

J'ai le plaisir de vous inviter à ma Soutenance de thèse intitulée :

## **Fonctionnement biogéochimique du Fleuve Rouge (Nord Vietnam) : Bilans et modélisation**

La soutenance aura lieu le 7 Juillet à 14h, Salle des Conférences N2, Couloir 46/56, Tour 56, 2ème étage, 4 Place Jussieu, Paris 5ème

devant le jury composé de:

Mr. Venu ITTEKKOT, Professeur, CTME, Bremen, Allemagne (rapporteur)  
Mr. Quang Cu BUI, Professeur, VAST, HoChiMinh, Vietnam(rapporteur)  
Mr. Georges VACHAUD, Professeur, CNRS, Grenoble, France (rapporteur)  
Mr. Ghislain DE MARSILY, Professeur, Univ. Paris VI, Paris, France (Examineur)  
Mr. Wolfgang LUDWIG, Maître de Conférence, CEFREM, Perpignan, France (Examineur)

Mme. Josette GARNIER, Directrice de Recherche, CNRS-Univ. Paris VI, Paris, France  
Mr. Gilles BILLEN, Directeur de Recherche, CNRS- Univ. Paris VI, Paris, France  
Mr. Van Minh CHAU, Professeur VAST, Hanoi, Vietnam  
les Directeurs de thèse, en co-tutelle

Le Thi Phuong Quynh

### **Résumé**

Le Fleuve Rouge (au Nord Vietnam et en Chine méridionale) couvre une surface de bassin versant de 156 450 km<sup>2</sup>, avec une population de près de 30 millions d'habitants. L'axe principal du Fleuve Rouge (aussi appelé Yuan, Thao ou Hong) reçoit deux affluents principaux, le Da et le Lo, puis forme un large delta avant de se jeter dans le Golfe du Tonkin (en Mer de Chine méridionale). Les trois sous-bassins supérieurs et le delta diffèrent largement en terme de densité de population (de 101 hab.km<sup>-2</sup> dans les bassins amont à plus de 1000 hab.km<sup>-2</sup> dans le delta), d'usage du sol et de pratiques agricoles.

Le but général du présent travail est de développer une compréhension d'ensemble du **fonctionnement biogéochimique** de ce système sub-tropical de dimension régionale, et de son contrôle par les processus naturels et anthropiques. L'épine dorsale du travail a consisté dans l'implémentation du modèle **RIVERSTRAHLER**, développé antérieurement pour décrire le lien entre la qualité de l'eau et les activités humaines dans le bassin de la Seine et d'autres fleuves européens (Billen et al., 1994, 1997, 1999, 2005; Garnier et al., 1995, 1999, 2000, 2002), pour le cas particulier du système Fleuve Rouge.

La première étape dans cette étude a consisté dans la modélisation du **régime hydrologique et du transport solide du Fleuve Rouge** (Le Thi Phuong Quynh et al., subm). Les

estimations antérieures de la charge solide du Fleuve Rouge variaient entre 100 et 170  $10^6$  t.an<sup>-1</sup>, c-à-d de 640 à 1060 t.km<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup>. La forte dépendance du transport solide à l'hydrologie est responsable d'une large variabilité inter-annuelle. Sur la base de données hydrologiques relatives à la période 1997-2004, et d'un suivi journalier de la matière en suspension à l'exutoire des 3 principaux tributaires du Fleuve Rouge en 2003, un modèle simplifié a été établi pour estimer la charge solide moyenne interannuelle du Fleuve Rouge sous les conditions actuelles. La valeur obtenue est de 40  $10^6$  t.an<sup>-1</sup>, correspondant à une charge spécifique de 280 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>. Elle reflète une réduction de 70% de la charge solide totale suite à la mise en eau des réservoirs de Hoa Binh et de Thac Ba réservoirs dans les années 1980s. Le modèle prévoit une réduction supplémentaire de 20% de la charge en suspension suite à la construction planifiée de deux grands réservoirs supplémentaires. Utilisant les mesures de contenu en phosphore total dans la matière en suspension réalisées dans ce travail, le flux de phosphore exporté par le Fleuve Rouge peut être estimé à 36  $10^6$  kgP an<sup>-1</sup>.

