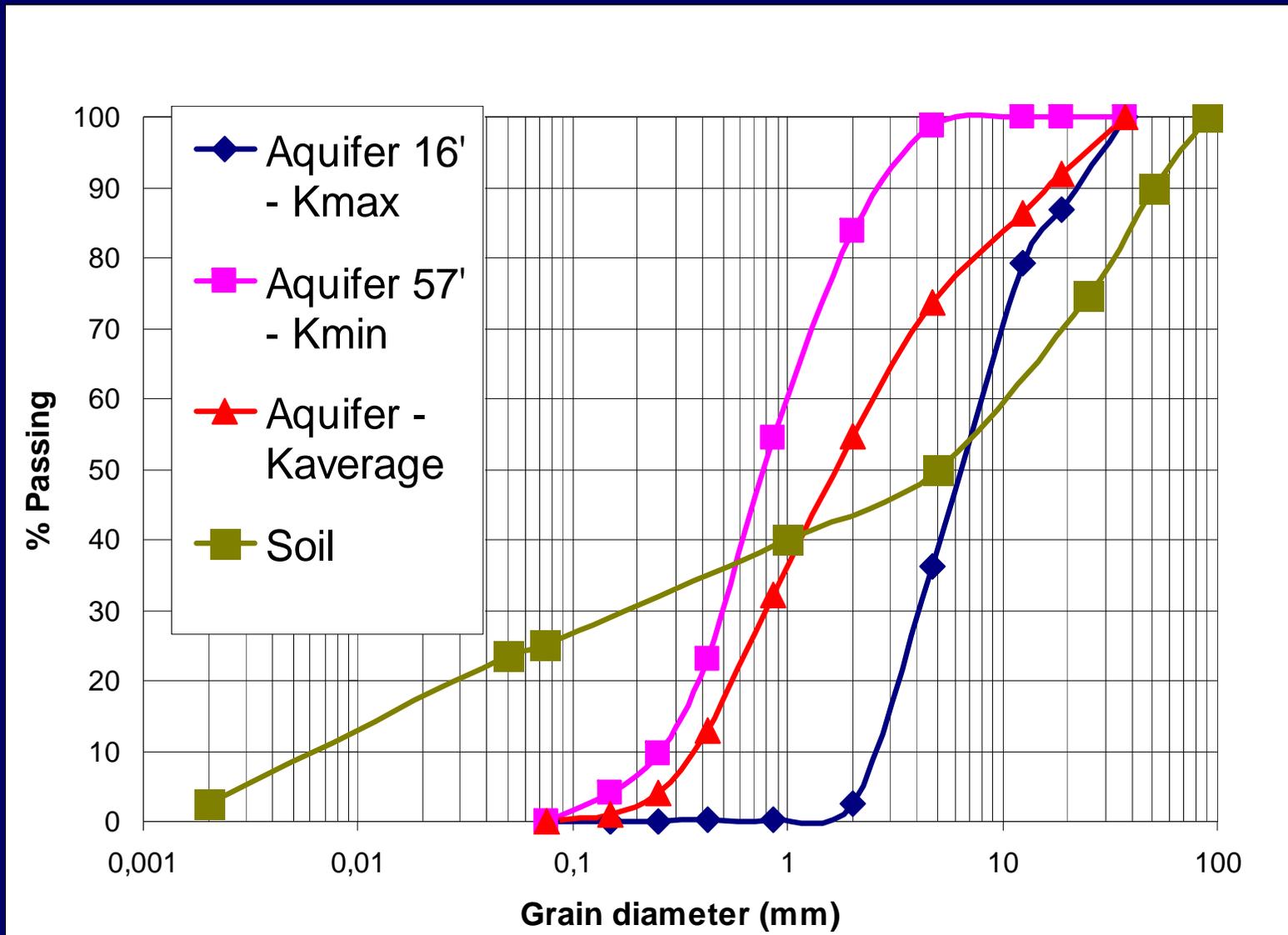
# Courbes granulométriques



D'après Chesnaux et Allen, *Environmental Modeling & Assessment*, 2008

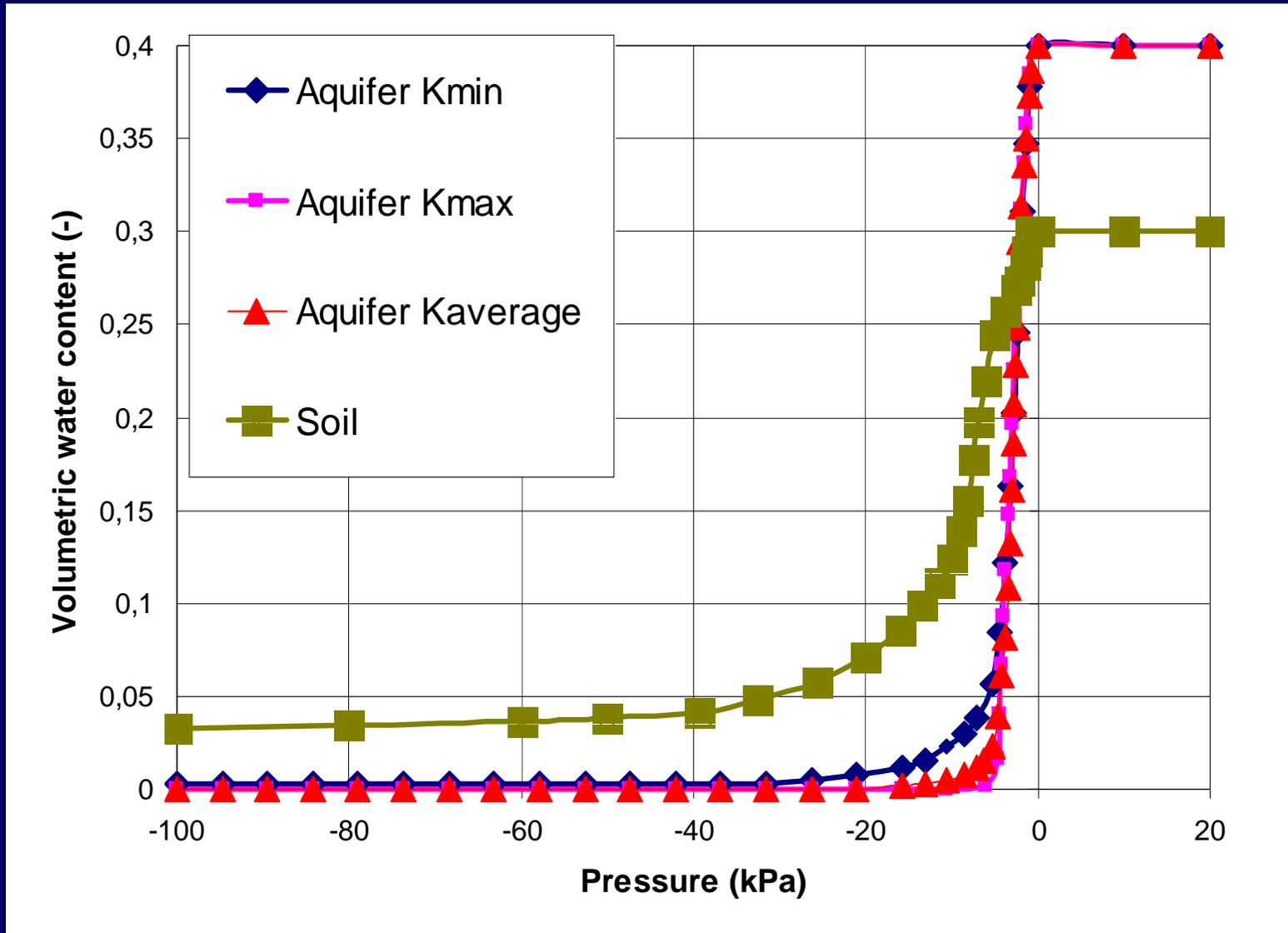


## Courbes granulométriques considérées pour la modélisation



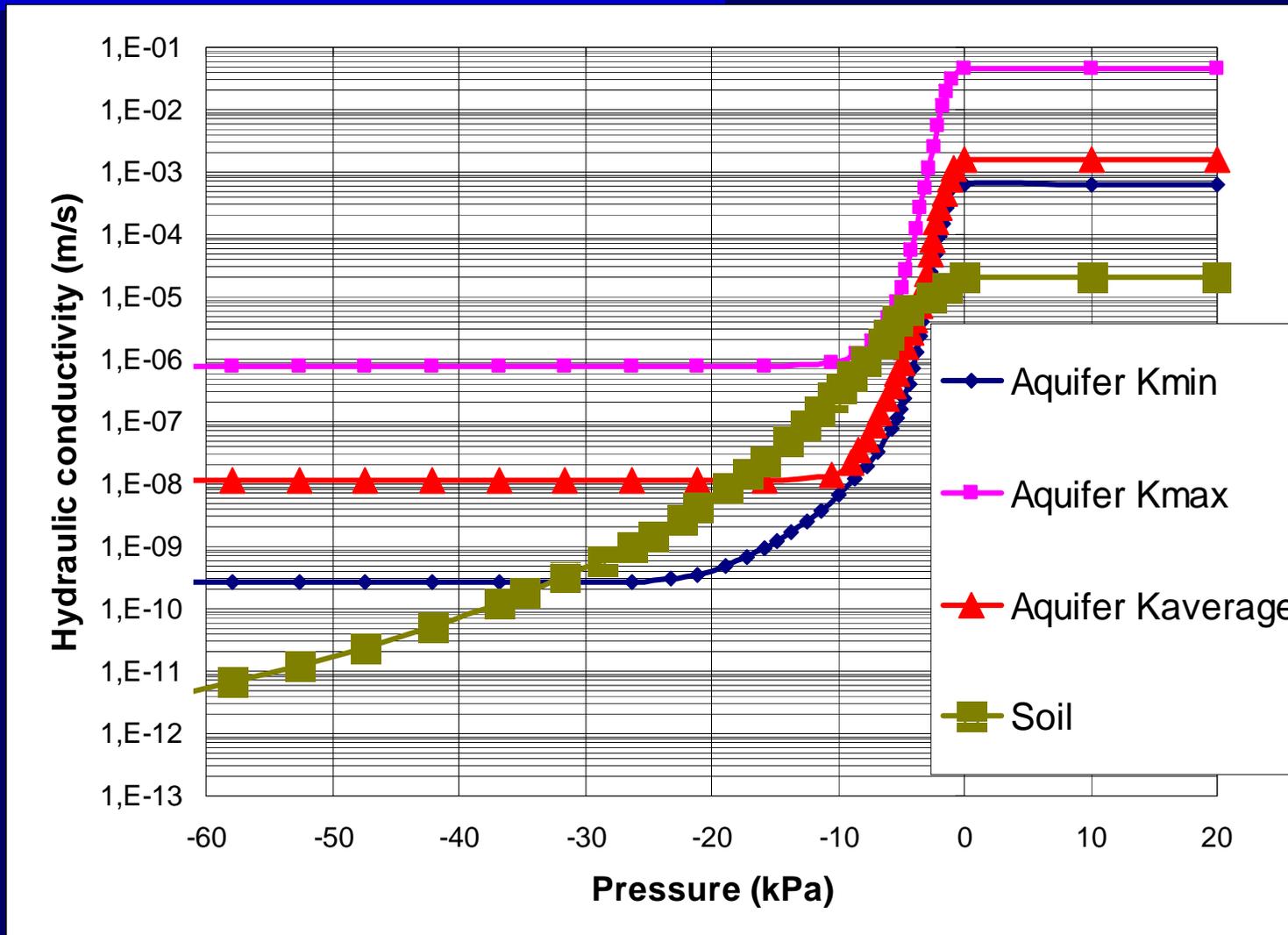
