

## ESTIMATION DU CHAMP DE CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES PAR APPROCHE MULTI-ÉCHELLE SUR UN SECTEUR DE LA NAPPE D'ALSACE DANS LE NORD-EST DE LA FRANCE

**F. Williams KOUASSI<sup>1</sup>, K. Auguste KOUASSI<sup>1\*</sup>, B.T. Albert GOULA<sup>1</sup>,  
et Philippe ACKERER<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Laboratoire Géosciences et Environnement, Université d'Abobo-Adjamé,  
02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire*

<sup>2</sup>*Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg (LHYGES) 1, rue  
Blessig, 67084 STRASBOURG Cédex, France.*

(Reçu le 28 Février 2010, accepté le 27 Août 2010)

---

\* Correspondance et tirés à part, e-mail : [kouameauguste@yahoo.fr](mailto:kouameauguste@yahoo.fr)

### RÉSUMÉ

Une meilleure compréhension du fonctionnement hydrodynamique d'une partie de la nappe d'Alsace est proposée à travers des modèles hydrogéologiques à partir de la méthode de paramétrisation multi-échelle. L'utilisation d'un ensemble de maillages de paramétrisation, caractérisé chacun par une structure, et une dimension graduellement croissante, permet d'identifier plusieurs jeux de paramètres, solutions du problème inverse. Ainsi les structures qui donnent des champs de conductivités hydrauliques apparemment acceptables sont proches les unes des autres et leur dimension de paramétrisation faible dans l'ensemble varie entre 60 et 100 noeuds. Les informations a priori sur les paramètres recherchés, qui orientent les choix des différentes structures possibles, sont par la suite utilisées pour évaluer chaque jeu de paramètres. On parvient ainsi à déterminer un modèle de paramétrisation de dimension optimale ayant une structure proche de la structure du système réel. Bien que limitée par l'insuffisance des valeurs a priori sur le secteur d'étude, la méthode a permis d'identifier des champs de conductivités hydrauliques et la structure de l'aquifère (maillage N° 814 à 80 noeuds). Le succès de la méthode est fortement lié à la quantité, la qualité et la distribution spatiale des informations a priori sur les paramètres recherchés.

**Mots-clés :** *Problème inverse, Conductivité hydraulique, approche multi-échelle, Paramétrisation du modèle, Dimension du modèle, Structure du modèle, Information à priori, Identification des paramètres, Maillage de paramétrisation.*

**ABSTRAT****Estimating hydraulic conductivity field using downscaling scheme on a part of Alsace aquifer northeastern France**

A better understanding of the hydrodynamic of a part of Alsace aquifer is proposed through hydrogeological models based on the method of multi-scale parameterization. This method rests on the generation of an ensemble of solutions to the inverse problem by using an ensemble of different parameterization models, each characterized by a structure, and an increasing dimension. And structures that give apparently acceptable hydraulics conductivities fields are near to each other and their dimensions generally low vary between 60 and 100 nodes. The prior information, generally provided by field pumping tests, is at first used to guide the selection of the various structures to be tested. The prior information is later used again to discriminate among the solutions resulting from the different calibrations related to each parameterization scheme. Thus, a model structure close to the aquifer actual structure is determined and the model parameters along with. Although limited by the lack of the parameters values and the priori information of the study area, the method permit us to identify some hydraulics conductivities fields and structure of the aquifer (mesh No. 814 at 80 nodes). The success of the method is strongly linked to the quantity, quality and spatial distribution of priori information on the parameters sought.

**Keywords :** *Inverse problem, Hydraulic conductivity, Downscaling scheme, Parameterization model, Model dimension, Model structure, Priori information, parameters identified, Parameterization mesh.*

**I – INTRODUCTION**

L'eau est une ressource fondamentale de notre environnement qui conditionne la vie sur terre. Bien que la terre soit recouverte d'eau à près de 72 %, l'homme ne peut compter que sur environ 0,65 % de la masse d'eau totale pour survivre. Ce qui est apparemment faible par rapport à l'immensité des masses d'eau qui nous entourent. Cependant, pour les 6 milliards d'hommes que compte la planète aujourd'hui, ce chiffre représente en moyenne 53 m<sup>3</sup> d'eau par tête d'habitant [1]. Et pourtant, des milliers de gens meurent chaque année par manque d'un système adéquat d'approvisionnement en eau potable. Ce n'est ni la quantité des ressources, ni l'importance de la population qui est en cause, mais la mauvaise distribution des ressources dans le temps et dans l'espace. La nappe alluviale rhénane

(nappe d'Alsace) n'échappe pas non plus à cette réalité naturelle. En effet, la nappe d'Alsace possède une ressource abondante en eau mais inégalement répartie [2]. Cette nappe transfrontalière (Suisse, France et Allemagne) localisée dans une zone densément peuplée et fortement exploitée sur le plan socio-économique lui confère une importance stratégique aux niveaux régional et international. Elle fournit en effet plus des trois quarts des besoins en eau potable des habitants de la région, la quasi-totalité des besoins en eau d'irrigation et plus de la moitié des besoins en eau pour les industries. En raison de la composition des matériaux aquifères qui la contiennent (matériaux alluvionnaires - sables et graviers dominants) [3], la nappe alluviale rhénane présente une productivité importante qui facilite son exploitation. En revanche, la faible profondeur et les composantes de son « toit » la rendent particulièrement vulnérable aux pollutions de surface et minières (gisement potassique alsacien), notamment lorsque les formations superficielles plus limoneuses ou argileuses sont peu présentes ou absentes [4]. Cette vulnérabilité est accentuée par les fortes relations qui existent entre la nappe et les cours d'eau.

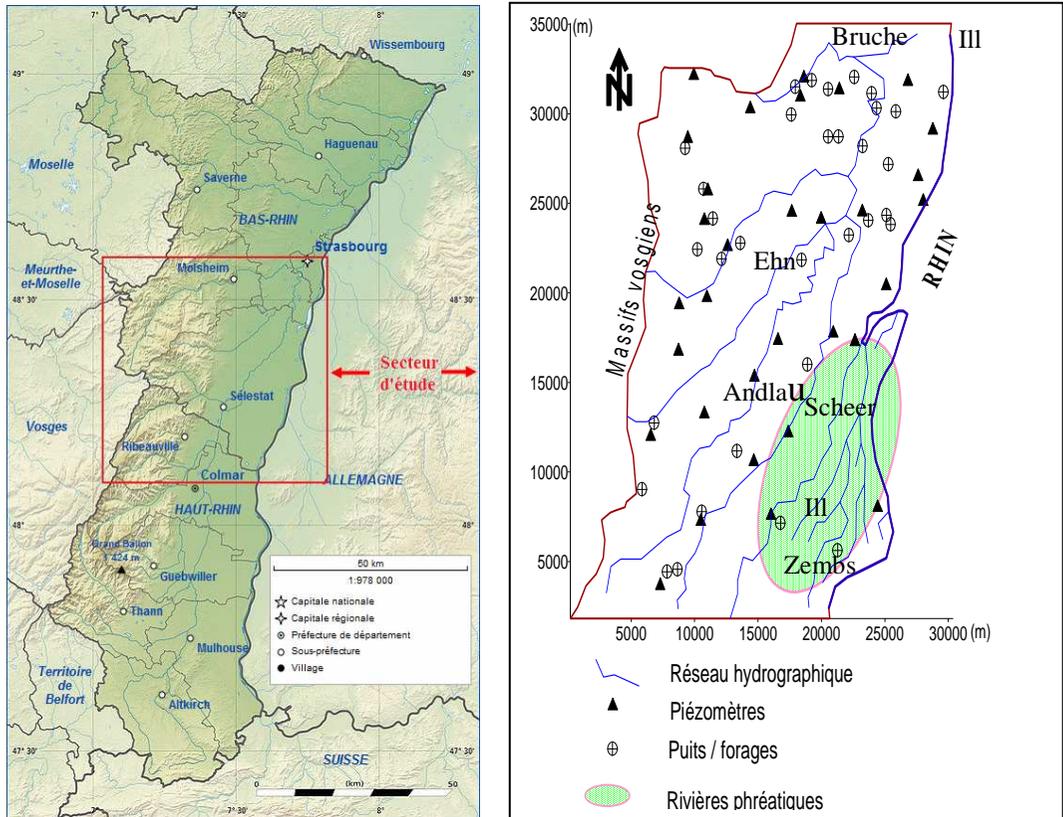
Ainsi la préservation et la gestion de cette importante nappe nécessitent une approche transnationale et passent inévitablement par une meilleure connaissance des processus physiques en jeu dans le milieu naturel. Le modèle hydrogéologique semble aujourd'hui l'outil le mieux adapté à cette approche. La présente étude a donc pour objectif de retrouver le champ de conductivités hydrauliques connu. Le but est d'arriver à choisir un modèle de paramétrisation (une structure et une dimension), qui permette d'obtenir le champ de conductivités le plus proche du champ réel.

## II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

### II-1. Présentation de la zone d'étude

Le domaine d'étude est une partie de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace d'environ 875 Km<sup>2</sup> limitée au Nord par l'agglomération de Strasbourg tandis que la limite Sud passe à une vingtaine de kilomètres au Nord de la ville de Colmar (*Figure 1a*). Le domaine est limité à l'Est par le Rhin et à l'Ouest par les massifs vosgiens (*Figure 1b*). Les nombreux cours d'eau dont l'Ill et le Rhin qui forment le réseau hydrographique sont le siège d'échanges intenses avec la nappe, qu'ils drainent ou infiltrent selon les saisons et les régions traversées. Les précipitations moyennes sont estimées à 600 mm par an dont une partie (10 %) sert à recharger la nappe quand les conditions climatiques le permettent. Les 40 ouvrages de captage répertoriés

sur le site comprennent à la fois des puits et des forages dont l'emplacement ainsi que celui des piézomètres est indiqué à la (**Figure 1b**).



(a) : Situation géographique

(b) : Réseau hydrographique, piézomètres et Puits

**Figure 1** : Situation géographique de l'aquifère du fossé rhénan et du domaine d'étude, localisation des piézomètres, des puits et du réseau hydrographique.

