

**AO INSU 2014**  
**Section « Océan-Atmosphère »**  
***Dossier scientifique***

Nom du porteur du projet : **Agnès DUCHARNE** (UMR 7619 Sisyphe)  
Titre du projet : **GEM – Groundwater in Earth system Models** (AO2014-86177)  
Le projet est un **nouveau projet**. Il relève de l'action **IMAGO**.  
Le porteur n'a pas obtenu de financement LEFE au cours des 3 dernières années.

## **1. Intérêt scientifique et état de l'art**

### **1.1 Le rôle des eaux souterraines dans le système Terre**

Au sens le plus large, les eaux souterraines (ES) sont localisées dans plusieurs réservoirs sous la surface terrestre. Le plus superficiel est le sol, avec une altération importante de la croûte terrestre et une présence de matière organique qui lui confèrent une perméabilité et une capacité de rétention importantes. Les roches sous-jacentes peuvent aussi stocker de l'eau, mais elle y circule à des vitesses bien inférieures à celles observées dans les sols, avec des variations qui dépendent de la géologie. Cette typologie « verticale » en croise une autre qui repose sur le caractère saturé ou non saturé des milieux : les milieux saturés se retrouvent par gravité sous les milieux non saturés, et au-dessus de milieux relativement imperméables, sachant que les écoulements sont majoritairement verticaux dans les milieux non saturés (dont la majorité des sols), et horizontaux dans les milieux aquifères saturés, qu'ils soient libres ou captifs.

Les ES « au sens strict » (zone non saturée sous le sol, ou ZNS, et aquifères), constituent des stocks d'eau beaucoup plus importants en volume que l'humidité des sols, mais avec des temps de résidence beaucoup plus longs, de quelques années pour de petits aquifères fortement connectés à la surface comme les nappes alluviales, aux milliers d'années pour certains aquifères dits fossiles [37]. Dans ce projet, nous nous limiterons aux aquifères libres, ou nappes, qui peuvent être connectés hydrauliquement avec les sols (par la recharge, descendante, et les remontées capillaires, ascendantes), contrairement aux aquifères captifs confinés par un toit imperméable.

L'humidité des sols est en effet une variable clé des interactions entre les surfaces continentales et l'atmosphère. Elle exerce un contrôle quantitatif sur les précipitations et la température atmosphérique via l'évapotranspiration (ET), mais elle influence aussi la dynamique de ces processus par des effets d'inertie ou de mémoire, avec des conséquences sur la persistance des événements extrêmes, la prévisibilité du climat, et son évolution sous l'effet de l'augmentation des gaz à effet de serre [2][30][35][37][45][51][56]. La connexion hydraulique des sols avec les eaux plus profondes influence donc la variabilité spatiale et temporelle de l'humidité des sols [10][11][19], ainsi que le climat simulé [1][50]. Etant donné le temps de résidence important des eaux souterraines, on s'attend aussi à ce qu'elles puissent influencer la variabilité climatique à long terme, y compris la trajectoire des simulations du système Terre lors des prochains siècles (sensibilité climatique).

Enfin, les ES constituent aussi 30% des ressources en eau douce exploitables actuellement [37][57], et leur effet tampon, quand elles sont présentes, permet de soutenir les bas débits dans les cours d'eau (débit de base). Leur bonne représentation quantitative et géographique est donc importante pour fournir des réponses utiles quant à l'impact du changement climatique et des changements globaux sur l'évolution future des ressources en eau [6][31].

## 1.2 Modélisation des eaux souterraines à grande échelle

La modélisation des ES dans les modèles de surface continentale est une voie de recherche très active dans la communauté internationale depuis une dizaine d'années. On peut distinguer plusieurs grands types de démarche :

- Une des toutes premières approches, développée par Koster et Ducharme [19], est d'exploiter le modèle hydrogéologique simplifié TOPMODEL [33] pour décrire la distribution d'une nappe superficielle et ses effets sur la variabilité sous-maille de l'humidité du sol. Ceci augmente la mémoire hydrologique dans un modèle atmosphérique [51], mais cette nappe superficielle n'est pas adaptée quand la nappe est profonde et épaisse, comme dans les bassins de la Seine et de la Somme [10].
- A l'échelle régionale, les interactions nappe-surface ont aussi été décrites grâce à des modèles hydrogéologiques 2D ou 3D finement distribués [14][43][60], parfois couplés avec un modèle de surface et un modèle de climat régional [52][62]. Ce type d'approche qui vise à décrire toute la complexité des interactions nappe/surface est particulièrement utile pour développer et/ou valider des approches simplifiées, notamment à des résolutions plus grossières (changement d'échelle) [8][22][28][29][43].
- La plus simple et la plus fréquente intègre explicitement le couplage entre la zone saturée et le sol, mais néglige les flux horizontaux dans la zone saturée, ce qui peut donc être vu comme une extension en profondeur de l'approche 1D verticale utilisée pour décrire l'hydrologie des sols dans les modèles de surface [48]. Le couplage avec un modèle atmosphérique montre un impact notable sur les précipitations simulées [1][47][50].
- L'équipe internationale de Miguez-Macho et Fan a généralisé cette approche en tenant compte des circulations 2D dans une nappe continue finement discrétisée [53], l'ensemble ayant aussi été couplé à un modèle atmosphérique régional [32]. Leur modèle de nappe 2D a aussi permis de proposer une distribution de la profondeur de la nappe phréatique aux échelles continentales et globale [40][41], à partir d'une recharge forcée, issue d'un modèle de surface.
- Enfin, la thèse de Vergnes (2012) au CNRM a repris la démarche ci-dessus, mais en augmentant le réalisme hydrogéologique, en distinguant différentes nappes 2D indépendantes, avec des propriétés hydrodynamiques adaptées en fonction de la géologie [61]. Le couplage avec le modèle de surface ISBA est limité à une fraction de maille où les remontées capillaires peuvent atteindre le sol, mais sans autoriser de saturation dans le sol, ce qui entraîne peu d'effets dans le modèle de climat du CNRM.

De cette revue, il ressort que le couplage nappe / atmosphère a surtout été réalisé avec une résolution horizontale élevée (1 à 10 km, exceptionnellement 1°), sans se préoccuper vraiment du réalisme hydrogéologique mais plutôt dans des études de sensibilité, ce qui a confirmé que la profondeur de la nappe est un facteur extrêmement structurant pour les interactions nappe / surface / atmosphère, comme illustré en Figure 1 :

- quand les nappes sont proches de la surface, elles augmentent l'humidité des sols et la mémoire climatique (les événements pluvieux sont recyclés à plus long terme) ; d'un point de vue hydrologique, en revanche, on peut supposer que la dynamique des débits est assez proche de celle des précipitations dans ces systèmes « humides », où une fraction importante de l'écoulement doit provenir du ruissellement [33].
- quand les nappes sont assez profondes, elles sont déconnectées de la surface, et ne jouent plus de rôle tampon sur l'humidité des sols. Il est même possible que ces systèmes « profonds » réduisent la persistance des précipitations, puisqu'une fraction échappe à la reprise évaporative en étant détournée vers les nappes profondes. Si cette fraction est assez importante, ce qui dépendra du climat et de la géologie, les eaux souterraines pourront constituer une ressource conséquente, et par leur temps de rétention, limiter l'amplitude des variations de débit et augmenter la prévisibilité des risques associés (étiages, inondations).