D'après Chesnaux et Allen, *Environmental Modeling & Assessment*, 2008

# Propriétés du sol et de l'aquifère : courbes de teneur en eau prédites à partir des courbes granulométriques



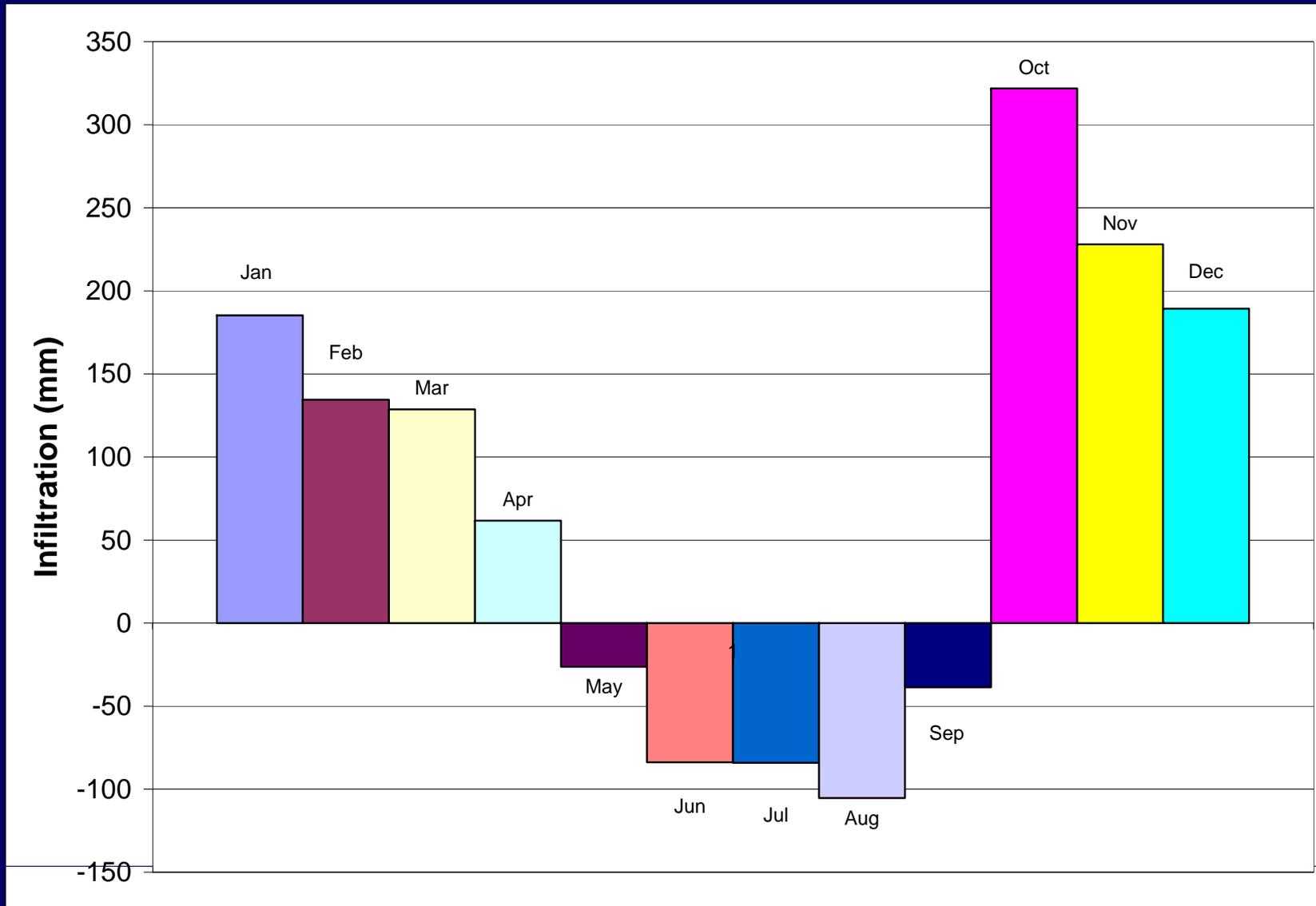
D'après Chesnaux et Allen, *Environmental Modeling & Assessment*, 2008