## II-2. Méthodologie

La détermination du champ de conductivités hydraulique connu nécessite, la recherche de la structure et de la dimension la plus proche du milieu naturel. Afin d'atteindre cet objectif, cette étude a utilisée la méthode de paramétrisation multi-échelle non automatique. La méthode de paramétrisation multi-échelle consiste à représenter la structure du milieu par des structures de plus en plus élaborées, au cours de l'identification des paramètres du modèle. Cette approche se traduit par une augmentation de la

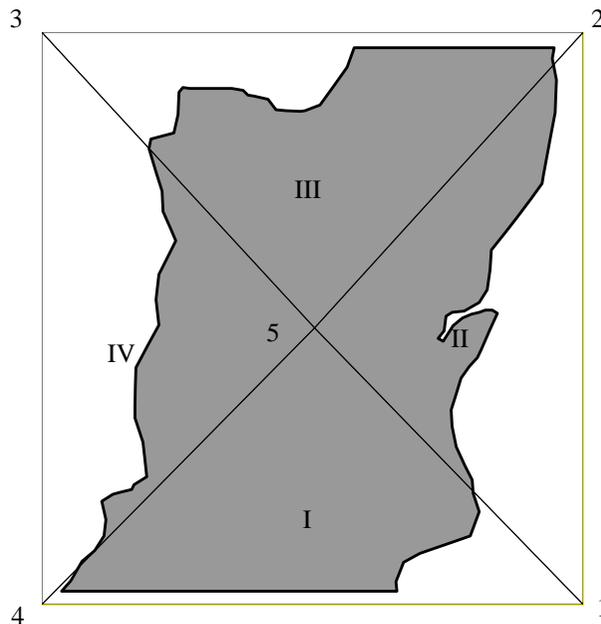
dimension du modèle de paramétrisation, par affinement du maillage, d'une étape à la suivante.

La paramétrisation multi-échelle comporte trois principales fonctions : la discrétisation spatiale du domaine d'étude, détermination de la dimension et de la structure de paramétrisation.

### ***II-2-1. Discrétisation spatiale de la zone d'étude***

La méthode de paramétrisation multi-échelle est construite, dans le cas présent, autour de cinq points de base, dont l'agencement forme un maillage de type éléments finis avec des mailles triangulaires.

La paramétrisation multi-échelle non automatique de même que la paramétrisation multi-échelle automatique démarrent, généralement par le même maillage de grande dimension, composé de quatre éléments et cinq points de base, couvrant tout le domaine de calcul (**Figure 2**) [5,6].



**Figure 2 :** Principe de l'interpolation de la paramétrisation multi-échelle

*1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 : nœuds*

*I ; II ; III ; IV : mailles*

### ***II-2-2. Dimension de la paramétrisation***

La paramétrisation était perçue à l'origine, comme une simple technique de réduction du nombre de paramètres à identifier. La recherche de la dimension optimale de la paramétrisation améliore la technique en se basant sur les valeurs locales de paramètres et les résidus du calage pour restreindre

l'ensemble des solutions [7]. La détermination de la dimension de la paramétrisation a pour objectif de simuler le comportement d'un aquifère de sorte que le domaine ne soit pas sous-paramétré, ni surparamétré. Cela voudrait dire que lors du calage, le modèle ne peut être représenté par moins de paramètres, ni plus de paramètres qu'il ne le faut pour reproduire les mesures observées. La dimension optimale de la paramétrisation est donc conditionnée par la quantité, la qualité et la distribution spatiale des mesures disponibles. Elle traduit l'incapacité du modèle à identifier un trop grand nombre de paramètres avec le peu d'observations disponibles sur l'état du système.

### ***II-2-3. Structure de la paramétrisation***

La paramétrisation est une opération certes délicate, mais nécessaire pour garantir une fiabilité aux modèles qui seront davantage sollicités dans le futur. Selon la méthode utilisée, la structure de la paramétrisation concerne le choix des zones ou le choix des nœuds de paramétrisation ainsi que leur géométrie les uns par rapport aux autres. Il est établi que la fiabilité des paramètres identifiés dans un modèle est fortement dépendante de la structure qui sert de base à cette identification. La détermination de la structure et de la dimension de la paramétrisation doivent être les deux supports inséparables de l'identification des paramètres des modèles inverses. L'identification de la structure du modèle se fait à partir des informations a priori qui comprennent des données de la géologie, de la géophysique et de l'hydrogéologie. L'utilisation des informations a priori doit donc se développer pour donner du poids à la géologie du milieu physique. Lors de l'élaboration du modèle, les erreurs de structure de modèle dominent toutes les autres erreurs qui peuvent affecter la construction du modèle. Une attention particulière s'impose donc à la détermination de la structure du modèle car les erreurs dans sa détermination entraînent des erreurs sur les paramètres du modèle et peuvent affecter considérablement l'aptitude du modèle à la gestion appropriée des ressources en eau [8]. Il n'existe cependant pas de méthodes formelles pour identifier la structure du modèle. On utilise en pratique une série de structures différentes pour générer un ensemble de solutions parmi lesquelles on retient quelques unes en fonction des objectifs fixés.

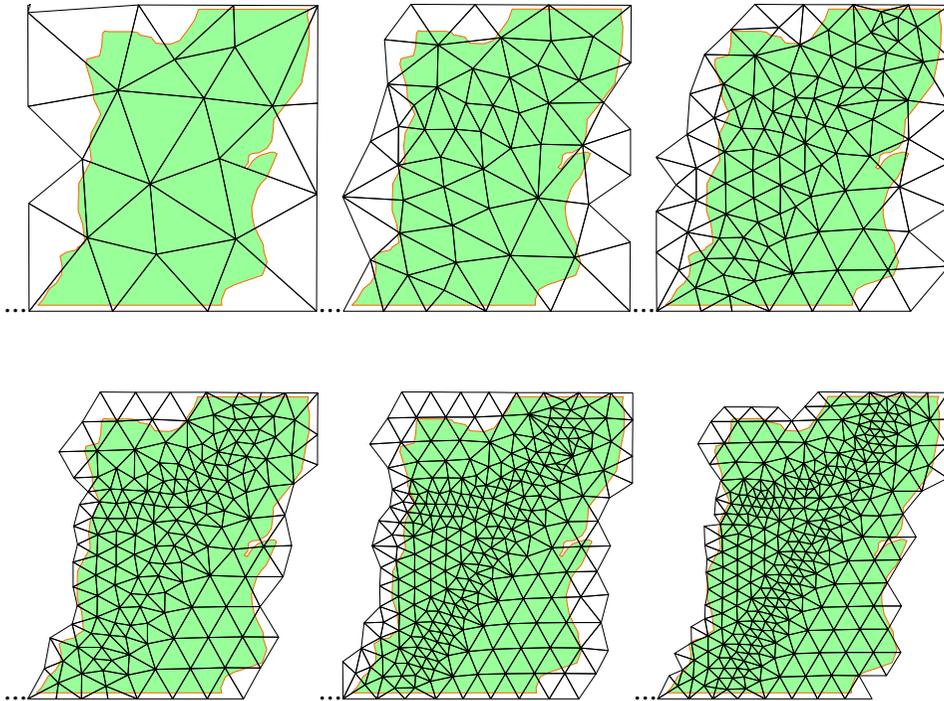
### ***II-2-4. Procédure multi-échelle non automatique***

La méthode que nous proposons est toujours basée sur la paramétrisation suivant les éléments finis. C'est une variante de la méthode multi-échelle automatique dans laquelle, les étapes successives ne se déduisent pas par découpage automatique en quatre, des mailles précédentes. La méthode vise ainsi, à déterminer, de façon optimale, la dimension et la structure du modèle

de paramétrisation à utiliser pour l'identification des paramètres. L'avantage de la méthode non-automatique est de pouvoir donner au modèle, la structure de notre choix, en décidant du nombre d'éléments du maillage de paramétrisation. Celui-ci se construit à partir des informations disponibles sur la structure du milieu physique que le modèle doit décrire. A titre d'exemple, on peut imposer lors du maillage, d'affiner les zones reconnues hétérogènes à partir des mesures de paramètres disponibles, ou encore des zones de transition entre des domaines relativement homogènes mais différents les uns des autres. La description détaillée des zones n'est cependant possible que si les observations sont suffisantes pour identifier les paramètres. C'est la quantité et la qualité des observations qui déterminent la dimension de la paramétrisation. En effet, il faut éviter de détailler la description du milieu s'il n'existe pas de mesures pour la vérification.

Le principe est donc de définir des structures pour réaliser les maillages de paramétrisation. Sur chaque structure, un ensemble de maillages de paramétrisation est généré en augmentant graduellement le nombre de noeuds (points de base). La figure 3 montre quelques maillages de paramétrisation appartenant à la même structure de base mais, ayant des dimensions différentes. Pour un type de structure, la dimension optimale va apparaître quand on aura utilisé tous les maillages de la structure pour effectuer les calages successifs. A cet effet, nous utilisons les informations a priori sur les paramètres à identifier pour définir la qualité de chacun des jeux de paramètres issus des différents maillages. Nous pouvons ainsi tester plusieurs structures probables pour chercher les solutions du problème. Une fois ces spécifications fournies, on génère la série de maillages en agissant uniquement sur la taille des mailles.

La procédure d'identification commence par la même maille à quatre éléments comme dans la procédure automatique, dans le but tout simple de pouvoir affecter des valeurs aux noeuds des maillages successifs, à partir de ce maillage de départ. Etant une variante de la procédure automatique, le code d'estimation a été modifié entre le premier maillage et les maillages suivants. La modification consiste à utiliser la série de maillages que nous avons générée, au lieu de procéder au découpage automatique des mailles. On opère ainsi pour tous les maillages, en fixant un critère d'arrêt très bas pour ne pas contraindre la procédure et toutes les valeurs aux noeuds du maillage sont calées.



**Figure 3 :** *Progression de la dimension des maillages de paramétrisation d'une même structure.*

### ***II-2-5. Principe de la méthode de paramétrisation multi-échelle optimale***

L'étude de la qualité des maillages de paramétrisation se fait à partir de la méthode multi-échelle non automatique. Une des tâches les plus délicates est de proposer une structure au départ, à partir de la distribution des informations a priori sur les paramètres et de toutes autres données susceptibles de renseigner sur la structure de la région étudiée. Par la suite, en faisant varier la dimension de la paramétrisation, on est censé passer par une structure qui sera la plus proche de la structure vraie sur la base des mesures disponibles. La valeur de la fonction objectif étant le seul critère de sélection, tous les maillages de paramétrisation qui ont donné des résultats satisfaisants sur la valeur de la fonction objectif peuvent être retenus comme approximations possibles de la structure du milieu étudié. On aurait alors une multitude de solutions pour un problème qui en réalité n'en a qu'une puisque la structure réelle est unique. Pour limiter les effets de l'inévitable non-unicité de la solution du problème inverse, il est donc indispensable de trouver un critère autre que la fonction objectif, pour évaluer la qualité du jeu de paramètres associé à chaque modèle de paramétrisation et pouvoir retenir un de ceux-ci pour représenter la structure du milieu. Pour apprécier la

qualité de chaque maillage de paramétrisation, nous déterminons deux critères de performance :

- le premier critère appelé Erreur de modèle ou critère sur fonction objectif noté *Erreur\_H*

(*Equation 1*) dans la suite de nos propos, concerne la moyenne sur tous les points de mesure et à tous les pas de temps des écarts quadratiques entre les charges simulées par le modèle et les charges piézométriques mesurées sur le terrain [9]. Son expression est :

$$Erreur\_H = \sqrt{J(P) / N \times Np} \quad (1)$$

avec :

$$J(P) = \sum_{n=0}^{N-1} \|H_c^{n+1} - H_m^{n+1}\|^2$$

$H_c$  : Vecteur des charges simulées par le modèle aux points d'observations.