Les données de concentrations en nutriments dans le réseau hydrographique du Fleuve Rouge étant assez rares, un **suivi de la concentration** des formes de l'azote, du phosphore, de la silice, du carbone organique et de la chlorophylle à l'exutoire des principaux sous-bassins amont, dans l'axe principal du Fleuve dans le delta et dans quelques rivières polluées de la région d'Hanoi, a été réalisé à une fréquence mensuelle durant les années 2003 et 2004, permettant de définir le niveau général de concentration en nutriments dans les eaux de surface.

En vue d'examiner le degré de perturbation anthropique du **cycle de l'azote et du phosphore** à l'échelle du bassin, des bilans de ces deux éléments ont été établis pour le système sol et pour l'hydrosystème des 4 principaux sous-ensembles (Da, Lo, Thao et Delta) du bassin du Fleuve Rouge (Le Thi Phuong Quynh et al., in press). En terme de production agricole, d'une part, de consommation de nourriture et de fourrage d'autre part, les sous-bassins amont apparaissent comme des systèmes autotrophes, exportant des produits agricoles, tandis que le delta dépend d'importations de biens agricoles. Le bilan des sols agricoles révèle de fortes pertes d'azote, principalement attribuables à la dénitrification dans les rizières, et de phosphore, principalement dues à l'érosion. Le bilan du réseau hydrographique montre une importante rétention/élimination d'azote (de 62 à 77 % dans les bassins amont et de 59 % dans le delta), et de phosphore, avec un taux de rétention de plus de 80 % dans le Da et le Lo, à l'aval desquels sont localisés les grands réservoirs (Hoa Binh sur le Da et Thac Ba sur le Lo). L'exportation spécifique estimée à l'exutoire du Fleuve Rouge est estimée à 855 kg.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> d'azote total et 325 kg.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> de phosphore total. L'azote plutôt que le phosphore semble être l'élément limitant principal de la croissance algale dans les zones côtières influencées par le Fleuve Rouge dans le Golfe du Tonkin.

Une **base de données sous SIG** a été assemblée à l'échelle du bassin du Fleuve Rouge, avec des couches d'informations renseignant la géomorphologie du bassin, sa lithologie, la météorologie, l'usage du sol et les pratiques agricoles, la population et les rejets d'eau usées domestiques et industrielles. Cette base de données est conforme au format requis par le logiciel SENEQUE/Riverstrahler (Ruelland et al, 2004), une version du modèle Riverstrahler encapsulée dans une interface SIG constituant un outil de modélisation générique et spatialement explicite de la qualité de l'eau à l'échelle des grands réseaux hydrographiques. La première **application** de ce logiciel au **système Fleuve Rouge** est décrite et validée sur la base des données acquises lors des suivis mensuels de qualité d'eau à l'exutoire des grands sous-bassins et sur l'axe principal du Fleuve lors des années 2003 et 2004.

Enfin, le modèle a été utilisé pour explorer l'effet, en terme de qualité de l'eau et de fonctionnement biogéochimique de divers scénarios décrivant de possibles changements futurs du bassin du Fleuve Rouge concernant son aménagement hydraulique, l'usage de ses sols et son agriculture, sa population et sa gestion des eaux usées.

**Mots clés:** Rivière Tropicale, Fleuve Rouge, Vietnam, modèle Riverstrahler/Sénéque, nutriments, cycle de l'azote, du phosphore, de la silice, charge solide.

## Summary

The **Red River** (in North Vietnam and South China) covers a watershed area of 156 450 km<sup>2</sup> with a total population near 30 million inhabitants. The main branch of the Red River (also called Yuan, Thao or Hong River) receives two major tributaries, the Da and Lo Rivers, then forms a large delta before discharging into the Tonkin Bay (South China Sea). The 3 upstream sub-basins and the Delta area differ widely in population density (from 101 inhab km<sup>-2</sup> in the upstream basins to more than 1000 inhab km<sup>-2</sup> in the delta), land use and agricultural practices.

The general goal of this work is to develop a comprehensive understanding of the **biogeochemical functioning** of this sub-tropical regional system, and its control by natural and anthropogenic processes. The backbone of the work consisted in implementing the **RIVERSTRAHLER Model**, previously developed for describing the link between water quality and human activities in the watershed in the Seine river and other European river systems (Billen et al., 1994, 1997, 1999, 2005 ; Garnier et al, 1995, 1999,2000, 2002) to the special case of the Red River system.