# Propriétés du sol et de l'aquifère : courbes conductivité hydraulique prédites à partir des courbes granulométriques



D'après Chesnaux et Allen, *Environmental Modeling & Assessment*, 2008

# Données climatiques

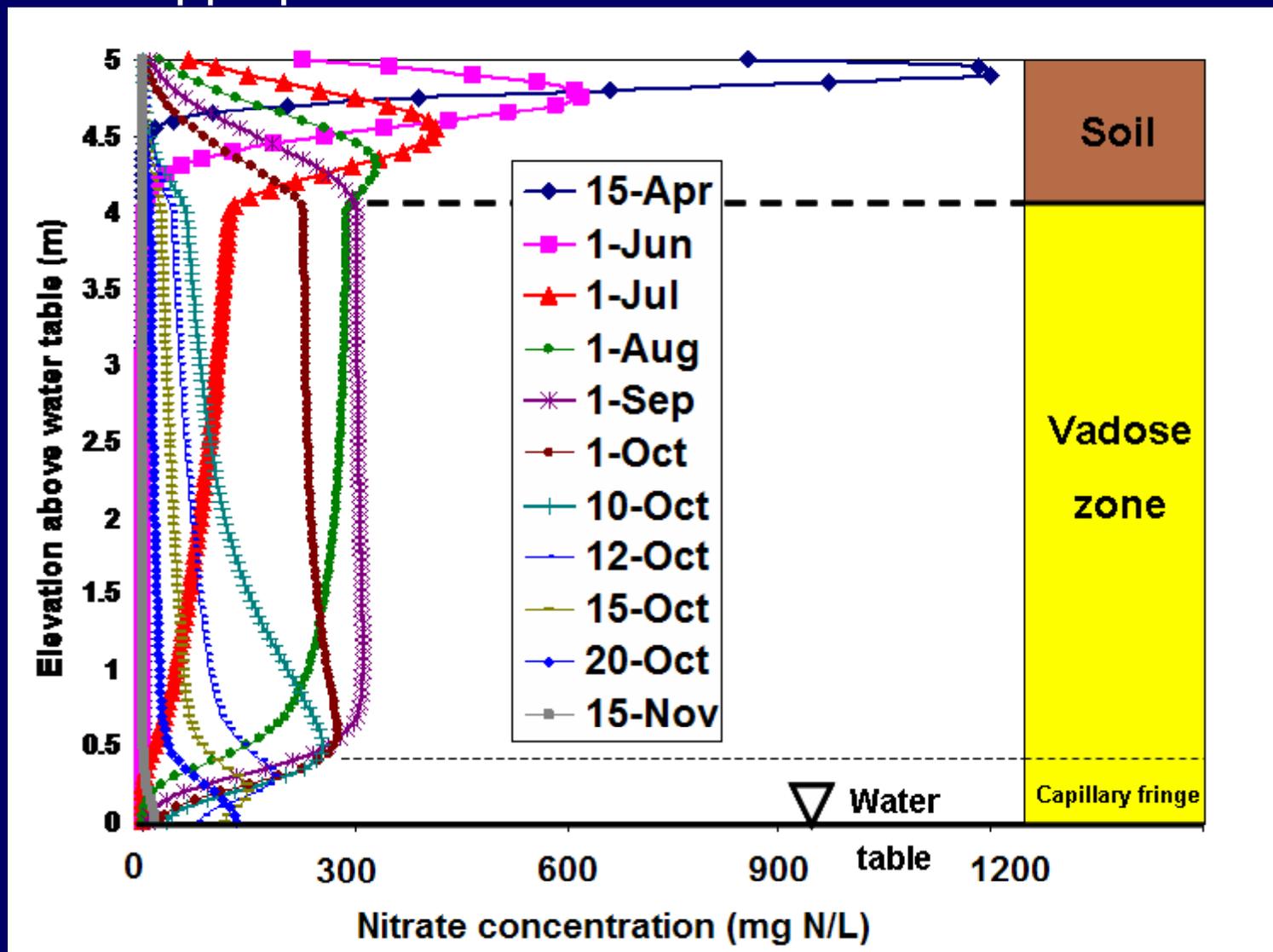


D'après Chesnaux et Allen, *Environmental Modeling & Assessment*, 2008

## Autres données d'entrée du modèle

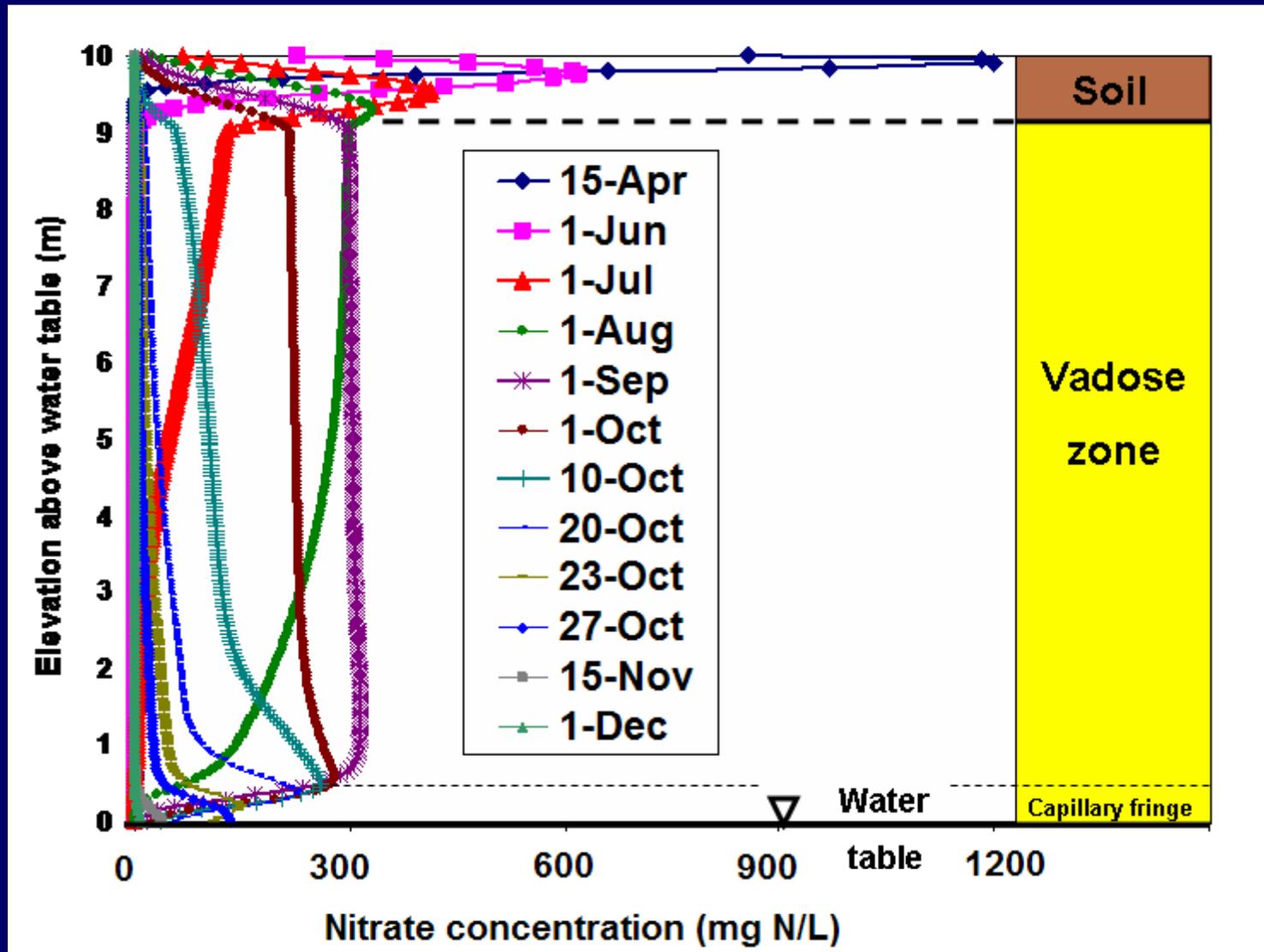
- Taux d'application moyen de fertilisants synthétiques : 100 kg-N/ha le 15 avril
- Consommation moyenne par les framboisiers : 25 kg-N/ha
- Dénitrification : 5 kg-N/ha
- Irrigation moyenne : 450 mm de juin à septembre
- Les propriétés "moyennes" du sol et de l'aquifère sont considérées
- Dispersivités longitudinales et transversales de 10 cm et 1 cm respectivement

Profils des concentrations en nitrate simulés dans le cas d'une zone vadose de 5 m d'épaisseur lorsque 100 kg-N/ha sont appliqués à la surface du sol le 15 avril