$H_m$  : Vecteur des charges mesurées sur le terrain aux points d'observations.

$N$  : Nombre de pas de temps

$Np$  : Nombre de points d'observation de la charge sur le terrain.

- le deuxième critère porte sur la qualité des paramètres (*Equation 2*) estimés avec le maillage

de paramétrisation utilisé pour le calage. Nous désignons ce critère par Erreur de structure qui traduit la moyenne des écarts relatifs quadratiques entre les paramètres identifiés et les paramètres de références. Nous le notons *Erreur\_K* en référence aux conductivités hydrauliques  $K$  qui sont les paramètres à identifier et a pour expression :

$$Erreur\_K = 100 \left\{ 1/M \sum_{j=1}^M [(Kc_j - Km_j) / Km_j]^2 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

*Erreur\_K* : Moyenne des écarts relatifs des paramètres identifiés par rapport aux paramètres mesurés

$Kc_j$  : Conductivités hydrauliques identifiés au point  $j$ .

$Km_j$  : Conductivités hydrauliques mesurés au point  $j$ .

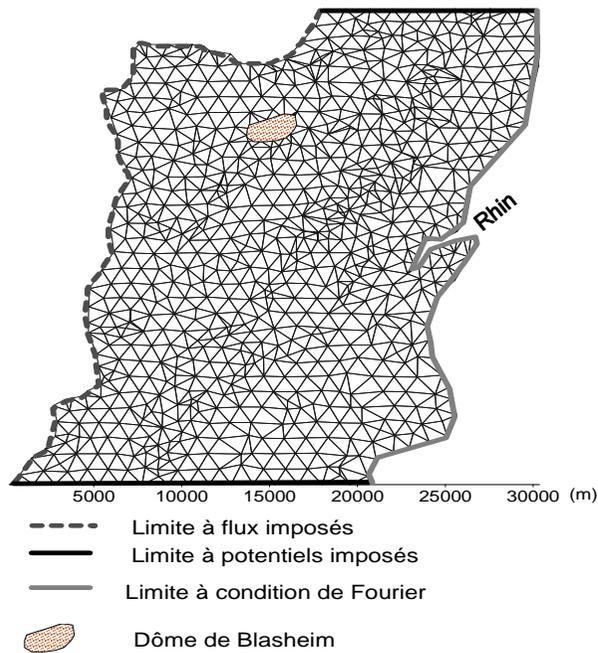
$M$  : Nombre de points de mesure du paramètre  $P$ .

En observant simultanément l'erreur de modèle (*Erreur\_H*) et l'erreur de structure (*Erreur\_K*), on peut déceler la dimension optimale de la paramétrisation pour une structure de départ donnée. Une fois les calages successifs réalisés, on dispose pour chaque maillage de paramétrisation utilisé, d'une valeur d'*Erreur\_H* et d'une valeur d'*Erreur\_K* qui lui sont associées. Ce sont donc les valeurs de ces deux critères *Erreur\_H* et *Erreur\_K* qui vont nous renseigner sur la qualité de chaque modèle de paramétrisation. Nous procédons donc aux différents calages avec toute la série de modèles de paramétrisation que nous avons générée. Ce qui nous permet de représenter *Erreur\_H* et *Erreur\_K* en fonction de la dimension de la paramétrisation et qui correspond au nombre de noeuds du maillage multi-échelle. La représentation de *Erreur\_H* et de *Erreur\_K* en fonction du nombre de noeuds du maillage multi-échelle permet ainsi de sélectionner la dimension optimale du modèle de paramétrisation qui convient pour le calage du modèle.

#### ***II-2-6. Description du modèle étudié***

Le modèle retenu est un écoulement bidimensionnel en nappe libre. Après une analyse détaillée de la longue chronique des données piézométriques, [10] a conclu qu'un pas de temps de 2 mois convient pour mieux suivre la dynamique de la nappe. Nous étudions donc le modèle en régime transitoire sur une période de 4 ans subdivisée en 24 pas de temps de 2 mois chacun. La période choisie (1983-1987) correspond à un intervalle de temps où on dispose de toutes les données de bases nécessaires au modèle. La recharge de la nappe phréatique provient des précipitations, des flux entrant par la limite Ouest du côté des Vosges et par les infiltrations des rivières. Le schéma numérique utilisé pour résoudre l'équation de l'écoulement est la méthode des éléments finis conformes de Galerkin [11] mise en œuvre à partir de mailles triangulaires. Les conditions aux limites se résument à des potentiels imposés sur les frontières Nord et Sud, à des flux imposés entrant par la frontière Ouest et enfin à des limites mixtes (condition de Fourier) à l'Est entre le Rhin et la nappe (*Figure 4*).

Les mêmes conditions de Fourier s'appliquent aussi à l'ensemble des rivières du domaine. La détermination des conditions aux limites du modèle a connu des difficultés. Il s'agit principalement des potentiels imposés au Nord et au Sud du modèle, des flux imposés sur la limite Ouest du côté des Vosges et enfin des échanges entre la nappe et les nombreuses rivières qui constituent le réseau hydrographique.



**Figure 4 :** *Conceptualisation du modèle*

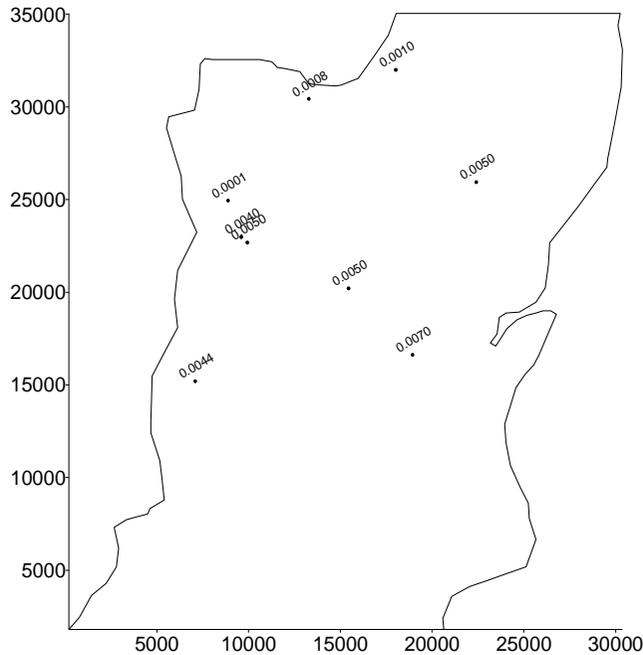
Cette relation entre la nappe et les rivières du domaine peut s'inverser dans le temps et dans l'espace. Les données piézométriques de la nappe utilisées sont fournies par des mesures effectuées sur les 32 piézomètres et ouvrages de captage du secteur étudié. Les termes puits/sources se limitent aux débits prélevés dans les 40 puits et forages du domaine. Les mesures de conductivités hydrauliques et coefficients d'emmagasinement constituent la clé de voûte de la méthode que nous proposons. L'idéal serait de disposer de mesures fiables, en quantité suffisante et bien réparties sur le domaine. L'intérêt de cette répartition est d'orienter dans un premier temps la paramétrisation du modèle en faisant ressortir une image de la structure du milieu réel.

Pour conférer des structures aux différents maillages de paramétrisation à tester, nous exploitons simultanément la distribution spatiale des transmissivités, des conductivités hydrauliques, des débits spécifiques sans oublier la connaissance générale que nous avons du secteur à partir des études déjà réalisées [10, 12]. Il convient de rappeler que la structure se définit sur la base de toutes les connaissances quantitatives et qualitatives portant sur le milieu à modéliser. Les cartes géologiques de la France au 1/50000 ont notamment servi à définir les grands traits, conjointement avec la

distribution des valeurs locales de paramètres obtenues par des essais de pompage. Les valeurs de porosité efficace sont comprises entre 6% et 10% avec une moyenne de 8%. Les valeurs de la recharge par les précipitations sont données par pas de temps et les coefficients de recharge permettent leur prise en compte dans la détermination des flux. Ainsi, nous ne calons que la conductivité hydraulique et les flux aux limites. Cependant les valeurs locales de conductivité hydraulique utilisées pour le calcul sont peu nombreuses et mal distribuées sur le domaine (*Figure 5*).

Le domaine de calcul est discrétisé en 1484 mailles et c'est seulement à 9 mailles que nous pouvons affecter des valeurs de conductivités hydrauliques. Dans la conceptualisation du modèle (*Figure 4*), la conductivité hydraulique et la porosité sont affectées aux mailles de calcul. Nous attribuons la valeur mesurée à la maille qui contient le point de mesure. Compte tenu des dimensions des mailles de calcul et du regroupement de certains essais sur des sites très rapprochés, nous nous sommes retrouvés avec trois ou quatre valeurs de conductivité hydraulique sur la même maille de calcul. Cette situation ne serait pas gênante si toutes ces valeurs étaient proches les unes des autres. Des écarts souvent très importants existent et nous avons dû choisir en fonction de la qualité et des caractéristiques de l'ouvrage. Il s'agit entre autre de la profondeur de l'ouvrage et de la hauteur crépinée. En opérant un tel choix, nous introduisons des incertitudes sur des données qu'on utilise par la suite pour estimer la fiabilité des résultats.

De telles informations, même si elles sont jugées purement qualitatives, peuvent éviter de retenir un résultat tout à fait aberrant qui satisfait aux critères numériques de l'estimation des paramètres. C'est pour cette raison qu'il est souhaitable de ne plus se limiter à trouver des jeux de paramètres qui réalisent la meilleure adéquation entre les charges simulées par le modèle et les charges mesurées. Les jeux de paramètres estimés doivent en outre être conditionnés par les valeurs locales de ces paramètres mesurées sur le terrain. Dans le cas où les mesures sont insuffisantes pour caractériser la fiabilité des paramètres estimés, les informations qualitatives peuvent servir à contraindre les résultats dans des limites plausibles.