The first step of the study consisted in modeling the **hydrological regime** and the **suspended solid transport** of the Red River (Le Thi Phuong Quynh et al., *subm*). Previous estimates of its suspended matter loading range from 100 to 170 10<sup>6</sup> t.yr<sup>-1</sup>, i.e. from 640 to 1060 t.km<sup>-2</sup>.yr<sup>-1</sup>. The strong dependence of suspended solid transport on hydrology results in a large year-to-year variability. Based on available data on the hydrology over the period 1997-2004, and on one -year survey of the daily suspended matter of the three main tributaries of the Red River system in 2003, a simplified modeling approach is established to estimate the mean suspended loading of the Red River under present conditions. The obtained value is 40 10<sup>6</sup> t.yr<sup>-1</sup>, corresponding to a specific load of 280 t.km<sup>-2</sup>.yr<sup>-1</sup>. It reflects a 70% decrease of the total suspended load since the impoundment of the Hoa Binh and Thac Ba reservoirs in the 1980'ies. The model predicts a further reduction by 20% of the suspended loading of the Red River with the planned construction of two additional reservoirs. Using measurements of the total phosphorus content of the suspended material in the different Red River tributaries, we could estimate the present phosphorus delivery by the Red River as 36 10<sup>6</sup> kgP yr<sup>-1</sup>.

As data on nutrient concentration in the Red River drainage network are rather scarce, a **survey of nutrient concentration** (N,P,Si, organic carbon and chlorophyll a) at the outlet of the three main sub-basins, the main branch in the delta and some polluted rivers in the Hanoi region was carried on at monthly intervals in 2003 and 2004, allowing to define the general levels of nutrient concentrations in surface water.

In order to examine the degree of human-induced alteration of the **nitrogen and phosphorus** cycles at the scale of the watershed, **budgets** of these elements were established for the soil and the drainage network of the 4 main sub-basins (Da, Lo, Thao and Delta) of the Red River (Le Thi Phuong Quynh et al., in press). In terms of agricultural production, on the one hand, and consumption of food and feed on the other, the upstream sub-basins are autotrophic systems, exporting agricultural goods, while the delta is a heterotrophic system, depending on agricultural goods imports. The budget of the agricultural soils reveals great losses of nitrogen, mostly attributable to denitrification in rice paddy fields and of phosphorus, mostly caused by erosion. The budget of the drainage network shows high retention/elimination of nitrogen (from 62 to 77 % in the upstream basins and 59 % in the delta), and of phosphorus, with retention rates as high as 80 % in the Da and Lo sub-basins which have large reservoirs in their downstream course (Hoa Binh on the Da and Thac Ba on the Lo). The total specific delivery estimated at the outlet of the whole Red River System is  $855 \text{ kg.km}^{-2}.\text{y}^{-1}$  total N and  $325 \text{ kg.km}^{-2}.\text{yr}^{-1}$  total P. Nitrogen rather than phosphorus seems to be the potential limiting factor of algal growth in the plume of the Red River in Tonkin Bay.

A **GIS data base** has been assembled at the scale of the whole Red River basin, with layers documenting geomorphology, lithology, meteorology, land-use and agriculture, population, domestic and industrial wastewater release, etc. This data base follows the format required for running the SENEQUE/Riverstrahler software (Ruelland et al, 2004), a version of the Riverstrahler model encapsulated into a GIS interface in order to build a generic and spatially explicit water quality modelling tool. The first **application of this model to the Red River system** is described and validated with the data acquired by the monthly surveys of water quality at the outlet of the 3 sub-basins and in the main branch of the Red River during the years 2003 and 2004.

Finally, the model is used to explore the effect in terms of water quality and biogeochemical functioning of a variety of **scenarios** describing possible **future changes** in the Red River basin concerning hydrological management, land use and agricultural practices, population increase and wastewater treatment policy.

**Key words:** tropical river, Red River, Vietnam, Riverstrahler/Seneque model, nutrient budgets, nitrogen, phosphorus, silica cycle, suspended solids.