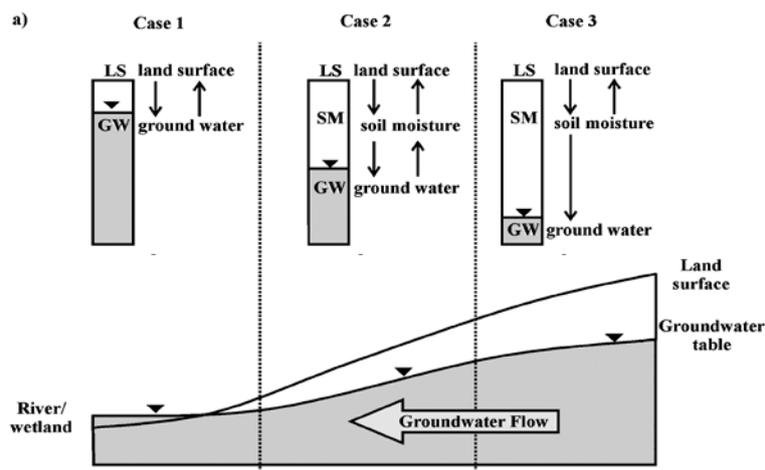


Figure 1. Interactions entre eaux souterraines (GW), humidité des sols (SM) et surface continentale (LS) en fonction de la profondeur de la nappe, en lien avec les flux horizontaux vers la rivière. D'après [43].

## 2. Plan de recherche et calendrier de réalisation

### 2.1 Objectifs et démarche

La question posée par ce projet de recherche est celle de l'influence des ES sur le climat, mais en dépassant les études de sensibilité réalisées jusque-là, *i.e.* en tenant compte au mieux des caractéristiques hydrogéologiques, afin de décrire des nappes là où elles existent et avec des propriétés relativement réalistes. On vise notamment une description cohérente des temps de résidence et de la profondeur de la nappe, identifiée comme une variable clé des interactions nappes / surface / climat. Nous nous plaçons aussi délibérément dans le cadre de la modélisation du climat, *i.e.* à l'échelle planétaire, et à une résolution horizontale typique des modèles climatiques, avec des mailles de 100 km de côté ou plus.

A cette résolution, on ne peut pas supposer que la profondeur de la nappe est uniforme dans l'espace, et un des enjeux sera donc de caractériser les zones où elle est suffisamment proche de la surface pour alimenter l'humidité du sol. Un des points forts du projet consiste notamment à utiliser un modèle hydrogéologique à haute résolution dans une démarche de changement d'échelle (« upscaling »), pour identifier les bonnes configurations équivalentes à résolution plus grossière, en terme de subdivision de l'espace et éventuellement de processus / équations associées [8][22][28][29]. Au final, il s'agit donc de décrire la variabilité sous-maille de l'humidité du sol en lien avec les circulations horizontales des ES, en prenant soin de décrire les processus à une échelle pertinente pour le couplage avec un modèle climatique, et en profitant des nombreuses données disponibles avec une couverture globale, en ce qui concerne notamment les caractéristiques hydrogéologiques et la topographie.

Le partenariat élaboré pour mener ce projet rassemble des compétences pluridisciplinaires sur les processus impliqués (hydrogéologie, hydrologie, processus de surface, couche limite, physique du climat) et leur modélisation, via trois équipes complémentaires rattachées à l'IPSL, à l'UMR Sisyphe, au LSCE et au LMD. Il bénéficie aussi deux thèses, conçues pour être complémentaires, et qui débiteront toutes deux en octobre 2013 pour 3 ans (*cf.* sections 2.3 et 7).

Dans ce cadre, nous utiliserons le modèle du système de Terre de l'IPSL [7], et notamment le couplage du modèle atmosphérique LMDZ [2][16] avec le modèle de surface continentale ORCHIDEE. Celui-ci décrit les flux d'eau et d'énergie à la surface des continents, avec une description très poussée de la végétation et du cycle du carbone terrestre [20]. Il bénéficie aussi d'une description à bases physiques de l'hydrologie du sol basée sur l'équation de diffusion de Richards [4]. Dans le cadre de la thèse de Campoy (2013), encadrée par

Ducharne, Chéruy et Hourdin, nous avons adapté cette paramétrisation, en adaptant le nombre de couches du schéma diffusif, afin de pouvoir (i) décrire une nappe, *i.e.* une zone saturée, dans la colonne de sol, pour l'instant à profondeur fixe, (ii) étendre la colonne simulée à une profondeur quelconque. L'impact sur le climat européen s'exprime essentiellement en été : plus la nappe est proche de la surface, plus l'ET et les précipitations sont augmentées, car on rajoute de l'eau dans le système climatique pour maintenir la nappe à la profondeur choisie (masse d'eau non conservative). Le biais chaud du modèle de l'IPSL alors réduit [1].

Pour compléter cet aperçu des fonctionnalités d'ORCHIDEE, il intègre un modèle de routage à grande échelle, qui tient compte du retard induit par le transfert horizontal en souterrain (selon une constante de temps fixe), et permet une réalimentation hydrique des surfaces continentales au niveau des zones irriguées et des plaines d'inondation [5][12][24].

## 2.2 Organisation du projet et calendrier

Sur cette base, le projet GEM s'articule en 4 volets, qui sont détaillés plus bas. Les principales actions qui les composent et leurs articulations sont synthétisées dans le Tableau 1 ci-dessous.

Actions	S1	S2	S3	S4	S5	S6
<b>V1. Développement d'une paramétrisation des eaux souterraines dans ORCHIDEE</b>						
V1.1 Développement du code						
V1.2 Evaluation en mode forcé et modifications						
<b>V2. Modélisation hydrogéologique pour le changement d'échelle</b>						
V2.1 Validation/amélioration du modèle en N colonnes équivalentes						
V2.2 Mise à l'échelle d'ORCHIDEE						
<b>V3. Influence des eaux souterraines sur le climat simulé</b>						
V3.1 Sensibilité du climat à différentes profondeurs de nappe						
V3.2 Evaluation de la paramétrisation des ES en couplé						
V3.3 Changement climatique						
<b>V4. Acquisition et traitement de données</b>						
V4.1 Données hydrogéologiques et topographiques						
V4.2 Autres données de forçage et validation						
V4.3 Prélèvements						

Tableau 1. Calendrier des différentes actions, en 6 semestres sur 3 ans, et principales articulations inter-volets.

### V1. Développement d'une paramétrisation des eaux souterraines dans ORCHIDEE

Responsable : A. Ducharne (Sisyphé), Partenaires : Sisyphé, LMD, LSCE

Ce volet se compose de deux actions nécessairement imbriquées, portant sur le développement et l'évaluation d'une paramétrisation des ES, dynamique et conservant la masse, dans ORCHIDEE.

*V1.1 Principes de développement.* Etant donné le rôle essentiel des cours d'eau comme drains des aquifères, la paramétrisation proposée des ES reposera sur le couplage des modules de l'hydrologie des sols et du routage des débits d'ORCHIDEE (Figure 2). Pour l'instant, les grandes lignes de cette paramétrisation, qui évolueront certainement au cours du projet en fonction des résultats de l'évaluation (V1.1) et du volet V2.2, sont les suivantes :

1. Les transferts souterrains horizontaux ne seront décrits que là où des aquifères couplés avec le sol peuvent être identifiés (y compris karst et aquifères fracturés, contrairement à [61]), et uniquement à l'intérieur des mailles ORCHIDEE / LMDZ. Celles-ci sont en effet suffisamment étendues, dans les applications globales, pour qu'on puisse supposer que l'eau qui s'infiltre vers le système souterrain dans une maille soit drainée par un cours d'eau appartenant à cette maille [5]. Les transferts horizontaux entre les mailles ou directement vers les océans pourront être décrits ultérieurement, par exemple en s'inspirant de [53] ou [61].