**Figure 5 :** Répartition spatiale des points de mesure des conductivités hydrauliques et des valeurs associées (m/s).

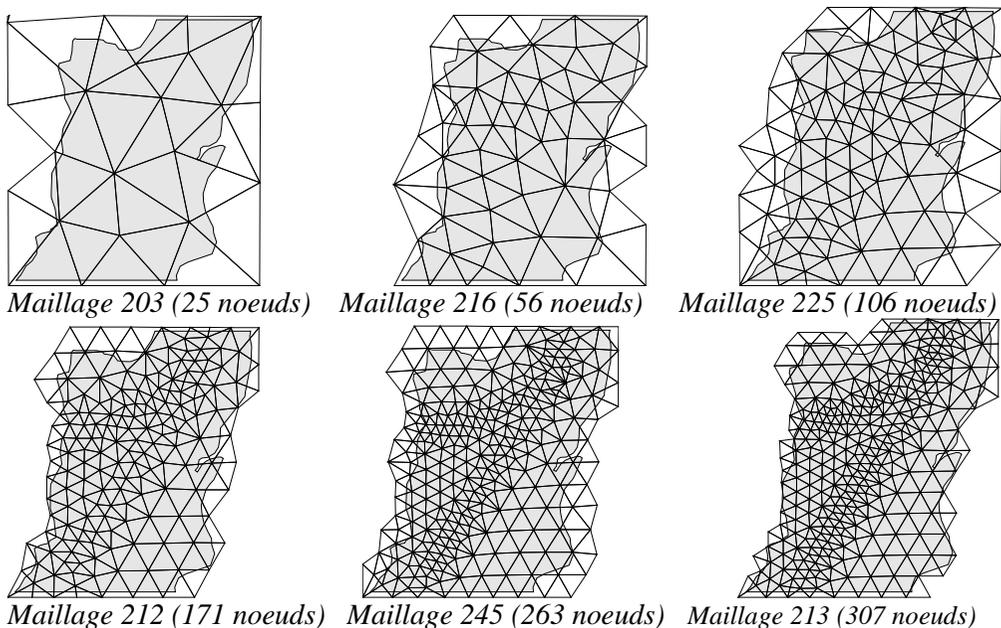
### III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

La détermination du champ de conductivités hydrauliques connu en appliquant la méthode de paramétrisation multi-échelle non automatique implique la recherche de la dimension et de la structure du modèle qui permettent d'obtenir le champ de conductivités le plus proche du champ connu.

#### III-1. Structure et dimension optimale du modèle de paramétrisation

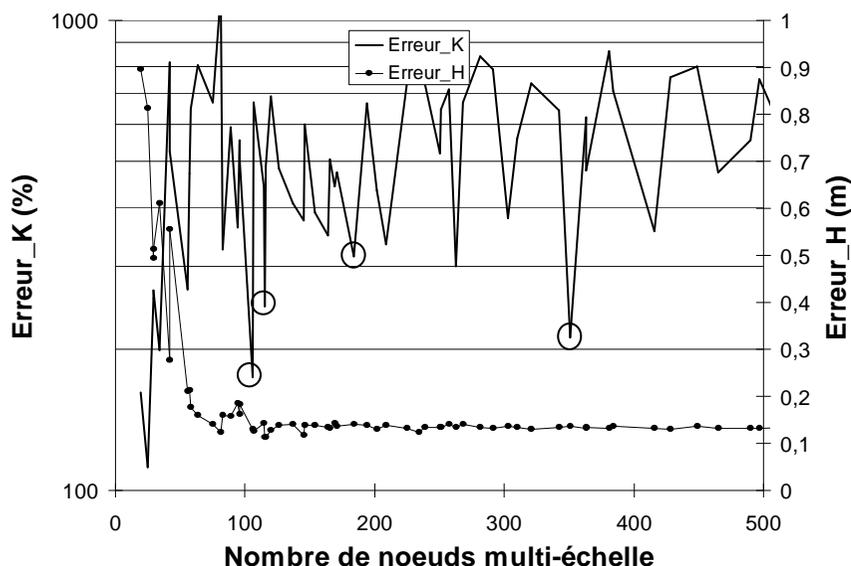
Dans un premier temps, les seules informations quantitatives disponibles sur le très peu nombre de mesures de conductivités hydrauliques (**Figure 5**) avec les incertitudes inhérentes à toute mesure et qu'il est difficile de quantifier sont prises en compte. Cependant, pour être rigoureux, nous travaillons strictement avec les valeurs de conductivités qui ont été fournies par la Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan (BRAR). Par la suite, et au besoin, la connaissance de l'allure générale de la distribution des paramètres hydrogéologiques peut nous aider à porter un jugement qualitatif sur les différentes solutions alternatives. Chaque série de maillages est caractérisée par une structure définie avant la réalisation des maillages. Toutes les

informations sur les caractéristiques physiques du domaine sont prises en considération pour créer une image du milieu. C'est une étape qui comprend beaucoup de subjectivité. En effet, les mêmes données traitées par des spécialistes différents ne fourniront pas forcément la même image. Les images vont certes se ressembler dans une certaine mesure, mais il est peu probable qu'elles soient identiques. Il convient donc d'utiliser plusieurs structures différentes pour tenir compte des incertitudes liées aux données qui doivent guider l'élaboration de la structure du modèle. Tous les maillages de paramétrisation d'une même série ont donc la même structure de départ et se distinguent les uns des autres par leur dimension. La **Figure 5** indique l'évolution de la dimension des maillages de paramétrisation appartenant à la structure de départ n° 200.



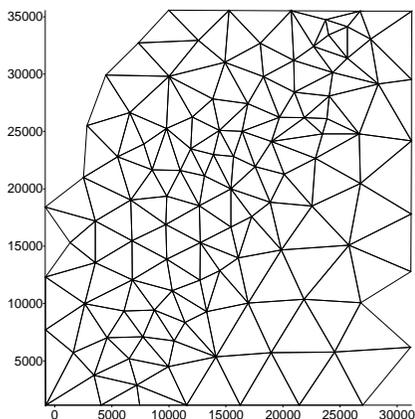
**Figure 6 :** Evolution des maillages de paramétrisation de la structure n° 200.  
Une fois la série de maillages construite, elle sert à effectuer les différents

Une fois la série de maillages construite, elle sert à effectuer les différents calages pour déterminer l'erreur de modèle  $Erreur\_H$  et l'erreur de structure.  $Erreur\_K$  La représentation des deux critères en fonction du nombre de paramètres (**Figure 7**) montre que l'erreur de modèle décroît très rapidement quand le nombre de paramètres augmente. Par la suite,  $Erreur\_H$  garde une valeur qui ne varie plus notablement avec l'augmentation du nombre de paramètres.

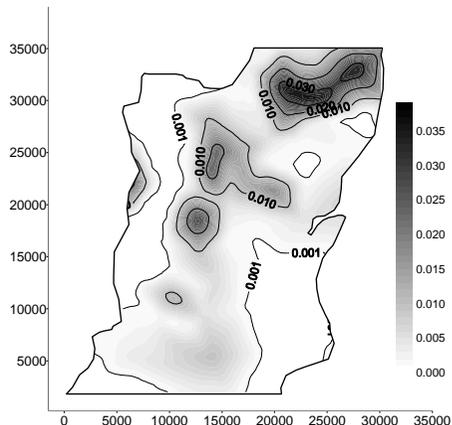


**Figure 7 :** Courbes représentatives de *Erreur\_H* et de *Erreur\_K* en fonction du nombre de noeuds multi-échelle.

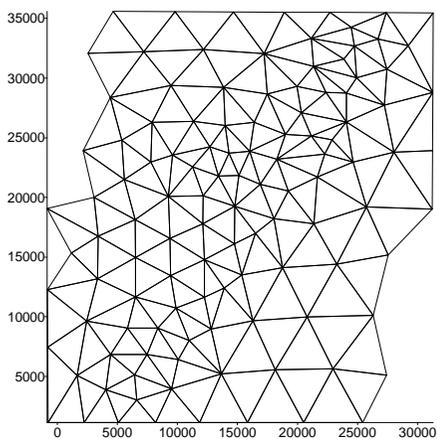
Le plus remarquable dans l'allure de la courbe reste le comportement de l'erreur de structure. *Erreur\_K* Pour des nombres de noeuds multi-échelle peu élevés qui pourraient traduire une sousparamétrisation du modèle, *Erreur\_K* affiche des valeurs faibles qui peuvent induire en erreur si on ne garde pas à l'esprit le nombre limité de mesures de conductivités hydrauliques utilisées pour calculer *Erreur\_K*. L'erreur de structure se met par la suite à augmenter, passe par des valeurs faibles sur une zone plus ou moins large, avant de remonter à nouveau. Sur la base des critères de la méthode proposée, nous sélectionnons a priori quatre maillages de paramétrisation pour identifier les paramètres du modèle. Il s'agit des maillages à 106, 115, 184 et 351 noeuds, choisis parce qu'ils représentent des maillages à faibles *Erreur\_K*. Les **Figures 8a, 8b, 8c** et **8d** représentent les quatre champs de conductivités hydrauliques probables et les maillages de paramétrisation associés, choisis à partir de la **Figure 7**. Les quatre distributions de conductivités hydrauliques ont la bonne structure d'ensemble. Elles sont allongées dans la direction de l'écoulement de la nappe et la bande qui longe la frontière Ouest se caractérise par de faibles conductivités hydrauliques. Par contre une information qualitative n'est pas du tout vérifiée. En effet, il est connu que les alluvions possèdent en général, des conductivités hydrauliques qui diminuent lorsqu'on passe de la plaine aux bordures des Vosges. Et pourtant, il existe une zone bien limitée aux rivières phréatiques qui affiche des conductivités hydrauliques très faibles.