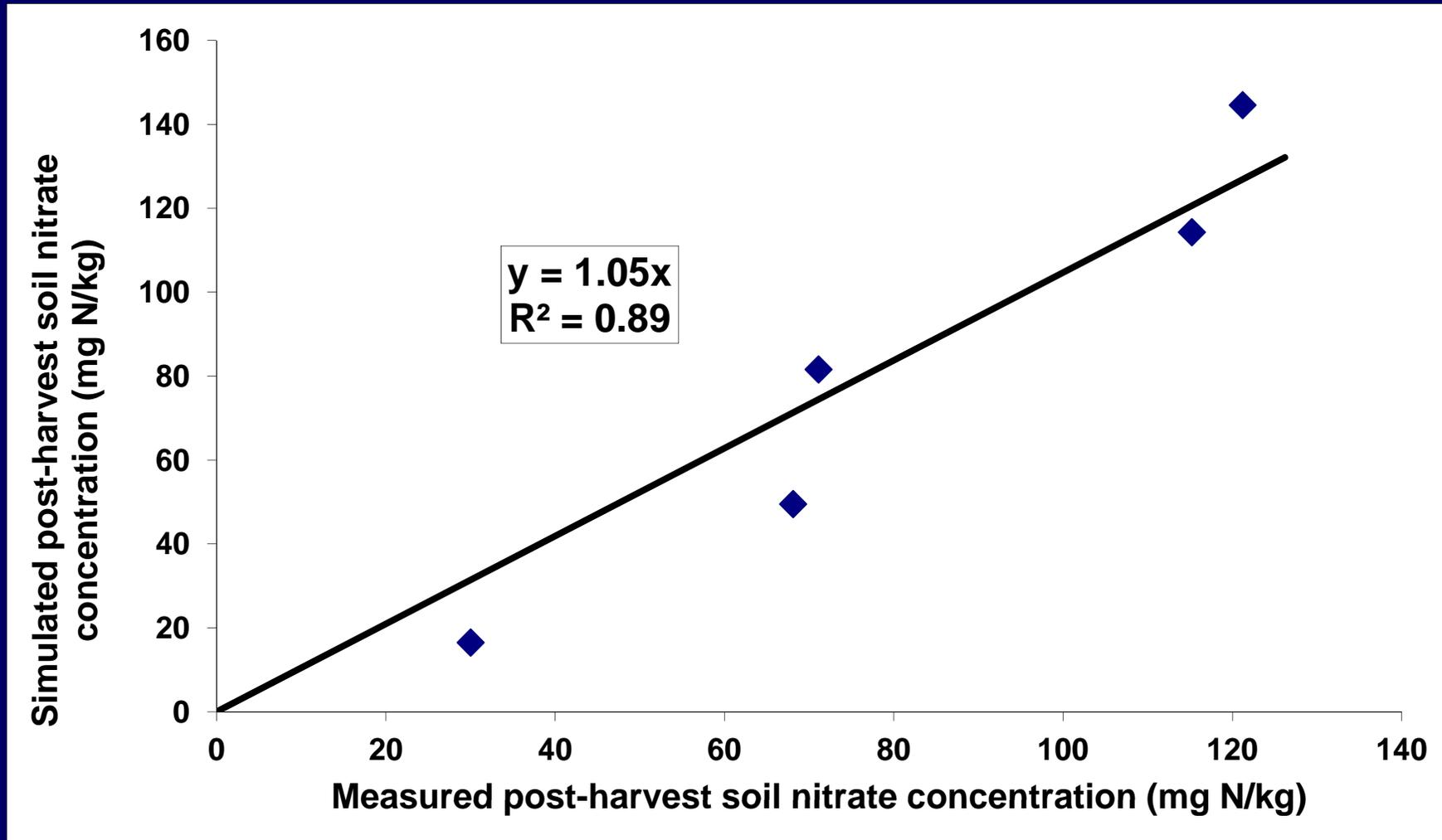
D'après Chesnaux et al., *Environmental Science & Technology*, 2007

Profils des concentrations en nitrate simulés dans le cas d'une zone vadose de 5 m d'épaisseur lorsque 100 kg-N/ha sont appliqués à la surface du sol le 15 avril



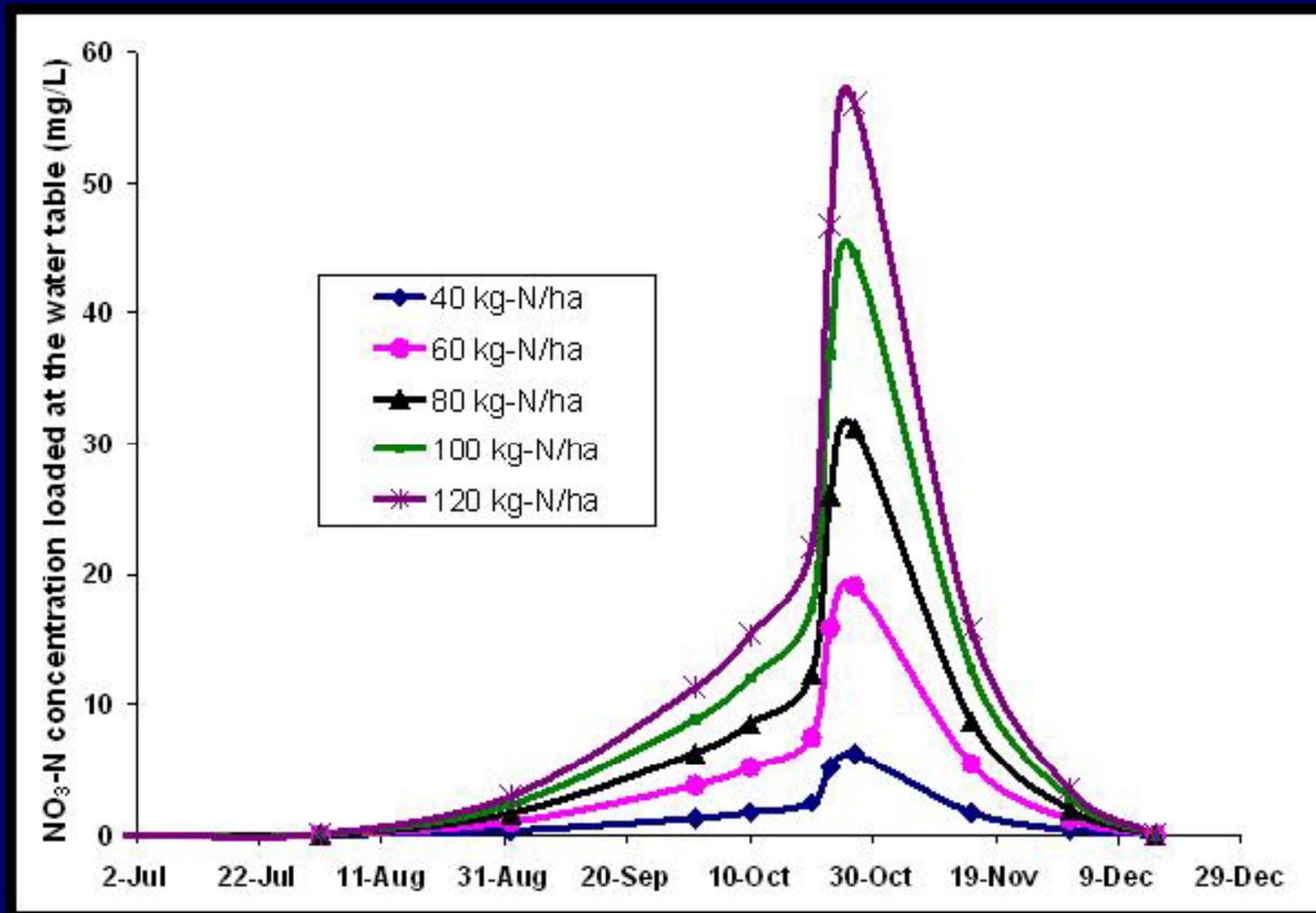
D'après Chesnaux et al., *Environmental Science & Technology*, 2007

Comparaison entre les concentrations résiduelles mesurées et simulées dans le sol après récolte pour des taux d'application de nitrates synthétiques de 40 kg-N/ha, 60 kg-N/ha, 80 kg-N/ha, 100 kg-N/ha, et 120 kg-N/ha