2. La circulation des ES sera simplifiée dans les fractions de maille où les nappes sont profondes, en utilisant le réservoir profond du module de routage, qui est déjà dédié à cet objectif. Ceci revient à simplifier les systèmes hydrogéologiques complexes en un réservoir équivalent, en cohérence avec le volet V2. Cependant, ce réservoir linéaire est actuellement caractérisé par une constante de temps non variable dans l'espace, et un objectif important sera donc de renseigner une constante de temps, à partir des bases de données hydrogéologiques globales [36][39][41][42][58].
3. Ce réservoir souterrain n'alimentera plus le réservoir représentant les cours d'eau de la maille dans le modèle de routage, mais une nouvelle fraction de maille (Figure 2). Le modèle ORCHIDEE subdivise en effet chaque maille en fractions caractérisées par des types de végétation différents (approche dite « mosaïque »), et nous proposons de rajouter un type de fraction, non plus basé sur les caractéristiques de la végétation mais sur son potentiel à ce que la nappe y soit proche de la surface. C'est très souvent le cas dans les corridors fluviaux, et cette fraction pourrait probablement être caractérisée à partir d'informations géomorphologiques. Une solution prometteuse à l'échelle globale serait de définir cette fraction en fonction de données topographiques à haute résolution (pixels à fort indice topographique de TOPMODEL, ou ayant une faible différence d'altitude avec les cours d'eau), mais des bases de données sur les zones humides [26][31][46], la présence d'alluvions, ou la piézométrie [41] pourraient être exploitées conjointement.
4. Cette nouvelle fraction « humide » serait une vraie fraction de la maille, avec un sol décrit par ORCHIDEE, et un bilan d'eau indépendant. Sa particularité serait d'être alimentée en eau non seulement par infiltration depuis la surface du sol, mais aussi par la vidange du réservoir profond du module de routage, qui n'alimenterait donc plus directement les cours d'eau, en tout cas là où des fractions « humides » seraient définies. La convergence des eaux de l'« amont » de la maille conditionnerait une humidité élevée, voire la présence d'une zone saturée dans la colonne de sol, comme dans [1], d'où une ET facilitée. Le réservoir représentant les cours d'eau serait alors alimenté par le drainage de la fraction « humide », avec une perméabilité à choisir judicieusement, en fonction des résultats du V2.

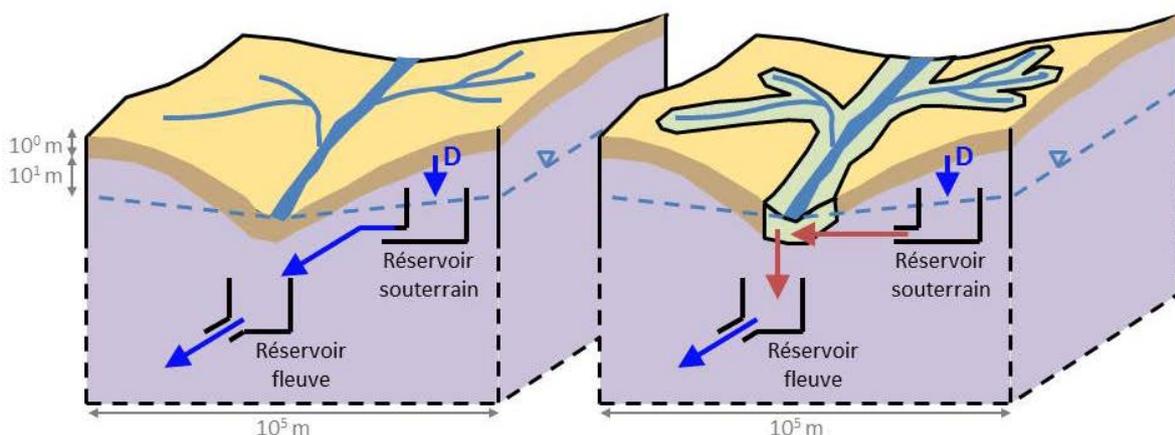


Figure 2. (gauche) Liens actuels entre drainage depuis ORCHIDEE-Richards et module de routage, (droite) Modifications liées à l'introduction d'une fraction de maille humide (en vert), alimentée par la convergence du drainage via les circulations souterraines. La ligne en tireté bleu représente une distribution de profondeur de nappe dans une maille de 100 km de côté.

VI.2 Evaluation. Ces développements seront guidés par la confrontation aux résultats du volet V2 pour modification éventuelle, et par une évaluation approfondie, en mode forcé par des données météorologiques, ou en mode couplé avec LMDZ (V3), en profitant de cadres d'évaluation déjà éprouvés. Dans le volet V1, nous nous limiterons à une évaluation en mode

forcé, ce qui permet d'analyser l'intérêt de la nouvelle paramétrisation des ES sans avoir à tenir compte de rétroactions avec le climat. Les variables d'intérêt seront donc hydrologiques (débits, ET, humidité des sols, zones humides, profondeur des nappes et/ou hauteurs piézométriques<sup>1</sup>).

L'analyse sera ciblée en priorité sur des zones ou grands bassins versants (i) où nous disposons d'un accès facilité aux données via différents projets (Tableau 4), (ii) qui présentent des aquifères, éventuellement sollicités pour l'irrigation, (iii) connus pour présenter des interactions avec l'atmosphère. Nous nous intéresserons donc à l'Amazonie (projet Amazalert), à l'Afrique de l'Ouest (projets AMMA et ALMIP2), à l'Inde et au bassin du Mississippi [13] (+ nombreuses données librement disponibles aux USA, notamment celles de profondeur des nappes [40]). Les bassins de la Seine et de la Somme, très étudiés à Sisyphe [6][10][14], pourront aussi être simulés, tout comme les bassins sédimentaires d'Europe de l'Est (Pologne, Ukraine), où les modèles de climat ont un gros problème de biais chaud en été. Malgré leur intérêt, les grands bassins Arctiques (dont l'Ob qui s'inscrit sur un important système aquifère) ne seront pas une priorité de notre projet, du moins tant que la paramétrisation du gel dans le sol ne sera pas stabilisée dans ORCHIDEE. Une description spécifique pourra alors être développée, grâce à l'expertise de Catherine Ottlé et Anne Jost sur les pergélisols [25][28], mais probablement après le terme du présent projet.

## **V2. Modélisation hydrogéologique pour le changement d'échelle**

*Responsable : E. Mouche (LSCE), Partenaires : LSCE, Sisyphe*

L'objectif est ici de vérifier si les principes retenus en V1.1 sont cohérents avec les interactions sol / nappe / cours d'eau telles qu'elles peuvent être simulées par un modèle hydrogéologique finement distribué servant de référence, et de faire évoluer ces principes vers plus de réalisme sinon.