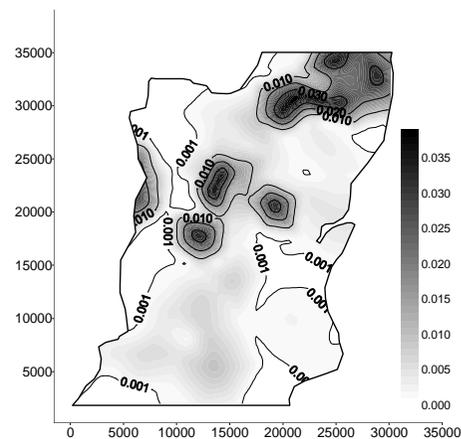
**Figure 8a :** maillage 225 (106 noeuds)



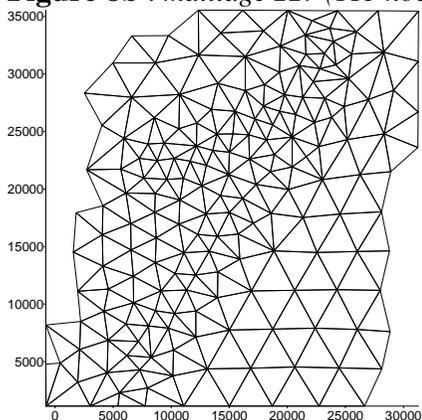
*Conductivités hydrauliques (m/s)*



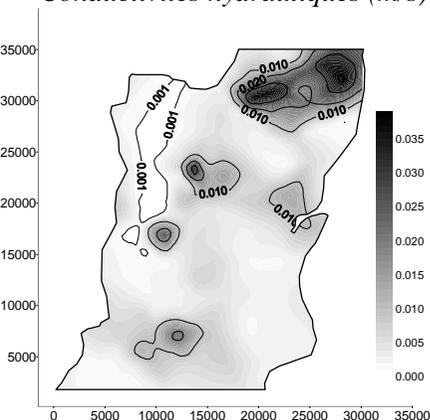
**Figure 8b :** maillage 227 (115 noeuds)



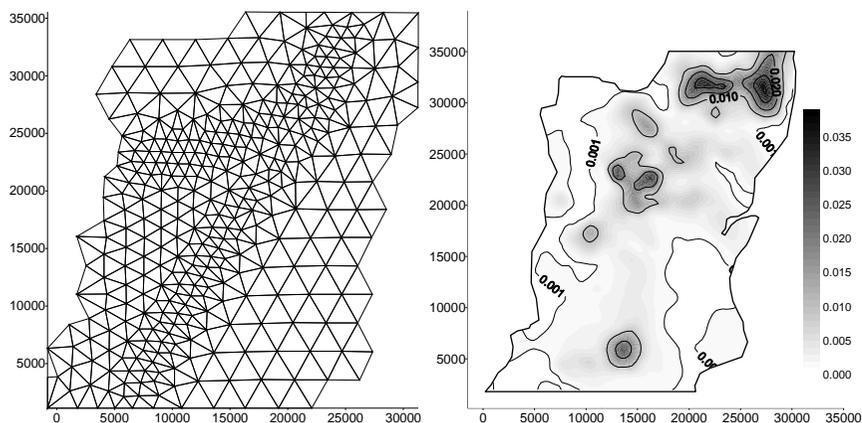
*Conductivités hydrauliques (m/s)*



**Figure 8c :** maillage 239 (184 noeuds)



*Conductivités hydrauliques (m/s)*



**Figure 8d** : maillage 265 (351 noeuds) Conductivités hydrauliques (m/s)

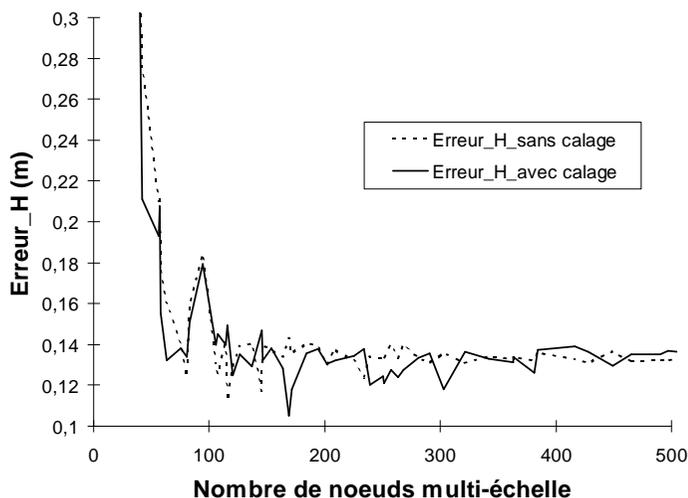
**Figure 8** : Maillages de paramétrisation et champs de conductivités hydrauliques probables associés

Dans l'évaluation des conditions aux limites du modèle, nous avons évoqué les difficultés de quantification des effets des rivières phréatiques sur la nappe. Ce qui nous amène à nous poser des questions sur la quantification des échanges entre la nappe et ces rivières. Les flux entre la nappe et les rivières sont déterminés à l'aide d'un coefficient d'échange et des cotes respectives de la nappe, du substratum de la rivière et de la surface libre des eaux et n'ont pas été ajustés au cours du calage. Néanmoins, pour améliorer les valeurs de conductivité hydraulique dans cette zone, nous avons réalisé une seconde série de calages avec les mêmes maillages où, en plus des conductivités hydrauliques, on ajuste les coefficients d'échange et la surface libre des rivières phréatiques. Nous comparons les résultats obtenus au niveau de l'erreur de modèle *Erreur\_H* (**Figure 9**), et au niveau de l'erreur de structure *Erreur\_K* (**Figure 10**).

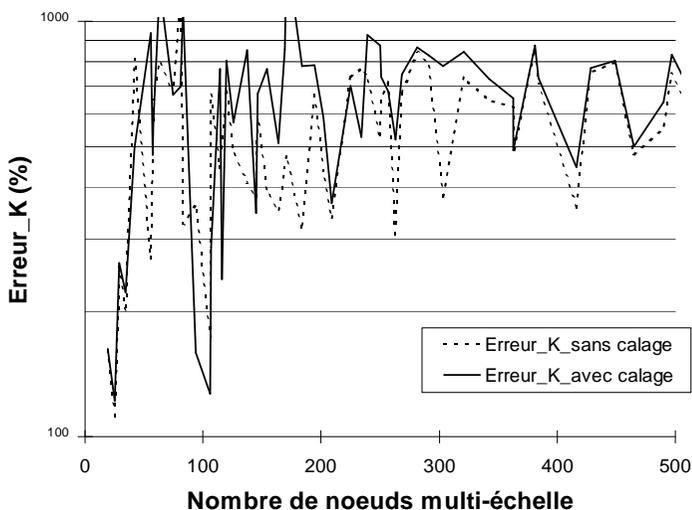
Les deux critères évoluent à peu près de la même façon pour les deux cas étudiés (ajuster ou non les caractéristiques des rivières phréatiques). Cependant, au niveau des courbes comparatives de *Erreur\_H*, l'écart moyen relatif, qui représente le critère de fiabilité, est passé de 173 % pour le cas où les paramètres des rivières phréatiques ne sont pas ajustés, à 126 % dans le cas contraire pour le maillage n° 225 que nous retrouvons dans les deux cas.

A partir des **Figures 7 et 10**, nous retenons le maillage de paramétrisation n° 225 qui possèdent 106 noeuds. Nous ne disposons pas de mesures de conductivités hydrauliques sur le secteur des rivières phréatiques. Nous savons cependant que dans la plaine et proche du Rhin, les formations sont plus perméables et pourtant le champ de conductivités hydrauliques associé

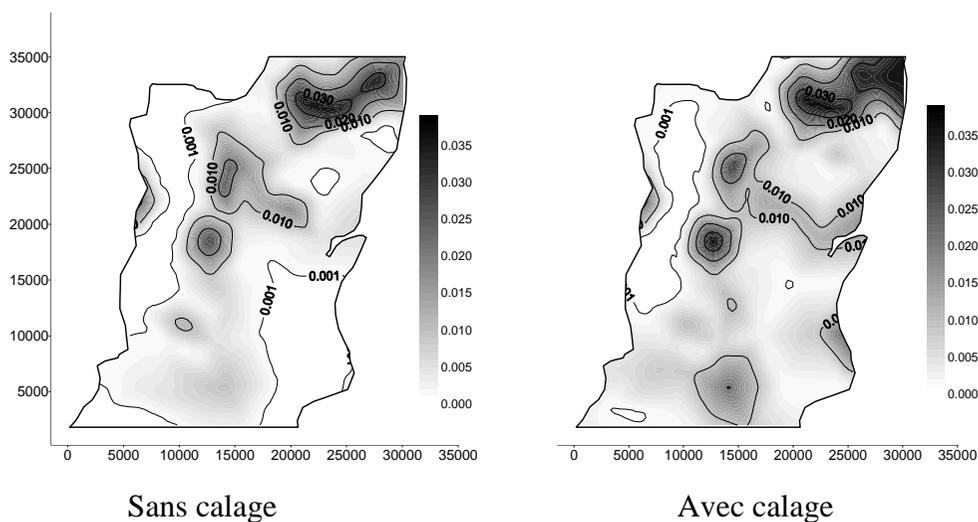
au maillage de paramétrisation choisi indique de faibles valeurs en ces lieux. Suite à un ajustement des paramètres des rivières phréatiques prenant en compte cette information qualitative, la carte des conductivités hydrauliques associée (*Figure 11*), indique des valeurs élevées de perméabilités et donc confirme nos observations.



**Figure 9 :** Comparaison de *Erreur\_H* selon que les paramètres des rivières phréatiques sont ajustés ou non.



**Figure 10 :** Comparaison de *Erreur\_K* selon que les paramètres des rivières phréatiques sont ajustés ou non.



**Figure 11** : Comparaison des champs de conductivités hydrauliques (m/s), selon que les paramètres des rivières phréatiques sont ajustés ou non

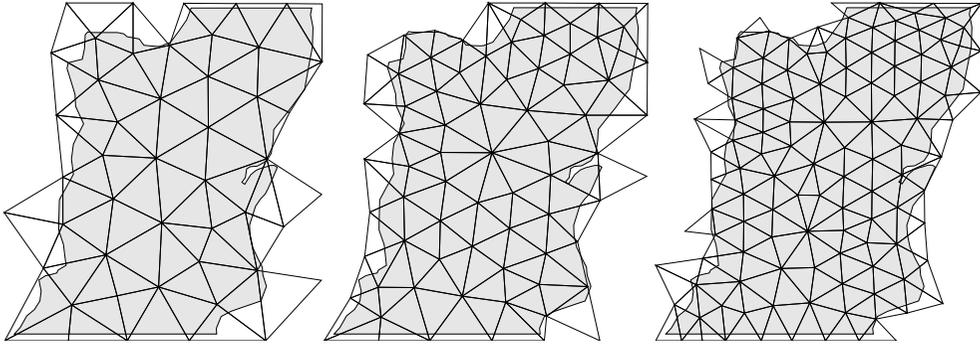
Tous ces constats mis ensemble, on remarque que les rivières phréatiques influencent les estimations dans la zone qui leur correspond et jouent un rôle déterminant dans l'estimation des paramètres de la zone concernée. Une mauvaise estimation des flux échangés risque de mettre en cause la méthode appliquée. Ces observations renforcent la nécessité de disposer de suffisamment de mesures de terrain pour pouvoir contraindre les paramètres estimés dans des gammes admissibles. Il est donc souhaitable d'utiliser non seulement les données quantitatives mais aussi toute autre information non forcément chiffrée qui peut apporter des indications intéressantes. Nous avons décidé dans cette étude d'ajuster les niveaux des rivières phréatiques à cause des incertitudes sur les mesures des niveaux, dues aux difficultés de mesures signalées par Migayrou [13]. L'application de la méthode nous a permis de mettre en doute la conceptualisation du modèle dans une région qui présentait un comportement particulier et inattendu. Les ajustements opérés par la suite ont permis d'améliorer quelques peu les résultats en fonction de données qualitatives sur le domaine. Toto [9] a également ajusté ces paramètres dans la modélisation de la nappe côtière occidentale de la Mamora au Maroc pour des résultats aussi peu satisfaisant. Si on se limitait aux deux critères utilisés, on n'aurait pas pu mettre en cause les résultats. On peut remédier à l'erreur de conceptualisation du modèle, au niveau des échanges entre la nappe et les rivières phréatiques, par des mesures effectuées sur le terrain. On s'aperçoit que les jeux de paramètres qui se rapprochent le plus de la structure physique du milieu sont identifiés avec des maillages de