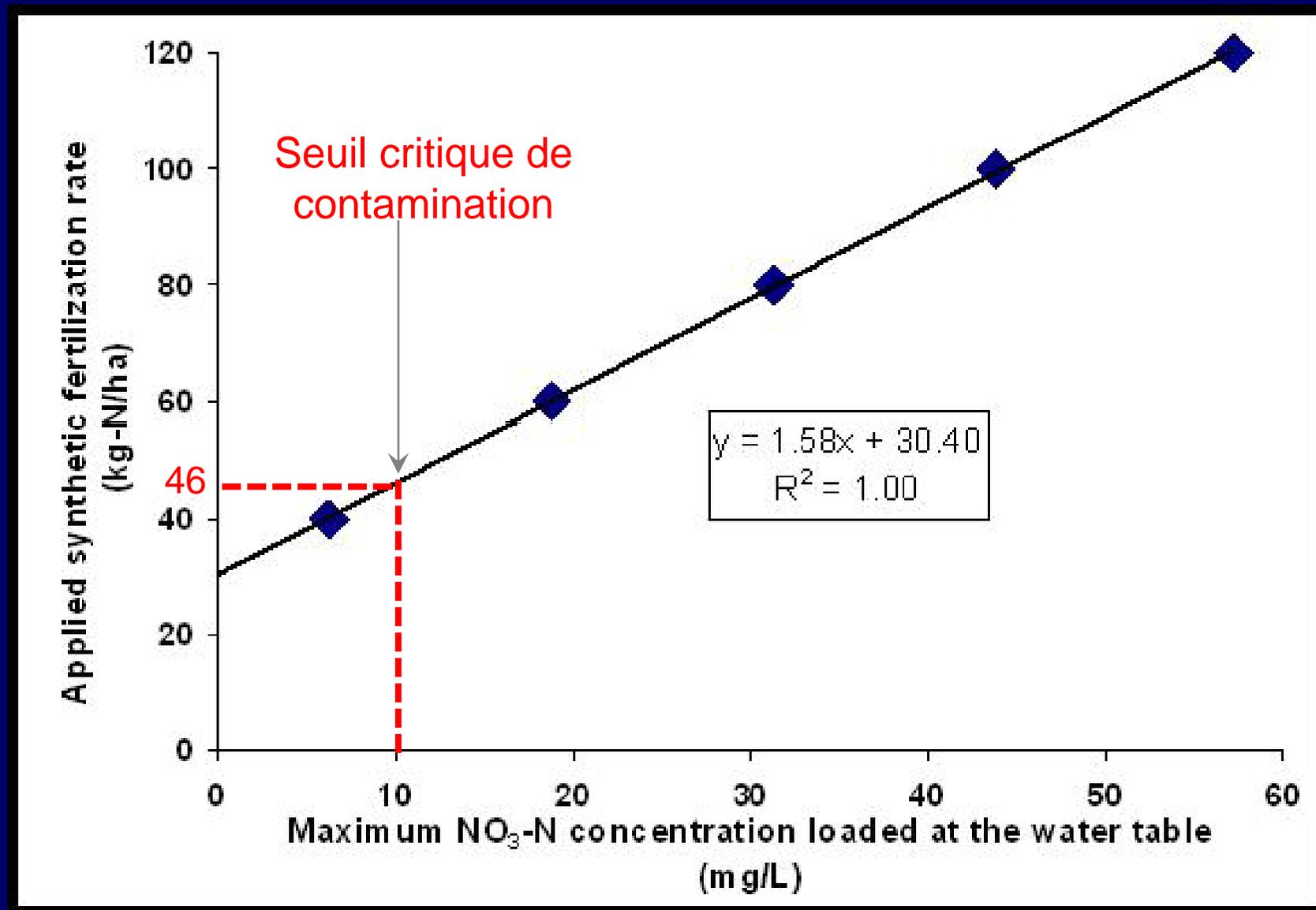
D'après Chesnaux et al., *Environmental Science & Technology*, 2007

# Concentrations en nitrates arrivant à la nappe en fonction du temps et des taux d'application



D'après Chesnaux et al., *Environmental Science & Technology*, 2007

# Relation simulée entre les taux d'application et les concentrations des nitrates synthétiques arrivant à la nappe

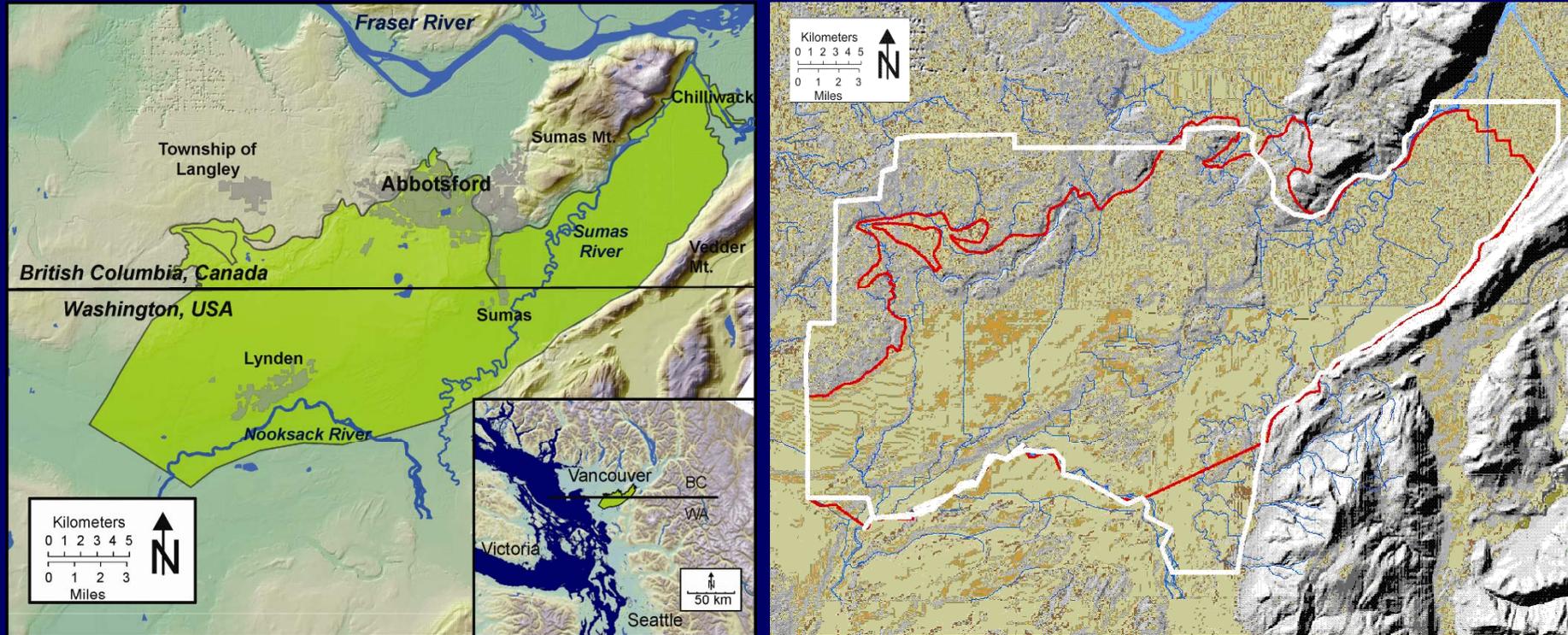


D'après Chesnaux et al., *Environmental Science & Technology*, 2007

# Etude numérique transport et traçage en zone saturée

- Modèle réalisé par Scibek et al. (2005) avec Help et Modflow
- Application des concentrations simulées à la nappe
- Variation de la concentration avec la profondeur sous le toit de la nappe
- Age de la contamination par rétro traçage (Modpath) et comparaison avec les déterminations isotopiques  $^3\text{H}/^3\text{He}$  de Wassenaar et al. (2006)
- Évaluation de l'efficacité des « BMPs »