Ce travail fera partie de la thèse de Mathilde Maquin, dans la continuité de son stage de M2 [21], encadré par E. Mouche et C. Mügler en collaboration avec C. Ottlé et A. Ducharne. La modélisation distribuée s'appuie sur la plateforme numérique CAST3M et couple un code décrivant les transferts hydriques en milieu saturé et non saturé avec des puits d'ET identiques à ceux d'ORCHIDEE (séparant l'évaporation du sol depuis la couche de surface et une transpiration extraite des couches de sol sous-jacentes). Pour faciliter ce couplage, essentiel pour rendre utilement compte de l'effet du battement de la nappe sur l'ET d'ORCHIDEE, le choix a été fait de simplifier le fonctionnement 3D d'un bassin versant en un ensemble de N colonnes 1D indépendantes, où sont branchées les puits d'ET d'ORCHIDEE (Figure 3). Dans ce cadre, le flux d'eau quittant la colonne vers le cours d'eau qui la draine, ou décharge de la nappe, est proportionnel à la différence de hauteur d'eau (ou charge) avec la rivière et à un paramètre de transfert  $K_s/(\omega_d \lambda^2)$ , où  $K_s$  est la perméabilité du milieu saturé,  $\omega_d$  la porosité de drainage et  $\lambda$  la distance au cours d'eau (selon l'approximation de Boussinesq). Le modèle a été testé sur un site FLUXNET (Italie) pour trois types de végétation. Il montre trois grands régimes de sensibilité de l'ET à la profondeur de la nappe, comme [43] cf. Figure 1.

Le travail proposé dans le projet GEM vise à exploiter ce cadre méthodologique pour la mise à l'échelle de la maille ORCHIDEE (« upscaling »), qui est actuellement décrite comme une colonne 1D équivalente, et serait assimilable à 2 colonnes 1D équivalentes en série selon les idées proposées en V1. A ce stade, il faut distinguer deux types de changements d'échelle : le premier permet de passer d'une échelle à une autre au sein d'un bassin versant régional, *i.e.* en respectant les frontières naturelles du bassin et le réseau hydrographique principal ; le second

---

<sup>1</sup> La hauteur piézométrique est l'altitude du toit de la nappe, dont la profondeur se calcule par soustraction avec l'altitude du sol.

permet de passer de l'échelle de ce bassin à celle de la maille de surface continentale d'un modèle de climat, qui ignore les frontières hydrologiques naturelles, et peut donc mélanger les cinétiques de différents bassins. Nous nous focaliserons d'abord sur le premier de ces deux changements d'échelle, qui revient à modéliser un bassin versant comme une colonne de sol « équivalente ». Dans ce cadre, le travail s'articulera en deux grandes étapes.

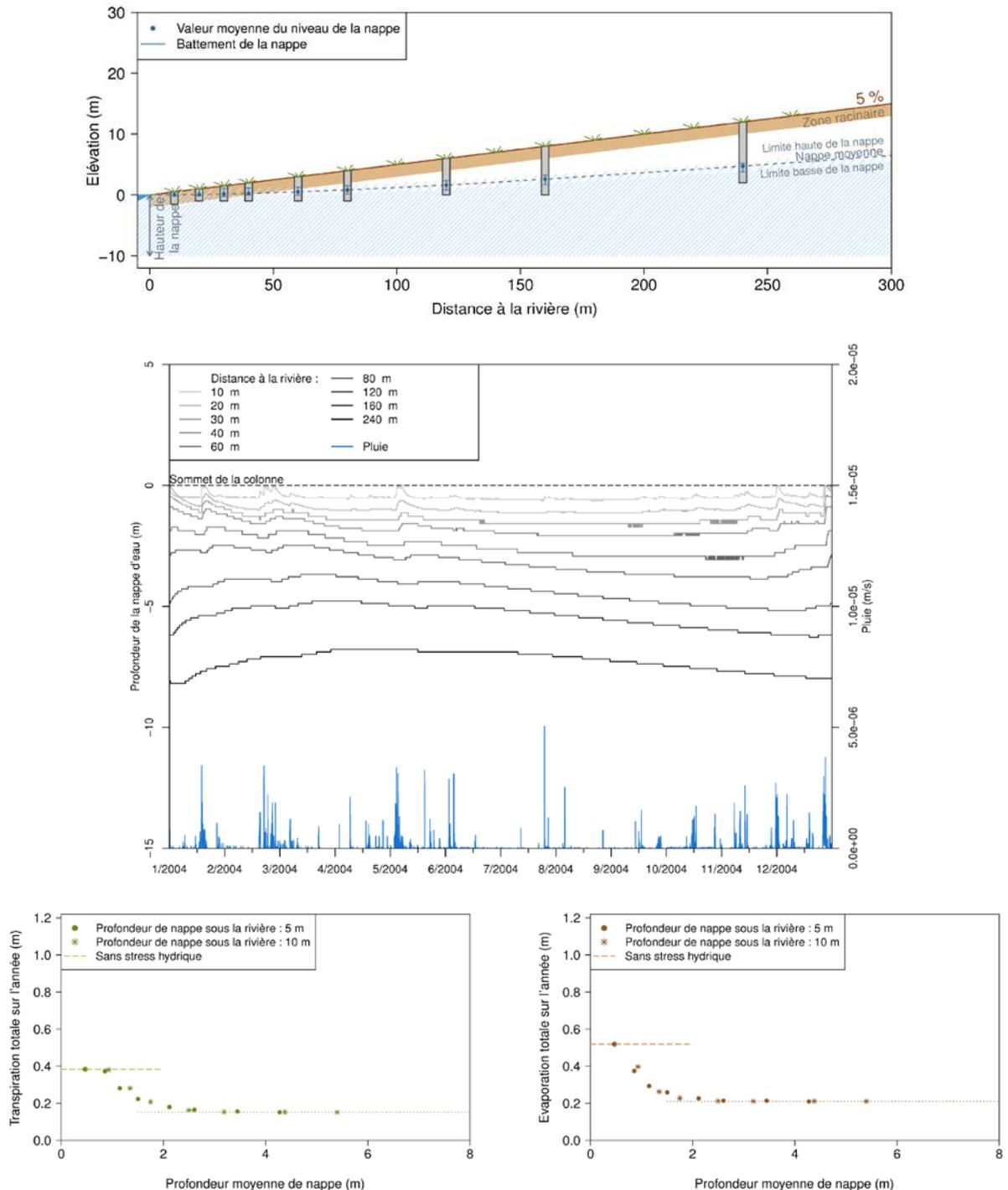


Figure 3. (haut) Schématisation de la modélisation en N colonnes 1D. (milieu) Effet de la distance au cours d'eau sur le battement de la nappe sur une année (forçage des pluies en bleu). (bas) Effet de la profondeur locale de la nappe, donc de la distance au cours d'eau sur la transpiration (en vert à gauche) et la somme transpiration + évaporation du sol (en brun à droite). D'après [21].

*V2.1 Validation/amélioration du modèle en N colonnes équivalentes.* Un des enjeux sera de valider la formulation de la décharge de la nappe (donc la pertinence de l'approximation de Boussinesq), par comparaison à des cas tests numériques de bassins 3D, pour différentes épaisseurs de nappe sous la rivière, différentes structures topographiques de bassin, et différentes structures hydrogéologiques (profils de perméabilité, superposition de plusieurs faciès, ou juxtaposition latérale comme dans le cas d'aquifères alluviaux emboîtés dans un aquifère principal). On testera aussi la réponse du modèle à différents types de forçage climatique et différents types de sol, pour terminer la validation par quelques cas réels (*cf.* V1.2).