paramétrisation de faible dimension, empêchant du coup la fonction objectif de diminuer excessivement. Le principe de la méthode multi-échelle est de disposer d'un ensemble de solutions possibles et d'utiliser des critères autres que l'adéquation des simulations avec les observations, pour évaluer la qualité de chaque jeu de paramètres identifié. Comme il est impossible de déceler la structure vraie, nous ne pouvons pas prétendre avoir trouvé la solution de notre problème inverse. L'objectif est de proposer une méthode pratique de sélection parmi un ensemble de solutions. Il existe encore une infinité de modèles de paramétrisation avec les mêmes informations sur la structure qui ont aidé à construire les maillages de paramétrisation. Le plus intéressant est de disposer d'éléments objectifs pour choisir un modèle plutôt qu'un autre et de nous affranchir d'une certaine subjectivité qui fait qu'on n'est pas totalement satisfait des résultats qu'on obtient. C'est donc dans cet esprit que nous utilisons trois autres structures de base pour générer d'autres modèles de paramétrisation. Il faut cependant savoir s'arrêter et considérer que le modèle peut à présent servir les objectifs fixés. Il s'agit de déterminer pour le modèle étudié, la structure la mieux adaptée pour la paramétrisation, compte tenu des données disponibles. Les séries de maillages des trois nouvelles structures sont identifiées par les numéros de structure 600, 700 et 800.

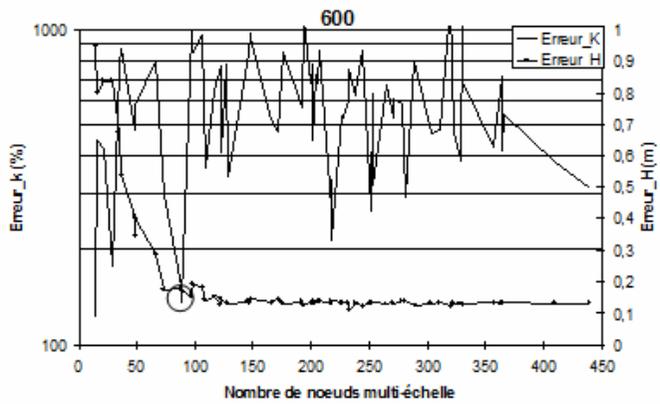
### **Exemple de la structure 600**

Trois maillages de paramétrisation de la structure 600 sont présentés à la **Figure 12** pour indiquer globalement comment la configuration des maillages évolue. La courbe de la **Figure 13** permet de choisir nettement un maillage pour identifier les paramètres du modèle. Il s'agit d'un maillage de 89 noeuds (**Figure 14**) que nous avons retenu dans la série et à partir duquel nous arrivons à retrouver une bonne partie de la distribution des conductivités hydrauliques du modèle initiale qui compte 809 noeuds pour 1484 mailles. A partir d'un maillage de 89 noeuds pour un modèle qui compte 1484 valeurs de conductivités hydrauliques, nous retrouvons une bonne partie de la structure des conductivités hydrauliques du domaine réel. Par la suite nous comparons pour la même structure, des maillages de dimensions différentes. En effet, la quantité des informations a priori sur laquelle repose la méthode n'est pas suffisante pour déterminer rigoureusement, sur une structure donnée, une dimension de paramétrisation optimale unique. Il arrive donc que, pour la même structure, des maillages de différentes dimensions affichent des valeurs voisines en ce qui concerne le deuxième critère.

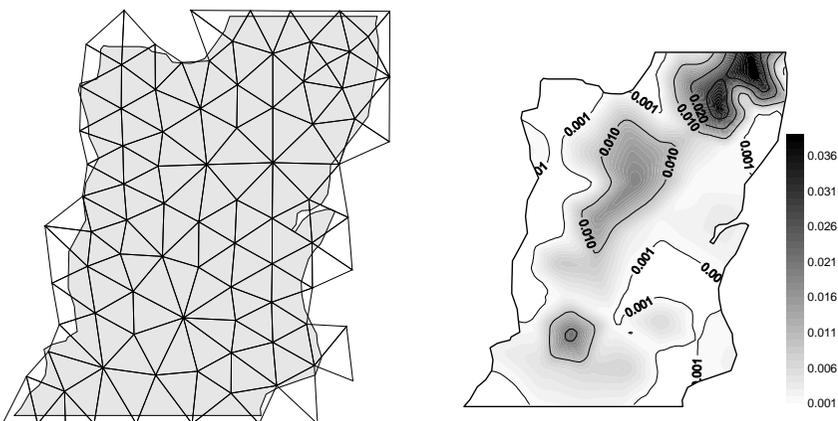
*Erreur\_K*



**Figure 12 :** Représentation de l'évolution des maillages de la série 600.



**Figure 13 :** Représentation de *Erreur\_H* et *Erreur\_K* en fonction du nombre de nœuds multi-échelle.



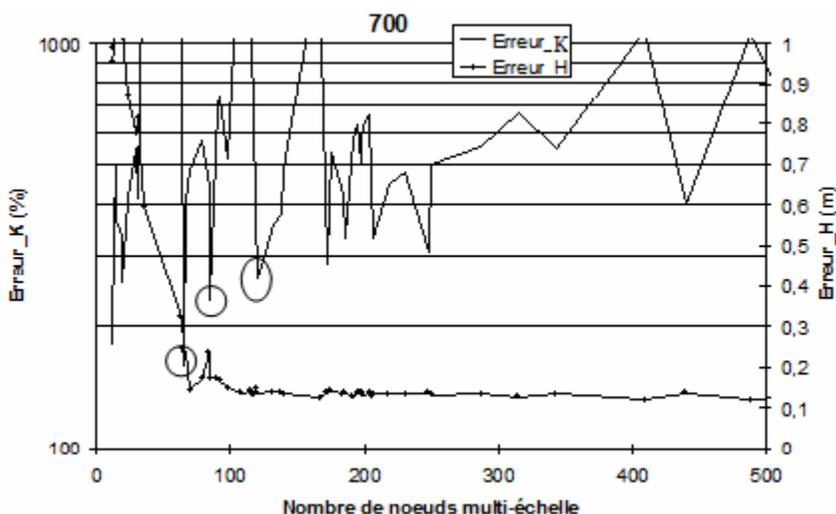
**Figure 14 :** Représentation de la structure utilisée et champ de conductivités hydrauliques identifié (m/s).

Si on dispose de données suffisantes à la fois sur les observations et sur les mesures locales de paramètres sur le terrain, on peut alors définir plus nettement le maillage de paramétrisation, à condition d'utiliser une structure proche de la structure vraie. Dans la réalité, tel n'est pas le cas, et plusieurs maillages peuvent être exploités et donner sensiblement les mêmes résultats en ce qui concerne les critères de choix retenus pour évaluer chaque modèle de paramétrisation. Nous illustrons nos propos à partir des deux exemples suivants.

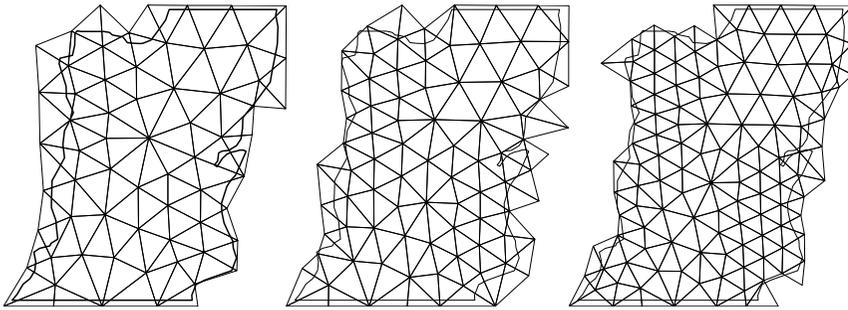
### Exemple de la structure 700

Les maillages de la structure 700 (*Figure 15*) sont utilisés pour réaliser une série de calages. En nous servant des deux critères de choix, *Erreur\_H* et *Erreur\_K*, il n'est pas possible, dans le cas présent, de déterminer une dimension optimale unique de la paramétrisation. Cela revient à dire qu'à l'analyse de la courbe de la *Figure 15*, on ne peut pas sélectionner nettement un maillage de paramétrisation sur l'ensemble des maillages issus de la même structure de départ.

Un tel choix unique serait possible si les observations et les mesures locales de paramètres étaient en nombre suffisant. Les deux critères nous permettent seulement dans un premier temps de restreindre le nombre de maillages de paramétrisation possibles pour le modèle. Les maillages retenus sont les n° 724, 730 et 717 avec respectivement, 65, 85 et 120 noeuds (*Figure 16*).