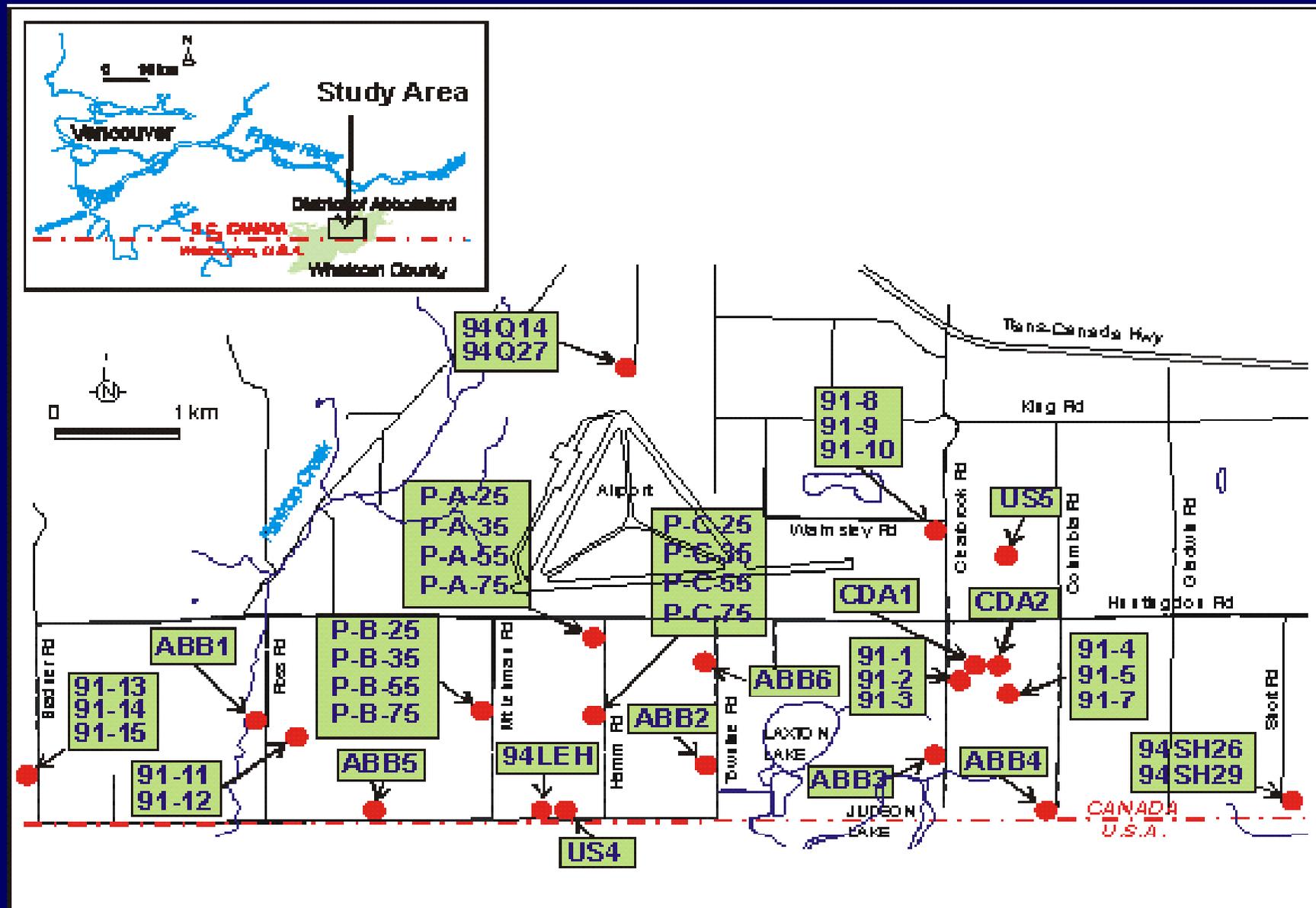
# Modèle numérique d'écoulement dans la zone saturée de l'aquifère



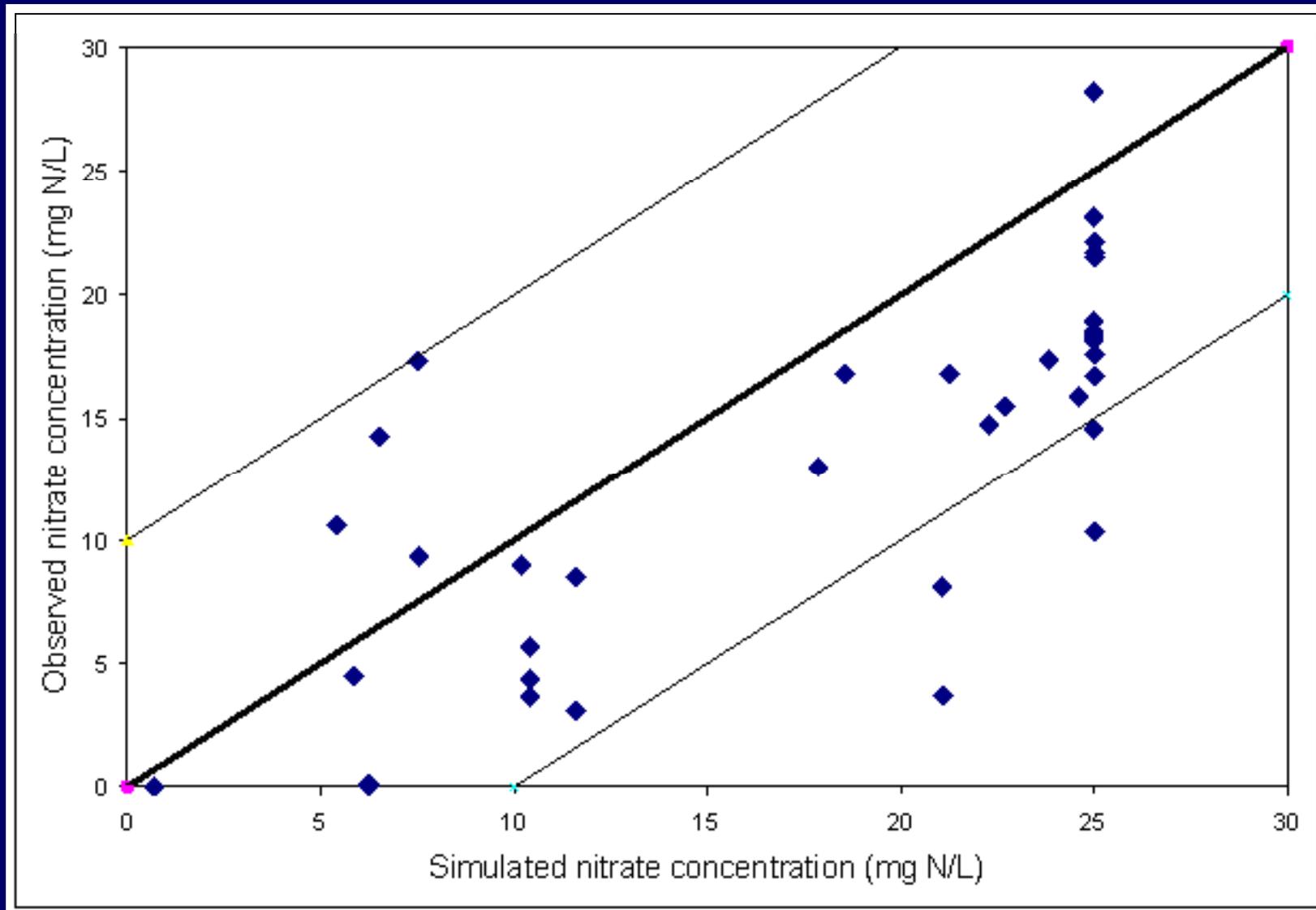
Parameter	Input value
Longitudinal Dispersivity <sup>1</sup>	100 m
Horizontal Dispersivity <sup>1</sup>	10 m
Vertical Dispersivity <sup>1</sup>	1 m
Diffusion Coefficient <sup>2</sup>	$1 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{day}$
Effective Porosity <sup>3</sup>	0.35

<sup>1</sup>Gelhar et al., 1992; <sup>2</sup>Freeze and Cherry, 1979; <sup>3</sup>Scibek and Allen, 2005