*V2.2 Mise à l'échelle d'ORCHIDEE.* La deuxième étape consiste à passer du modèle en N colonnes indépendantes ci-dessus à une colonne de sol « équivalente » par un produit de convolution entre la fonction de distribution du paramètre de transfert  $K_s/(\omega_d \lambda^2)$  au sein du bassin et le modèle de colonne. La pertinence de cette approche sera d'abord évaluée pour différents types de régions hydro-climatiques et de bassins hydrogéologiques (sédimentaires, fracturés, etc.). Nous examinerons aussi si cette approche reste acceptable quand on poursuit l'upsaling au-delà du bassin versant vers la maille ORCHIDEE/LMDZ. Nous réfléchirons aussi à un modèle en 2 colonnes (fractions), pour valider ou modifier la paramétrisation des ES proposée en volet V1. Le meilleur modèle équivalent servira à proposer une paramétrisation des flux d'échange entre colonnes/réservoirs et cours d'eau, en fonction des paramètres physiques intervenant dans le modèle à haute résolution.

### **V3. Influence des eaux souterraines sur le climat simulé**

*Responsable : F. Chéruy (LMD), Partenaires : LMD, Sisyph*

Ce volet sera mené en couplant le modèle ORCHIDEE muni de la nouvelle paramétrisation des ES avec le modèle LMDZ, en configuration « AMIP » (SST interannuelles forcées, sans zoom, sauf si nécessaire pour la comparaison avec le V2). Nous utiliserons la nouvelle physique atmosphérique, qui décrit les liens entre couche limite convective, thermiques et nuages [16], et devrait permettre une meilleure analyse de l'influence de la disponibilité en eau des sols sur la convection et le cycle hydrologique [2]. Nous testerons aussi la sensibilité de nos résultats au déclenchement stochastique de la convection, permettant une meilleure intermittence des pluies [54]. Ce travail contribuera à régler la nouvelle physique pour la préparation de l'exercice CMIP6, en lien avec les projets LEFE/DEPHY2 et EMBRACE (Tableau 4).

*V3.1 Sensibilité du climat à différentes profondeurs de nappe.* La première action consistera en une généralisation de l'expérience réalisée en mode zoomé/guidé en Europe lors de la thèse de Campoy, en testant l'effet sur le climat global (sans zoom ni guidage) de plusieurs profondeurs de nappes fixes sur l'ensemble des continents, ce qui revient à se rapprocher de plus en plus d'une aqua-planète. Ceci permettra à Ana Schneider de se familiariser avec la modélisation du climat, et d'examiner les variations géographiques de la profondeur de nappe « seuil », en deçà de laquelle le climat régional n'est pas sensible à la présence d'une nappe. Des expériences complémentaires consisteraient aussi à ne forcer une nappe que dans une région pour voir les impacts en « aval » de la circulation générale dominante, et mieux comprendre les résultats du V3.2. Une collaboration est également en cours de montage avec Min-Hui Lo, un des pionniers de l'étude de l'influence des nappes souterraines sur le climat simulé [49][50]. Il dupliquerait les expériences idéalisées ci-dessus avec son propre modèle de nappe et le modèle atmosphérique du NCAR, afin de comparer la sensibilité de ce dernier et de LMDZ (section 5).

*V3.2 Evaluation en mode couplé.* Dès qu'une version de la paramétrisation des ES sera disponible globalement et validée en mode forcé (V1), nous étudierons ses effets sur le climat simulé, d'abord en période récente. L'analyse sera ciblée sur les mêmes zones qu'en V1.2, et complétée d'une étude globale du cycle de l'eau, de la circulation générale et des températures. Le but est

double : (i) tenter d'améliorer le climat simulé (notamment biais chauds, rayonnement, et précipitations, en termes de valeurs moyennes, patterns, saisonnalité, persistance), en améliorant l'humidité du sol et les flux de surface simulés par ORCHIDEE grâce à la nouvelle paramétrisation des ES, (ii) faire le lien entre les éventuelles améliorations (ou dégradations) et une explication en termes de processus. En particulier, si les interactions humidité du sol / précipitations jouent un rôle important dans les modèles climatiques, notamment dans les zones de transition y compris les régions de mousson [45], la bonne manière de les représenter est loin d'être claire, à l'échelle locale comme dans leurs interactions avec la circulation de grande échelle [59]. La comparaison de simulations avec et sans ES, susceptibles de différer sur l'humidité des basses couches de l'atmosphère et le cycle diurne de l'humidité du sol et des flux turbulents, pourrait éclairer les liens entre disponibilité en eau, bilan d'énergie, stabilité de la couche limite et déclenchement de la convection ; entre ces processus « locaux », et les modifications de la circulation générale et du cycle de l'eau à grande échelle (ceintures pluvieuses des moyennes latitudes et zone de convergence inter-tropicale) ; enfin entre persistance des événements pluvieux et non pluvieux et persistance de l'humidité des sols.

*V3.3 Changement climatique.* Chronologiquement, la dernière action de ce volet visera à évaluer l'effet des ES dans le cadre du changement climatique futur causé par les émissions anthropiques. Nous aborderons deux questions complémentaires :

1. Quel est l'effet des eaux souterraines sur l'évolution future du climat ? En effet, la modulation de la capacité évaporative par les nappes est susceptible de modifier le déroulement du changement climatique, notamment en termes d'amplitude du réchauffement régional [35], et de régime des précipitations. Dans la continuité du volet V3.2, nous comparerons des paires de simulations à SST forcée pour le climat récent et futur, avec et sans paramétrisation des ES, pour évaluer les éventuels effets de ces dernières sur les changements de moyenne et variabilité des principales variables d'intérêt.
2. Quel est l'impact du changement climatique sur les ressources en eau (ES et débits, que les ES alimentent partiellement par le débit de base) ? La prise en compte des ES peut notamment modifier l'effet du changement climatique sur l'évolution des hauts et bas débits (crues et étiages), qui sont des variables clés de la vulnérabilité des sociétés humaines au changement climatique [6][12]. Plus indirectement, si les ES peuvent influencer le changement climatique (*cf.* ci-dessus), d'éventuelles modifications de leur niveau par adaptation des prélèvements anthropiques au nouveau contexte climatique pourraient alors induire des rétroactions sur l'évolution du système climatique, positives ou négatives selon les cas (irrigation ou pas). Ce dernier point ne sera pas abordé dans ce projet, mais en est une perspective importante (*cf.* V4.3 et section 3).

#### **V4. Acquisition et traitement de données**

*Responsable : A. Baro (Sisyphé), Partenaires : Sisyphé, LMD, LSCE*

*V4.1* Le projet repose sur un important travail de collecte et traitement de données dédiées au développement de la paramétrisation des ES, dans un système d'information géographique (SIG ; licence ArcGIS disponible à Sisyphé) :

- Bases de données hydrogéologiques à couverture globale, notamment [36][39] [42][58] : séparation des formations aquifères, en s'inspirant de [61] ; identification des paramètres hydrodynamiques
- Topographie à haute résolution (modèles numériques de terrain, *e.g.* HydroSHEDS à 250 m de résolution) : construction des réseaux hydrographiques, identification des « fractions potentiellement humides » dans les mailles ORCHIDEE en fonction des résultats du V1 et V2
- Niveaux et/ou profondeurs piézométriques : données de réseaux nationaux, en France et ailleurs [40][41] ; résultats de modèles [41][61]

V4.2 Pour mémoire, nous exploiterons aussi de nombreuses données déjà disponibles à l'IPSL, que nous compléterons éventuellement sur la période la plus récente :

- Données de forçage d'ORCHIDEE dans différentes configurations spatiales, du local au global : variables atmosphériques de proche-surface ; distribution et propriétés de la végétation et des sols.
- Données de validation d'ORCHIDEE et LMDZ à grande échelle : débits, gravimétrie spatiale GRACE [11][24] ; cartes des zones inondées et des zones humides [26] ; données d'ET et d'humidité de surface issues de la télédétection (dont SMOS) ; données climatiques (température atmosphérique à 2m, précipitations, rayonnement)
- Données de validation d'ORCHIDEE et LMDZ à l'échelle locale : SIRTA et observatoires atmosphériques similaires (*e.g.* Cabauw, ARME) ; sites Fluxnet et LBA-DMIP en Amazonie, dont certains avec des mesures de profils d'humidité.