**Figure 15 :** Représentation de *Erreur\_H* et *Erreur\_K* en fonction du nombre de noeuds

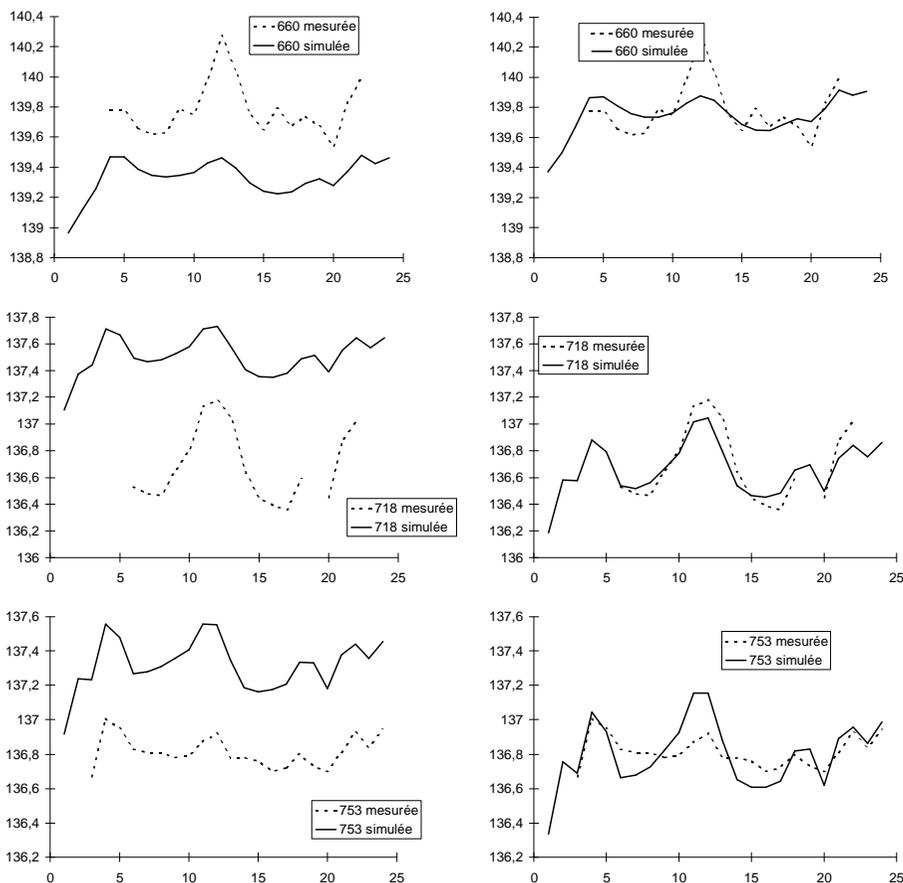


**Figure 16:** Représentation des maillages à 65, 85 et 120 noeuds de la structure 700.

En l'absence d'autres critères d'évaluation de ces maillages indiqués à la **Figure 16**, nous comparons les charges simulées associées à chaque maillage, aux charges mesurées aux points d'observation (**Figure 17**) afin d'avoir des indices de sélection de l'un des trois modèles de paramétrisation présélectionnés. Le passage du maillage de 65 noeuds à celui de 85 noeuds n'améliore les simulations du modèle que sur un secteur très restreint du domaine, sur les piézomètres n° 660, 718 et 753. Pour les piézomètres restants, aucun changement notable n'est constaté.

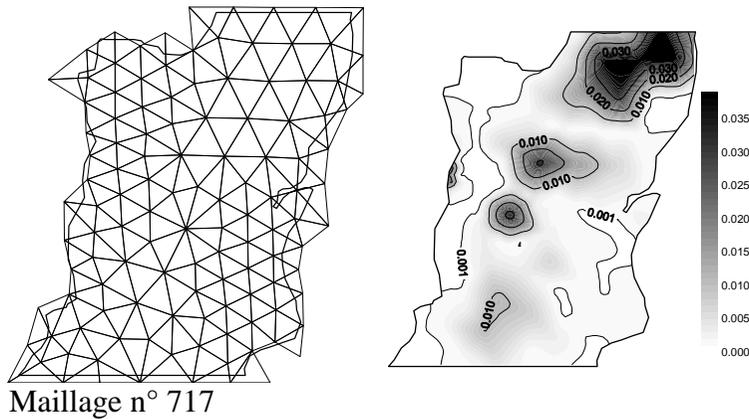
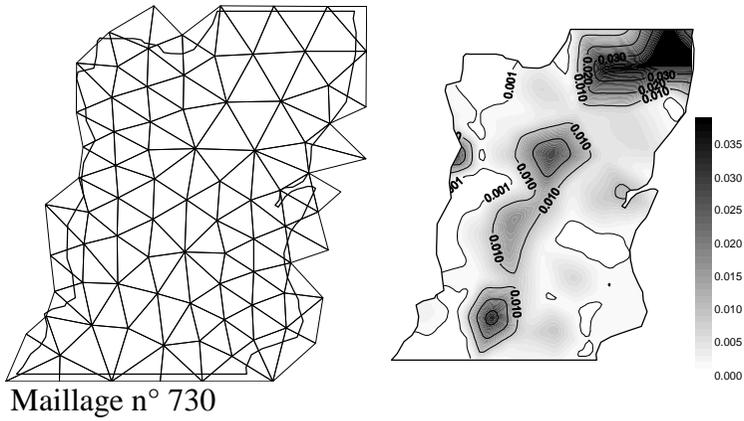
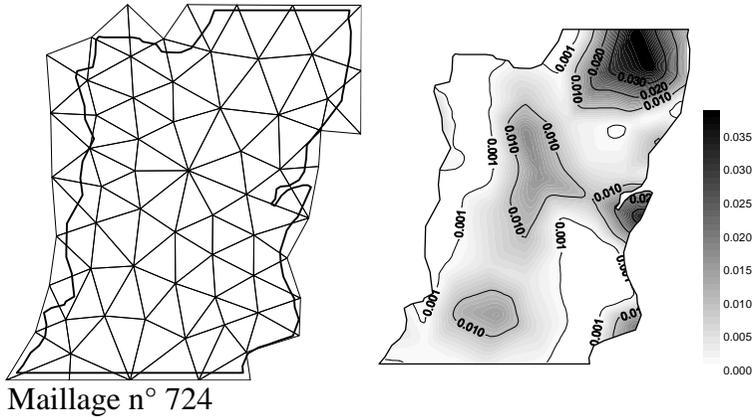
Cette amélioration au niveau de l'écoulement, probablement due à un léger affinement des mailles de cette zone, ne se traduit pas de la même façon au niveau du champ de conductivités hydrauliques qui prend une structure différente de celle du champ obtenu à partir du maillage de 65 noeuds. Si un maillage encore plus fin est utilisé, il n'y a plus d'amélioration notable sur l'écoulement. Par contre, la structure de l'aquifère et les paramètres identifiés s'éloignent encore plus de ceux obtenus avec les maillages de 65 et 85 noeuds (**Figure 18**).

A partir de la courbe de la **Figure 15**, nous choisissons trois modèles de paramétrisation qui ne sont différents que par le nombre de paramètres qu'ils utilisent pour décrire le domaine de calcul. Les nombres de paramètres sont représentés par le nombre de noeuds du maillage multi-échelle et valent respectivement 65, 85, et 120 pour les maillages n° 724, 730 et 717. Nous représentons les champs identifiés à partir de ces maillages à la **Figure 18**.



**Figure 17 :** Evolution des charges simulées (trait continu) aux piézomètres 660, 718 et 753 quand on passe du maillage à 65 noeuds au maillage à 85 noeuds (les observations sont en pointillé).

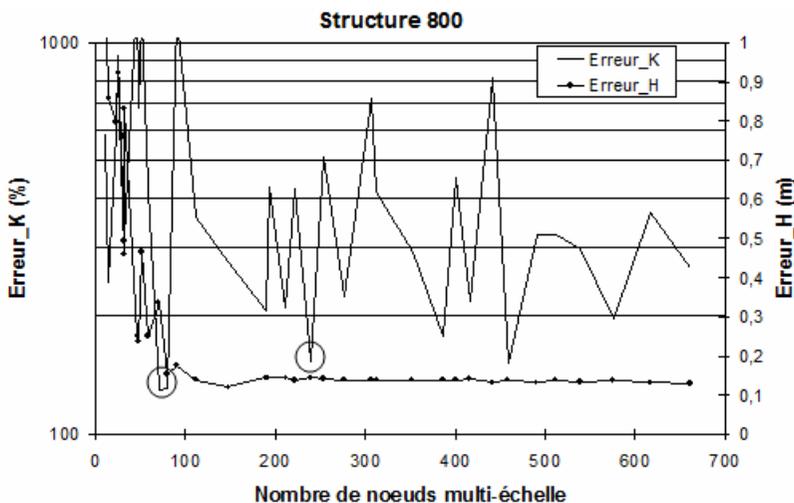
Lorsque le nombre de paramètres augmente pour la même structure, on perçoit un début d'oscillation sur le champ. L'allongement dans la direction Sud-Nord de la structure du champ de conductivité avec le maillage n° 724 qui a le moins de paramètres semble mieux correspondre au champ réel. Il faut remarquer que c'est ce même maillage qui possède le moins de noeuds qui réalise la moins bonne adéquation entre les charges simulées et les observations, si on se base sur *Erreur<sub>H</sub>* qui vaut 24 cm pour ce maillage alors que les deux autres affichent 17 cm et 13 cm pour le maillage n° 730 (85 noeuds) et le maillage n° 717 (120 noeuds).



**Figure 17** : Représentation des champs de conductivités hydrauliques (m/s) et des maillages de paramétrisation utilisés de 65, 85 et 120 noeuds multi-échelle.

### Exemple de la structure 800

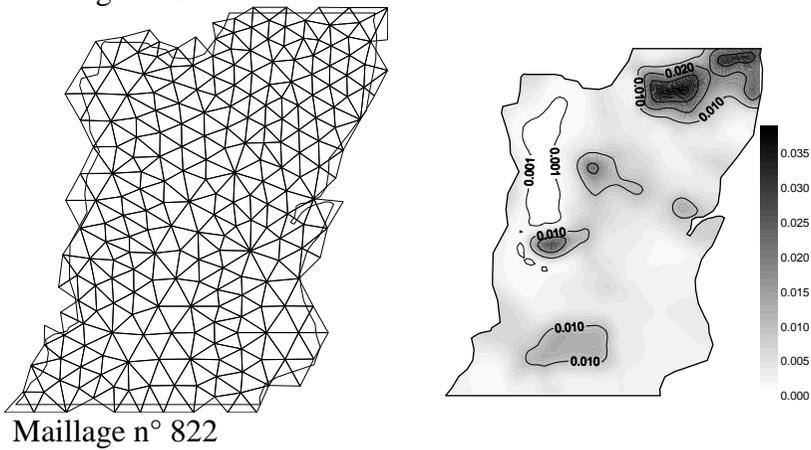
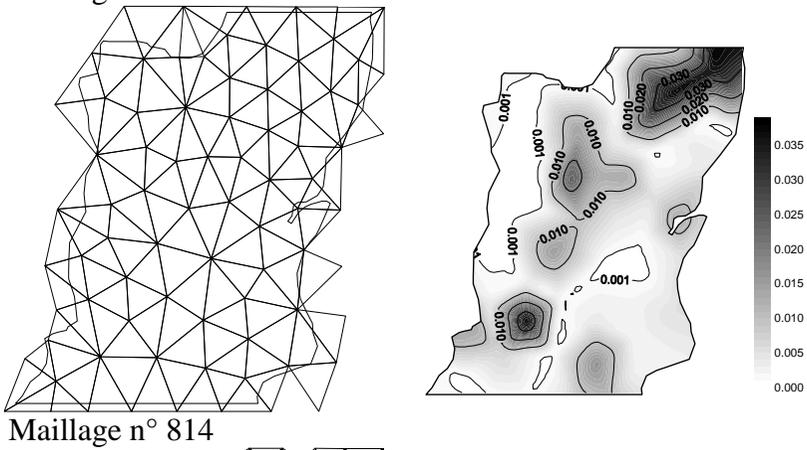
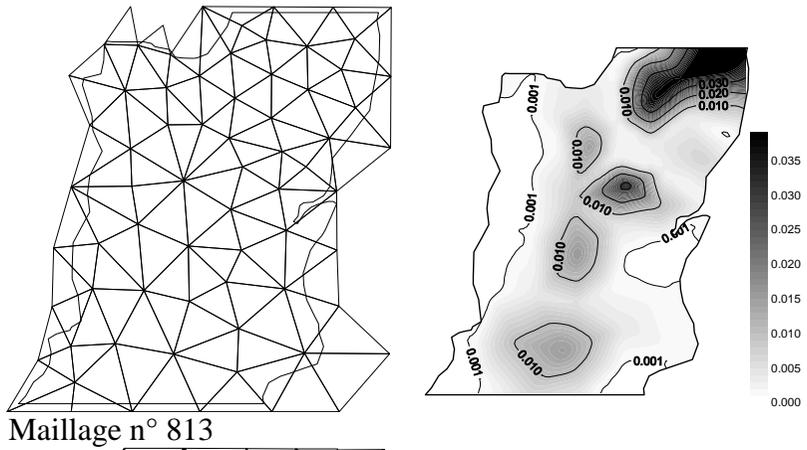
Trois maillages probables de paramétrisation issus de la structure n° 800 avec 70, 80 et 239 noeuds sont retenus à partir de la courbe de la *Figure 19*.