# Emplacement des puits d'observation de Environnement Canada

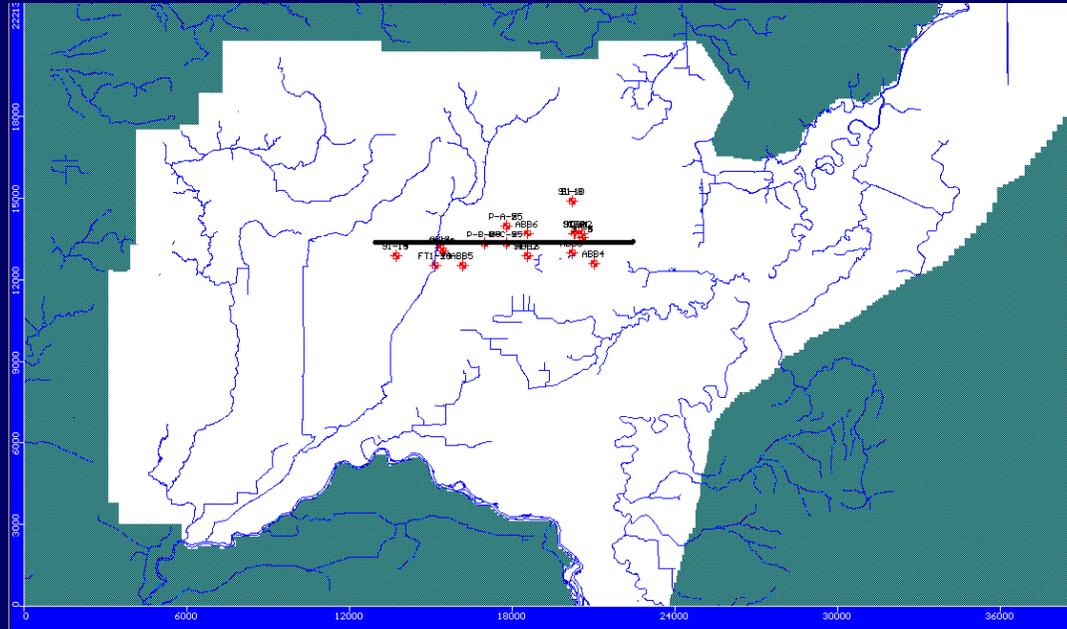


# Calage du modèle numérique de transport



Erreur moyenne quadratique de 5 mg N/L

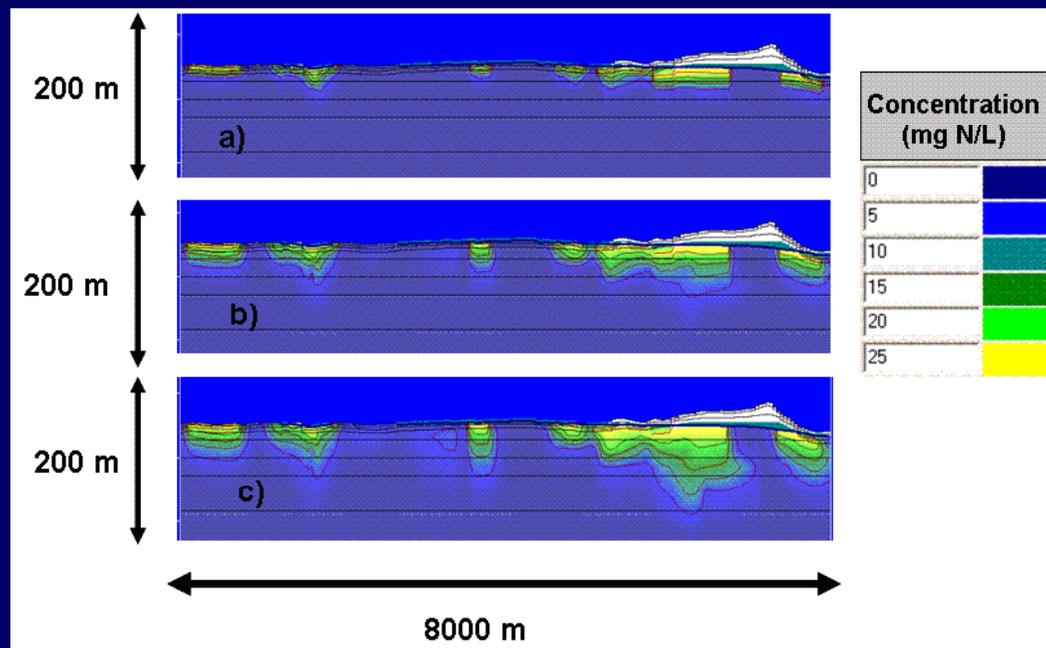
# Résultats : modèle numérique de transport