V4.3 Enfin, nous souhaitons initier la constitution d'une base de données mondiale sur les prélèvements anthropiques dans les eaux souterraines et de surface [44][57], qui servent à différents usages potentiellement conflictuels en cas de pénurie d'eau (alimentation en eau potable, agriculture et irrigation, débits réservés pour les systèmes naturels et production électrique). L'objectif est de pouvoir ultérieurement analyser l'impact de ces prélèvements sur l'évolution des débits voire du climat : rétrospectivement pour une meilleure attribution des changements passés [31] ; mais aussi dans le futur pour mieux caractériser l'impact du changement climatique sur les ressources en eau souterraines, et leur potentialité à soutenir les prélèvements, en lien avec les questions d'adaptation.

### 2.3 Partenariat

Une des forces du projet GEM vient de la collaboration de trois équipes thématiquement complémentaires (Tableau 2), ayant à la fois des compétences fortes et reconnues (section 6.1, Tableau 4), mais aussi une réelle pratique interdisciplinaire dans leur périmètre scientifique :

- hydrologie & hydrogéologie à Sisyphe (équipe « HYDRO »),
- modélisation hydrogéologique au LSCE (équipe « Hydrologie continentale »),
- climat & cycle de l'eau au LMD (équipe « Modélisation du Climat et Changement Climatique »).

Les trois équipes partenaires ont aussi en commun la culture de la modélisation numérique, avec une contribution forte au développement de plusieurs modèles exploités dans ce projet :

- le modèle atmosphérique LMDZ, au LMD (Chéruy, Ghattas, Hourdin),
- le modèle de surface continentale ORCHIDEE, en collaboration entre le LMD (Polcher, Ghattas, Chéruy) et le LSCE (Ottlé), et Sisyphe (Ducharne, historiquement par sa thèse au LMD, et depuis 2010 comme membre du groupe projet ORCHIDEE),
- la plateforme numérique CAST3M (<http://www-cast3m.cea.fr>) pour la simulation hydrologique et hydrogéologique de surfaces continentales et/ou réservoirs souterrains, au LSCE (Mouche, Mügler).

Enfin, un autre gros atout du projet GEM est de s'appuyer sur deux thèses, conçues conjointement pour être complémentaires, et qui débiteront toutes deux en octobre 2013 pour 3 ans :

- la thèse d'Ana Schneider (Vers une modélisation simple et flexible des nappes souterraines pour l'échelle globale, UPMC, co-encadrée par Ducharne et Jost) contribuera à 100% au projet GEM
- la thèse de Mathilde Maquin (Mise à l'échelle d'un modèle hydrologique distribué pour les modèles globaux de surface, UPSud, co-encadrée par Mouche et Mügler) vise à comparer différentes techniques de changement d'échelle, celle du modèle de colonne équivalente retenu dans ce projet (V1), mais aussi d'autres approches comme l'upscaling numérique, l'approche multi-milieux, etc. Elle contribuera à 50% au projet GEM.

Tableau 2. Liste des participants et implications dans les différents volets du projet et sa coordination.

Participants	Statut	Spécialités (en plus de modélisation)	ETP/an	V1	V2	V3	V4	Coord.
<b>Sisyphé</b>			<b>170%</b>					
Ducharne, A.	DR2 CNRS	Hydrologie, processus de surface, climat	35%	x	x	x	x	x
Jost, A.	MCF UPMC	Hydrogéologie, géologie	15%	x	x	x	x	
Baro, A.	IE2 CNRS	Systèmes d'information géographique	20%				x	
Schneider, A.	Doctorante	Hydrogéologie, hydrologie	100%	x	x	x	x	
<b>LSCE</b>			<b>100%</b>					
Mouche, E.	IR CEA (HDR)	Hydrogéologie, hydrologie	20%	x				x
Mügler, C.	IR CEA (HDR)	Hydrogéologie, transport réactif	25%	x	x			
Ottlé, C.	DR2 CNRS	Processus de surface, télédétection	5%		x	x	x	
Maquin, M.	Doctorante	Hydrogéologie	50%	x	x		x	
<b>LMD</b>			<b>60%</b>					
Chéruy, F.	CR1 CNRS	Climat, couche limite	25%		x	x		x
Ghattas, J.	IR2 CNRS	Informatique, gestion de codes	20%		x	x	x	
Polcher, J.	DR2 CNRS	Processus de surface, hydrologie, climat	10%		x	x		
Hourdin, F.	DR2 CNRS	Climat, méthodes numériques	5%			x		

### 3. Résultats attendus

- Cognitifs : meilleure identification du rôle des eaux souterraines dans le système climatique : climat récent et sensibilité climatique
- Développement du modèle du système Terre IPSL-CM : réduction du biais estival chaud/sec, circulation générale, cycle de l'eau, événements extrêmes, variabilité aux longues échelles de temps
- Développement et discussion de méthodes de changement d'échelle, qualification et validation sur bassins réels.
- Constitution d'une base de données hydrogéologique (caractéristiques des aquifères, niveaux et/ou profondeurs piézométriques, topographie, prélèvements), mise à disposition en fonction des contraintes imposées par les fournisseurs des données
- Valorisation : publications et conférences
- Renforcement de la thématique de l'hydrogéologie au sein de l'IPSL et de la communauté ORCHIDEE

Les développements initiés dans le projet GEM offrent aussi des nombreuses perspectives, qui pourront être développées dans les projets ultérieurs : transport souterrain vers les zones côtières et les océans (carbone inorganique dissous, N, Si traceurs minéraux ou isotopes), par extension du module de traceurs développé par Camille Risi (LMD) dans le modèle LMDZ/ORCHIDEE, ce qui pourrait permettre une meilleure identification des trajets de l'eau en souterrain ; description cohérente des zones humides et lacs dans ORCHIDEE, en contexte paléoclimatique [3][18] ou en lien avec la fonte du pergélisol (thermokarsts) et la libération méthane [26]; prise en compte des prélèvements souterrains et impacts sur l'évolution des débits et du climat.

### 4. Ressources nécessaires à la réalisation du projet

La demande financière concerne en priorité le fonctionnement de deux thèses qui basent le projet (section 5), et dans une moindre mesure celui des permanents impliqués. La subvention demandée au programme LEFE est de **51 k€** (Tableau 3) et se justifie comme suit :

- *Equipements disponibles pour la réalisation du projet* : les différentes équipes bénéficient des moyens communs disponibles dans les laboratoires, à l'IPSL, et à l'IDRIS (gestion, fonctionnement général, ressources informatiques), mais déposent une demande pour les moyens spécifiques au projet et à l'environnement des 2 thèses.
- *Instruments, équipements ou services d'observation nationaux sollicités* : non

Tableau 3. Tableau récapitulatif du budget, en cohérence avec le formulaire en ligne.