**Figure 19** : Représentation de *Erreur\_H* et *Erreur\_K* en fonction du nombre de noeuds

Avec la structure 800 aussi, on constate la détérioration de la structure du champ de conductivités hydrauliques lorsque la dimension de la paramétrisation augmente. Les valeurs des erreurs *Erreur\_H* et *Erreur\_K* évoluent en sens inverse. Pour un nombre de noeuds qui passe successivement de 70 à 80 puis 239, *Erreur\_H* vaut 33 cm, 15 cm, et 15 cm alors que *Erreur\_K* vaut 129 %, 130 % et 153 %.

Pour une structure donnée, la dimension de la paramétrisation est importante à déterminer pour obtenir des estimations fiables tous comme le montre les travaux de Yeh [14] et Sun [15] qui ont révélé le rôle prépondérant que joue la structure du modèle sur la qualité des paramètres estimés, et donc sur la fiabilité des prévisions. Dans le cas que nous venons de suivre, les trois champs de conductivités hydrauliques sont différents l'un de l'autre. L'identification s'est réalisée dans les mêmes conditions, avec les mêmes observations. Les modèles de paramétrisation sont construits autour de la même structure. Nous avons pourtant des différences visibles en comparant simplement les cartes de conductivités résultantes (*Figure 17* et *Figure 20*). Pour les différentes structures utilisées, le nombre de noeuds des maillages à retenir est faible par rapport aux dimensions du domaine de calcul. Les structures de base ne diffèrent pas beaucoup les unes des autres. Elles sont construites à partir des informations quantitatives et qualitatives sur la géologie de l'aquifère.



**Figure 20 :** Représentation des champs de conductivités hydrauliques avec les maillages de paramétrisation n°813 (70 noeuds), n° 814 (80 noeuds) et n° 822 (239 noeuds)

Si plusieurs structures sont testées, c'est pour indiquer la part de subjectivité inévitable dans la réalisation des structures de base. L'interprétation que l'on fait des données disponibles est déterminante pour les structures résultantes. Cependant, en se basant sur des connaissances réelles du terrain, il est tout de même difficile de créer des structures complètement différentes les unes des autres. La connaissance de la géologie est une contrainte importante pour une méthode de paramétrisation qui veut rapprocher la structure du modèle et la structure du domaine réel modélisé. C'est ce qui explique que les structures qui donnent des champs de conductivités hydrauliques apparemment acceptables sont proches les unes des autres en ce qui concerne la dimension de la paramétrisation qui, dans l'ensemble, reste faible (entre 60 et 100 noeuds).

En effet, on note que tous les maillages de moins de 100 noeuds représentent mieux l'aquifère, quelque soit la structure utilisée pour les générer. De toutes ces structures testées, il est difficile de retenir un seul maillage de paramétrisation pour identifier le champ de conductivités hydrauliques. Cependant, l'application des deux critères utilisés permet de comparer les différents maillages de paramétrisation et de choisir le maillage N° 814 à partir du **Tableau 1** qui récapitule les caractéristiques des différents maillages retenus.

**Tableau 1** : Caractéristiques des différents maillages de paramétrisation retenus

N°de structure	N°de maillage	Nombre de noeuds	Erreur_H (m)	Erreur_K (%)	Moyenne K phréatique (m/j)
100	133	60	0.18	124	113
600	616	89	0.17	136	107
700	724	65	0.24	160	152
	730	85	0.17	231	150
	717	120	0.13	261	115
<b>800</b>	813	70	0.33	129	165
	<b>814</b>	<b>80</b>	<b>0.15</b>	<b>130</b>	<b>234</b>
	822	239	0.14	153	240

Nous ne pouvons pas prétendre avoir trouvé la bonne structure de l'aquifère. Cependant, en consacrant plus de temps à la recherche de la structure du milieu, les solutions possibles sont réduites et on peut tendre vers une structure du modèle de paramétrisation qui permette d'identifier des paramètres proches des propriétés physiques du milieu et ayant aussi une structure proche de la structure vraie. Les observations de l'état du système et les valeurs locales des paramètres doivent guider la détermination de la structure dont l'influence sur les estimations est largement reconnue.

#### IV - CONCLUSION

La simulation de l'hydrodynamique d'une partie de la nappe d'Alsace s'est révélée plus délicate à traiter à cause de l'insuffisance des mesures tant pour les observations (calcul de la fonction objectif) que pour les paramètres (calcul du critère a posteriori). De plus, les valeurs de conductivités hydrauliques mesurées constituent des valeurs locales qui doivent être attribuées à des mailles. Leur répartition spatiale est irrégulière avec des concentrations dans certaines zones alors qu'on n'a aucune mesure de paramètres dans d'autres qui auraient paru plus utiles à connaître. Cet article a en outre permis de déceler une erreur de conception dans le modèle hydrogéologique au niveau des rivières phréatiques, erreur que nous avons corrigée pour aboutir à des résultats plus vraisemblables. Ces résultats sont encourageants et mettent en évidence les potentialités d'exploitation de la méthode de calage retenue. Il faut d'autre part noter que l'approche utilisée est incomplète dans la mesure où seules les conductivités hydrauliques et les flux aux limites ont été calés et que l'unique critère a posteriori porte sur la conductivité hydraulique. Il convient, dans la mesure du possible, de poursuivre les simulations en intégrant dans les paramètres à caler les sollicitations telles la recharge, les échanges nappes rivière et les conditions aux limites de type Fourier ou Dirichlet.

Compte tenu des enjeux futurs autour des ressources en eau, les efforts matériels et financiers pour accéder à une meilleure connaissance des réserves en eaux, en vue d'une meilleure gestion, ne doivent pas constituer un frein au développement des modèles hydrogéologiques.

#### RÉFÉRENCES

- [1]- M. Price. *Introducing groundwater*. Chapman & Hall (1996), 278 p.
- [2]- E.CLAERR. *L'eau en Alsace : une ressource abondante mais inégalement répartie*. Etude documentaire (2010). [http://deutsch-langueregionale.eu/data/patrimoine-naturel/eau-01/textes/fiche\\_eau01.pdf](http://deutsch-langueregionale.eu/data/patrimoine-naturel/eau-01/textes/fiche_eau01.pdf).
- [3]- F.W. KOUASSI. *Estimation des paramètres hydrogéologique par approche inverse. Mise en œuvre d'une approche multi-échelle sur un secteur de la nappe d'Alsace*. Thèse Université Louis Pasteur- Institut de Mécanique des Fluides, UMR 7507 UPL-CNRS, Strasbourg, (1999), 165p.
- [4] - ANONYME. *DREAL- les différents aquifères d'Alsace*. Ministère de l'Écologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat, 2009. [www.alsace.developpement-durable.gouv.fr](http://www.alsace.developpement-durable.gouv.fr)

- [5] - Ph. ACKERER, P. SIEGEL, A. P. BLASCHKE. Inverse problem applied to groundwater flow and transport equations using a downscaling parameterization. Proc. Of ' Computational Methods in Water Resources XI', Cancun, Mexique, 22-26 Juillet, Ed. A. Aldama, J. Aparicio, C. Brebbia, W. G. Gray, I. Herrera, G. Pinder, Computational Mechanics Pub.,(1996), 321- 328.
- [6]- P.Siegel. Transfert de masse en milieux poreux fortement hétérogènes : modélisation et estimation de paramètres par éléments finis mixtes hybrides et discontinus. Thèse Université Louis Pasteur - Institut de Mécanique des Fluides, URA CNRS 854, Strasbourg, (1995), 185 p.
- [7] - W. W-G. Yeh, Y. S. Yoon, K. S. Lee. Parameter identification with kriging and optimum parameterization. Water Resour. Res. 19(1), (1983), 225-233.
- [8] - K. A. KOUASSI. Influence de la paramétrisation sur le calage des modèles hydrogéologiques : cas d'une partie du secteur nord de la nappe d'Abidjan, *DEA, Université d'Abobo-Adjamé*, (2005), 80p.
- [9] - E. A. TOTO, L. ZOUHRI, A. JGOUNNI. Modélisation directe et inverse de l'écoulement souterrain dans les milieux poreux. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 54(2), (2009), 327-337.
- [10]- E. Chardigny. Modélisation de l'hydrodynamique des eaux souterraines : de la conception du modèle à l'estimation des paramètres par approche inverse. Thèse Université Louis Pasteur - Institut de Mécanique des Fluides, UMR CNRS 7507, Strasbourg, (1999), 364 p.
- [11]- W. Kinzelbach. Groundwater modelling : an introduction with sample programs in BASIC. Developments in water sciences, Elsevier Pub., (1986), 333 p.
- [12]- M. C. HAMOND. Modélisation de l'extension de la pollution de la nappe phréatique d'Alsace par le tétrachlorure de carbone au droit de benfeld. Mémoire de DESS Sciences de l'Environnement, Université Louis Pasteur de Strasbourg, (1995), 81 p.
- [13]- J. Migayrou. Méthodologie d'estimation des débits de certains cours d'eau phréatiques de la plaine d'Alsace. *Hydrogéologie* N°4, (1985), 293-29
- [14]- W. W-G.Yeh. Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology : the inverse problem. Water Resour. Res. 22(2), (1986), 95-108
- [15]- N-Z. Sun. Inverse problem groundwater modeling. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, (1994), 337p.