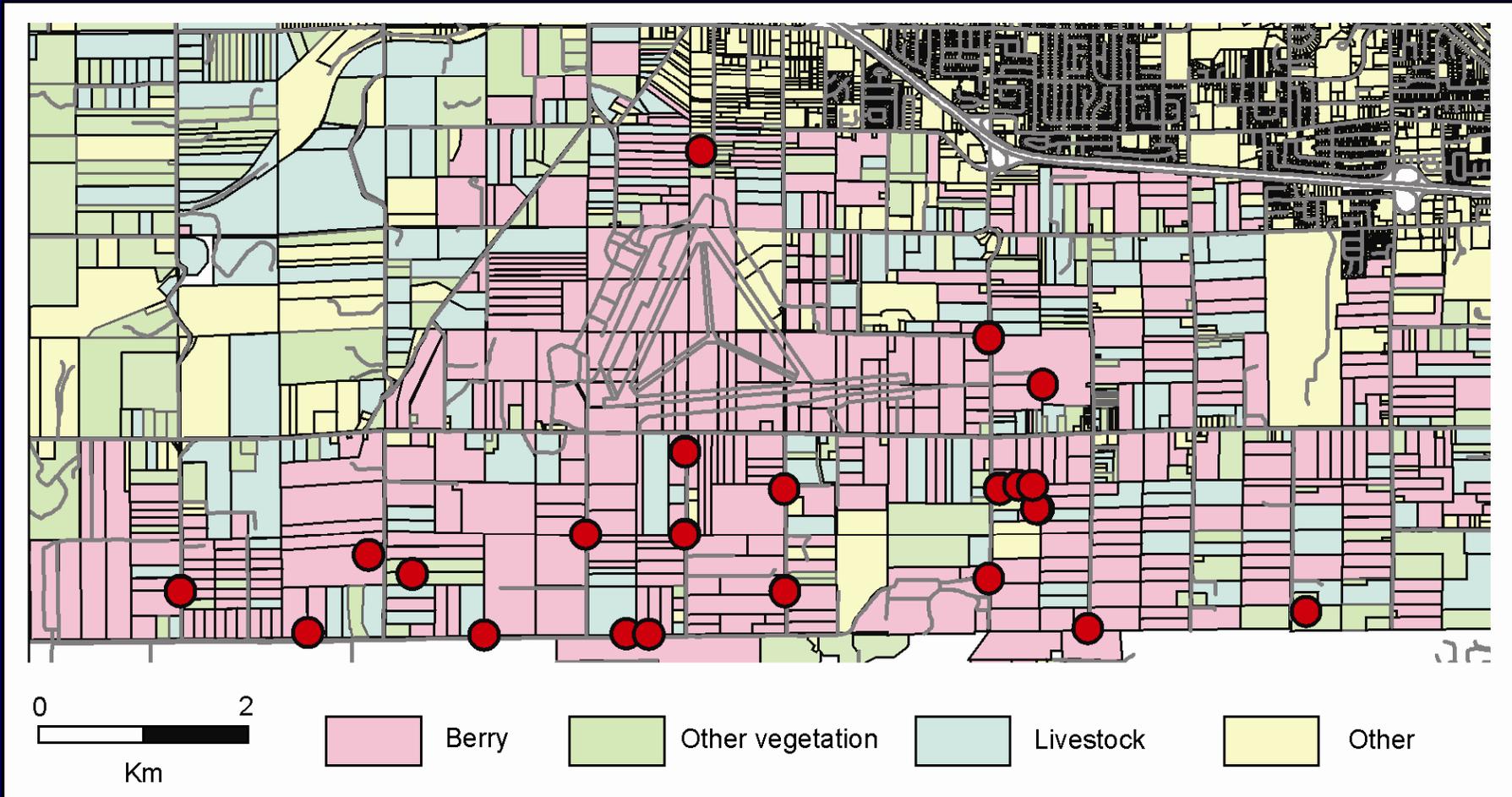
1 an

5 ans

12 ans



# Carte des pratiques agricoles dans la région d'Abbotsford et puits d'observation considérés dans l'étude de traçage



# Résultats : Comparaison des âges isotopiques avec les âges simulés numériquement par traçage

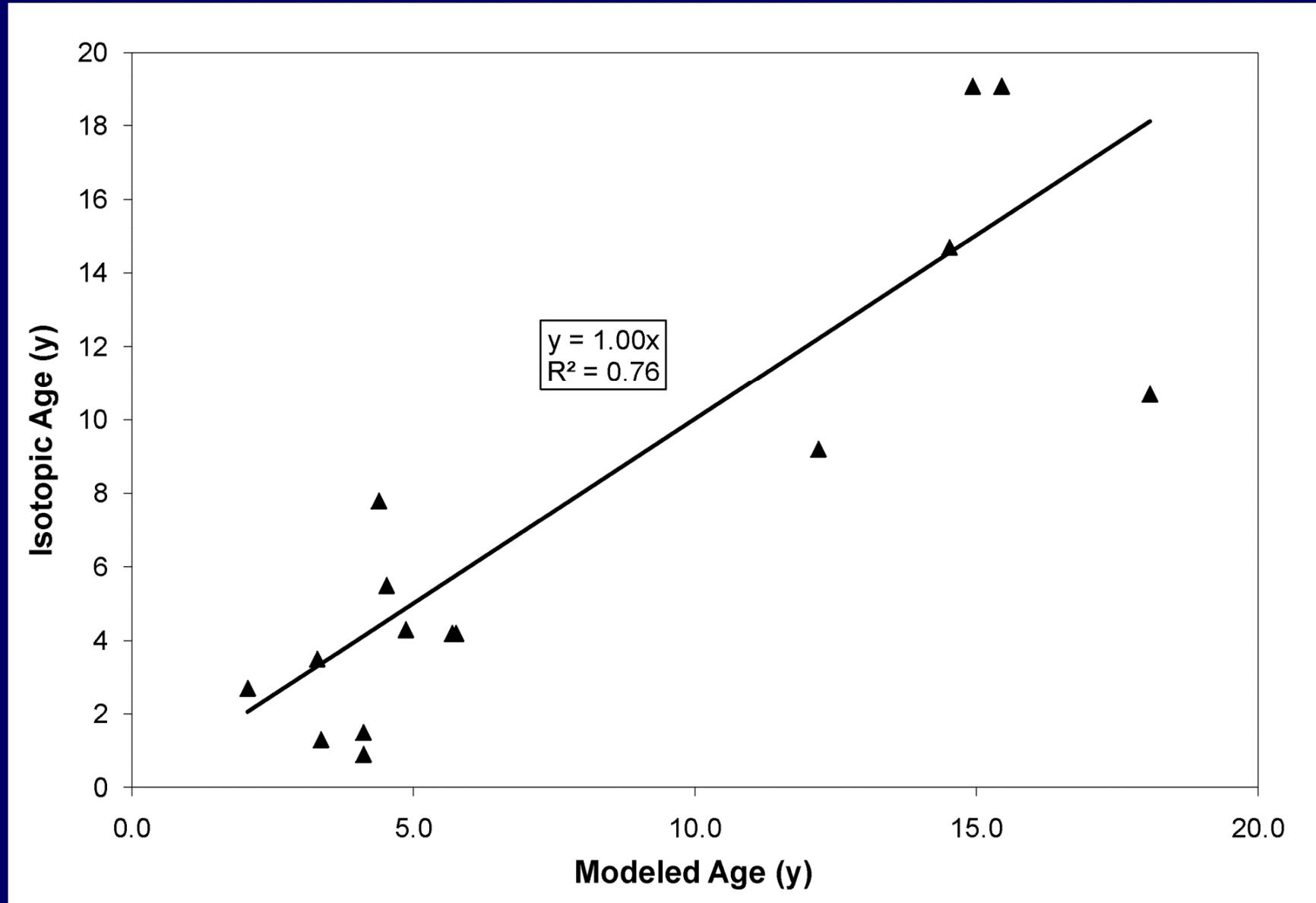
**Table 1** Ages of groundwater determined using  $^3\text{H}/^3\text{He}$  techniques (data from Wassenaar *et al.* 2006) and ages determined from particle tracking

Piezometer	Isotopic age (years)	Modelling age (years)	Piezometer	Isotopic age (years)	Modelling age (years)
ABB1	ND	6.7	91-1	14.7	14.5
ABB2	5.5	4.5	91-2	ND	5.6
ABB3	0.9	4.1	91-3	3.5	3.3
ABB4	ND	7.3	91-4	10.7	18.1
ABB5	4.3	4.9	91-5	7.8	4.4
ABB6	ND	4.6	91-7	2.7	2.1
BC-A-25	4.2	5.7	91-8	ND	15.2
BC-A-35	ND	6.5	91-9	ND	10.5
BC-A-75	19.1	15.4	91-10	ND	4.5
BC-B-20	1.3	3.4	91-13	ND	10.0
BC-B-35	ND	6.8	91-15	ND	5.0
BC-B-75	20.4	15.0	91-16	ND	8.5
BC-C-25	1.5	4.1	FT1-24	ND	49.2
BC-C-35	ND	6.5	94-SH-26	9.2	12.2
BC-C-75	32.9	13.5	94-SH-29	19.1	14.9
BC-2	ND	5.1	99-Q-14	4.2	5.8
BC-8	ND	<1.0	99-Q-20	19.1	10.1

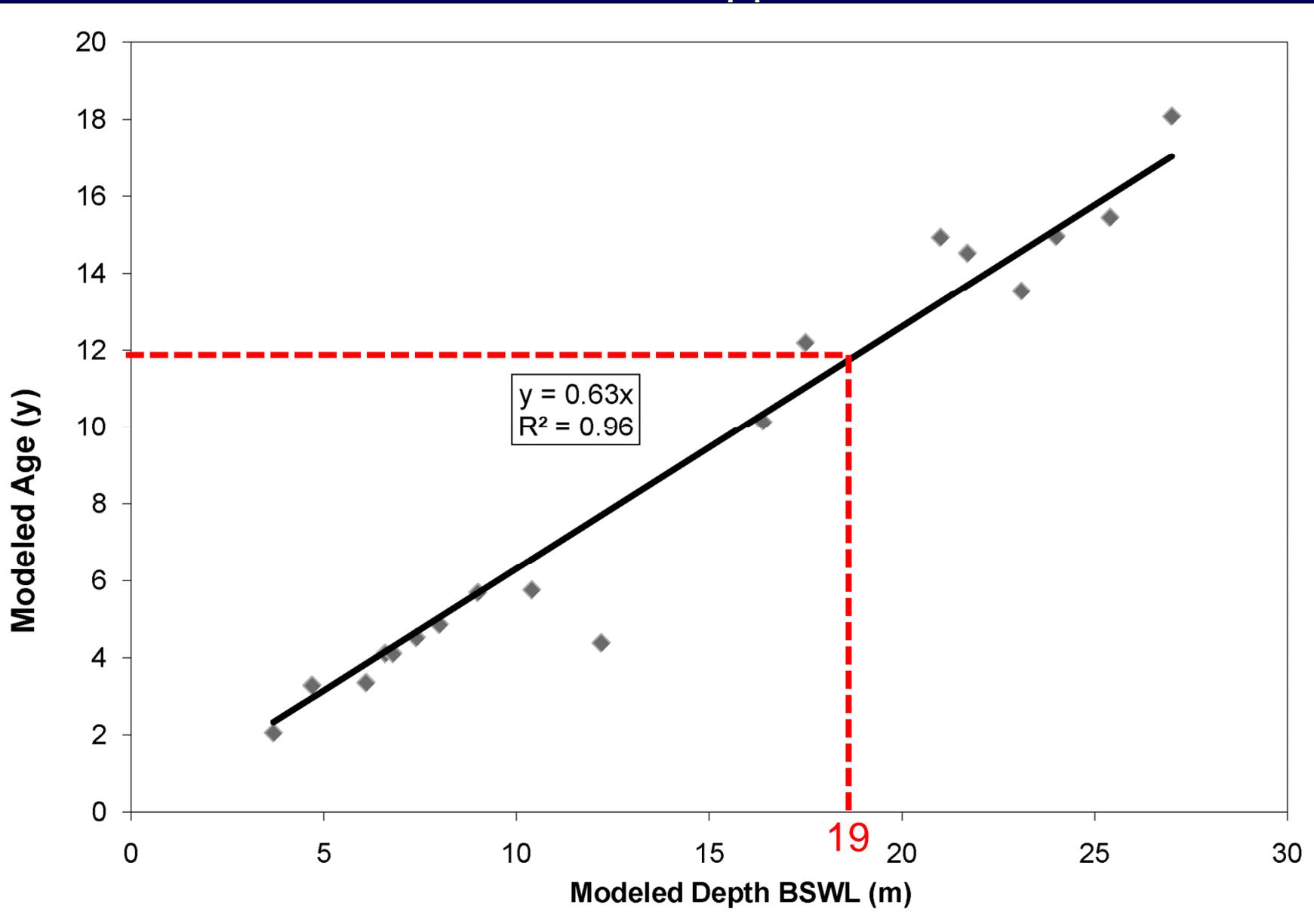
Values in grey shaded boxes are eliminated from graphs due to suspect results.

ND, non-determined.

# Résultats : Comparaison des âges isotopiques avec les âges simulés numériquement par traçage



# Ages simulés en fonction de la profondeur sous le niveau statique de la nappe



## Conclusion/Discussion

- La dynamique d'infiltration des nitrates dans l'aquifère de ABS dépend du type de fertilisation.
- Le virage des années 90 pour les « BMPs » peut expliquer l'échec observé car les fertilisants synthétiques se minéralisent plus vite et ont une tendance à s'infiltrer plus rapidement.
- Les fertilisants synthétiques sont maintenant la source courante de contamination des eaux souterraines par les nitrates dans l'aquifère de ABS.
- Le contrôle du timing et de la quantité d'application est requis pour minimiser l'impact : proposer des applications multiples réparties dans le temps.
- Le modèle présenté dans cette étude peut maintenant être utilisé pour évaluer l'impact de différents scénarios de fertilisation avec des nitrates synthétiques.