En k€	Coût total	Cofinancements						Total demande INSU : LEFE/IMAGO		
		Acquis année 1	Acquis année 2	Acquis année 3	Demandés année 1	Demandés année 2	Demandés année 3	Demande INSU année 1	Demande INSU année 2	Demande INSU année 3
Moyens nationaux	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Personnel permanent	393.3	131.1	131.1	131.1	0	0	0	0	0	0
Personnel temporaire	146.6	48.8	48.8	48.8	0	0	0	0	0	0
Fonctionnement										
- Consommables...	11.5	0	0	0	0	0	0	4.5	5	2
- Petit équipement	8	0	0	0	0	0	0	8	0	0
- Missions	22.5	0	0	0	0	0	0	3.5	7	12
- Publications	9	0	0	0	0	0	0	1	3	5
- Analyses	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Equipement > 15 k€	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- *Fonctionnement* :
  - base forfaitaire de 3k€ par ETP plein sur 3 ans, pour consommables, petit matériel informatique type disques durs, livres, licences, frais d'impression, etc.
  - base forfaitaire de 3k€ par laboratoire pour frais de publication, estimés à 1.5 k€ par article
  - 2×1 k€ à Sisyphe pour 2 formations (SIG pour A. Schneider, géostatistiques pour A. Baro)
- *Missions* :
  - base forfaitaire de 5 k€ par ETP plein sur 3 ans, pour 2 congrès internationaux et 2 missions en France (colloque, collaboration hors projet, etc.)
  - base forfaitaire de 4 k€ par doctorant à temps plein pour les missions du jury de thèse, en dernière année
- *Petit équipement (Inférieur à 15k€)*
  - 1 PC en première année, estimé à 2 k€, pour chacune des doctorantes, pour Jan Polcher suite à son retour de détachement à l'étranger, et pour Anne Jost (jouvence).
- *Equipement (Supérieur à 15k€)* : aucun.

## 5. Co-financements acquis ou soumis (hors INSU)

Le Tableau 3 récapitule le budget consolidé du projet GEM (en k€) :

Coût total sur 3 ans :	590.9 = 100%
Personnel permanent (INSU) :	393.3 = 66%
Total cofinancements acquis :	146.6 = 25%
Total demande INSU :	51.0 = 9%

Le cofinancement déjà acquis correspond à 2 bourses de thèse, déjà présentées en section 2.3 :

- thèse d'Ana Schneider à 100%, financée par la KIC Climat via l'ED 398 « Géosciences et Ressources Naturelles » (UPMC)
- thèse de Mathilde Maquin à 50%, financée par l'ED 534 « Modélisation et Instrumentation en Physique, Energies, Géosciences et Environnement » (UPSud).

Enfin, dans le cadre du volet V3, une collaboration internationale est prévue avec Min-Hui Lo (Assistant professor, Department of Atmospheric Science, National Taiwan University). Un soutien complémentaire sera demandé à la Fédération IPSL, ou à l'ANR via les projets franco-taiwanais (prochain dépôt pour avril 2014), pour d'éventuelles missions à/de Taiwan, mais il n'est pas mentionné dans le budget consolidé, car non essentiel et encore incertain.

## 6. Valorisation des travaux antérieurs

### 6.1 Références bibliographiques des proposant en lien avec le sujet

La liste ci-dessous est une sélection des publications qui éclairent la participation des différents proposant au projet GEM, et compte 22 articles parus ou à paraître au cours des quatre dernières années.

- [1] Campoy, **Ducharne**, **Chéruy**, **Hourdin**, **Polcher**, Dupont (2013). Response of land surface fluxes and precipitation to different soil bottom hydrological conditions in a general circulation model. *JGR-Atmospheres*, in press.
- [2] **Chéruy**, Campoy, Dupont, **Ducharne**, **Hourdin**, Haeffelin, Chiriaco, Idelkadi (2013). Combined influence of atmospheric physics and soil hydrology on the simulated meteorology at the SIRTAs atmospheric observatory. *Clim. Dyn.*, 40, 2251-2269.
- [3] Contoux, **Jost**, Ramstein, Sepulchre, Krinner, Schuster (2013). Impact of the Megalake Chad on climate and vegetation during the late Pliocene and the mid-Holocene. *Clim. Past*, 9, 1417-1430.
- [4] de Rosnay, **Polcher**, Bruen, Laval (2002). Impact of a physically based soil water flow and soil-plant interaction representation for modeling large-scale land surface processes. *JGR*, 107(D11):4118.
- [5] **Ducharne**, Golaz, Leblois, Laval, **Polcher**, Ledoux, de Marsily (2003). Development of a High Resolution Runoff Routing Model, Calibration and Application to Assess Runoff from the LMD GCM. *J. Hydrology*, 280: 207-228.
- [6] **Ducharne**, et 16 coauteurs (2007). Long term prospective of the Seine River system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, 375, 292-311.
- [7] Dufresne et 60 coauteurs dont **Chéruy**, **Ghattas**, **Hourdin**, **Polcher** (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5, *Clim. Dyn.*, 40, 2123-2165.
- [8] Harel, **Mouche** (2013a). 1D steady state runoff production in light of queuing theory: heterogeneity, connectivity and scale, *Water Resour. Res.*, in revision.
- [9] Harel, **Mouche** (2013b). Connectivity of runoff patterns generated on 2D heterogeneous soils”, *Earth and Planetary Science Letters*, in revision.
- [10] Gascoin, **Ducharne**, Ribstein, Carli, Habets (2009). Adaptation of a catchment-based land surface model to the hydrogeological setting of the Somme River basin (France). *J. Hydrology*, 368, 105-116.
- [11] Grippa, Kergoat, Frappart, Araud, Boone, Rosnay, Lemoine, Gascoin, Balsamo, **Ottlé**, Decharme, Saux-Picart, Ramillien (2011). Land water storage variability over West Africa estimated by Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) and land surface models, *WRR*, 47, W05549.
- [12] Guimberteau, Ronchail, Espinoza, Lengaignel, Sultan, **Polcher**, Drapeau, Guyot, **Ducharne**, Ciais (2013). Future changes in precipitation and impacts on seasonal extreme streamflows over Amazonian sub-basins. *ERL*, 8, 014035 (13pp).
- [13] Guimberteau, Laval, Perrier, **Polcher** (2012). Global effect of irrigation and its impact on the onset of the Indian summer monsoon, *Clim. Dyn.*, 39, 1329-1348.
- [14] Habets, Gascoin, Korkmaz, Thiéry, Zribi, **Ottlé**, Amraoui, Carli, **Ducharne**, Leblois, Ledoux, Martin, Noilhan, Viennot (2010). Multi-model simulation of a major flood in the groundwater-fed basin of the Somme River (France), *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 99-117.
- [15] Haddeland et 25 coauteurs dont **Polcher** (2011). Multi-Model Estimate of the Global Terrestrial Water Balance: Setup and First Results, *Journal of Hydrometeorology*, 12, 869-884.
- [16] **Hourdin** et 13 coauteurs dont **Chéruy** (2013). LMDZ5B: the atmospheric component of the IPSL climate model with revisited parameterizations for clouds and convection *Clim. Dyn.*, 40, 2193-2222.
- [17] **Jost**, Lunt, Kageyama, Abe-Ouchi, Peyron, Valdes, Ramstein (2005). High-resolution simulations of the last glacial maximum climate over Europe: a solution to discrepancies with continental palaeoclimatic reconstructions? *Clim. Dyn.*, 24, 577-590.
- [18] **Jost**, Violette, Gonçalves, Ledoux, Guyomard, Guillocheau, Kageyama, Ramstein, Suc (2007). Long-term hydrodynamic response induced by past climatic and geomorphologic forcing, *The Physics and Chemistry of the Earth*, 32, 368-378.
- [19] Koster, Suarez, **Ducharne**, Praveen, Stieglitz (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 1: Model structure, *JGR*, 105 (D20): 24809-24822.
- [20] Krinner, Viovy, de Noblet-Ducoudré, Ogée, **Polcher**, Friedlingstein, Ciais, Sitch, Prentice (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere biosphere system. *GBC*, 19, GB1015.

- [21] **Maquin** (2013). *Interaction entre une nappe souterraine et un couvert végétal : Modélisation et études de cas*. Rapport de stage du M2 « Génie Civil - Géotechnique, Eaux, Risques », Ecole des Mines de Nancy / Université de Lorraine, 78 pp.
- [22] **Mouche**, Hayek, **Mügler** (2010). Upscaling of CO<sub>2</sub> vertical migration through a periodic layered porous medium: The capillary-free and capillary-dominant cases, *Adv. Water Res.*, 33, 1164–1175.
- [23] **Mouche**, Ribolzi, **Mügler**, Valentin (2013). Impact of land use change on the hydrology of North Lao PDR watersheds, *J. Hydrology*, soumis.
- [24] Ngo-Duc, Laval, Ramillien, **Polcher**, Cazenave (2007). Validation of the land water storage simulated by ORCHIDEE with Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data. *WRR*, 43:W04427.
- [25] **Ottlé**, Lescure, Maignan, Poulter, Wang, Delbart (2013). Use of various Remote Sensing Land Cover products for PFT mapping over Siberia, *Earth System Science Data*, in discussion.
- [26] Ringeval, Decharme, Piao, Ciais, Papa, de Noblet, Prigent, Friedlingstein, Gouttevin, Koven, **Ducharne** (2012). Modelling sub-grid wetland in the ORCHIDEE global land surface model: evaluation against river discharges and remotely sensed data. *GMD*, 5, 941-962.
- [27] Ribolzi, Patin, Bresson, Latschack, **Mouche**, Sengtaheuanghong, Silvera, Thiébaux, Valentin (2011). Impact of slope gradient on soil surface features and infiltration on steep slopes in northern Laos, *Geomorphology*, 127(1), 56-63.
- [28] Rivière, Gonçalves, **Jost**, Font (2013) Experimental and numerical assessment of stream-aquifer exchanges during disconnection. *J. Hydrology*, in revision.
- [29] Saleh, Flipo, Habets, **Ducharne**, Oudin, Viennot, Ledoux (2011). Impact of in-stream water level fluctuations on interactions between streams and aquifer units at the regional scale. *J. Hydrology*, 400, 490-500.
- [30] Seneviratne et 18 coauteurs dont **Chéruy**, **Ducharne**, **Ghattas** (2013). Impact of soil moisture-climate feedbacks on CMIP5 projections: First results from the GLACE-CMIP5 experiment. *GRL*, accepté.
- [31] Sterling, **Ducharne**, **Polcher** (2013). The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change*, 3, 385-390.

## 6.2 Liste des contrats obtenus au cours des quatre dernières années

Le Tableau 4 présente les projets gérés par les équipes proposantes depuis 2009, qui montre le dynamisme des proposants dans la communauté nationale et internationale, et atteste aussi que les implications en ETP mentionnées au Tableau 2 seront effectivement réalisées. Le projet GEM s'inscrit dans la continuité du projet HYDROSOL qui a financé la thèse de Campoy, et il présente des liens forts avec le projet DEPHY2 soumis au programme LEFE 2014 et les projets européens EMBRACE, AMAZALERT, et earth2Observe. Dans le cadre de ces projets, les proposants LMD et Sisyphe visent en effet à évaluer / améliorer l'hydrologie d'ORCHIDEE : en mode couplé pour les deux premiers, en lien avec les interactions surface/atmosphère ; en mode forcé pour les deux derniers, avec un focus sur l'Amazonie d'une part, et sur l'humidité du sol par comparaison aux produits de la télédétection spatiale, notamment SMOS.

## 7. Compléments

Le projet GEM est innovant par les thématiques abordées, mais il ne présente pas de risque majeur. En effet, la faisabilité technique n'est pas un enjeu, du fait notamment de l'historique de collaboration des équipes, commencée en 2009 avec le projet HYDROSOL entre Sisyphe et le LMD, et lors du stage de M2 de Mathilde Maquin en 2013 entre Sisyphe et le LSCE. L'implication de deux doctorantes et de leurs encadrants est une garantie supplémentaire de l'obtention de résultats et de leur valorisation. Finalement, le principal risque serait de démontrer que les eaux profondes n'ont pas d'impact important sur le climat, ce qui serait en fait un résultat majeur au vu des orientations actuelles de la communauté des modèles de surface continentale (section 1.2).

Titre	Programme	Années	Participants	Crédits	Publications
<b>DEPHY2</b> : Développement et Evaluation PHYsiques des modèles atmosphériques, Phase 2	INSU/LEFE	Soumis (3 ans)	Chéruy 40% Hourdin 40% Ducharne 10%	46kE/an	
<b>H-CUBE</b> : Hydrodynamique, Hétérogénéité, et Homogénéisation en modélisation de stockage de CO2 en aquifère salin	ANR SEED	2013-2017 (4 ans)	Mouche 25%	144 kE	
<b>TectEasy</b> : Combined effects of tree plantation expansion and climate change on the hydro-sedimentary functioning of tropical mountain watersheds	ANR Agro-biosphère	2013-2016 (3 ans)	Mouche 20% Mügler 15%	33 kE	
<b>earth2observe</b> : Global Earth Observation for integrated water resource assessment	FP7	2013-2017 (4 ans)	Polcher 20% Ducharne 10%	Négociation (1 post-doc)	
<b>EMBRACE</b> : Earth system Model Bias Reduction and assessing Abrupt Climate change	FP7	2011-2015 (4 ans)	Chéruy 10% Ducharne 10%	150 kE	[30]
<b>AMAZALERT</b> : Raising the alert about critical feedbacks between climate and long-term land use change in the Amazon	FP7	2011-2014 (3 ans)	Ducharne 10%	300 kE	[12]
<b>Interfaces nappe-rivière</b>	PIREN-Seine	2011-2014 (4 ans)	Jost 20% Ducharne 5%	50 kE	[29]
<b>CHARM</b> : Couplages Hydrologie / Atmosphère à l'échelle Régionale et Mondiale : Forces et faiblesses dans le modèle du système Terre de l'IPSL	Labex L-IPSL	2012-2013 (1 an)	Ducharne* Chéruy* Hourdin	17 kE	
<b>ALMIP2</b> : AMMA Land Surface Model Intercomparison Project Phase 2	INSU/EC2CO	2012-2013 (2 ans)	Ducharne Ottlé	5 kE	
<b>Ruissalea</b> : Production de ruissellement sur une surface à infiltrabilité aléatoire	INSU/EC2CO	2012-2013 (2 ans)	Mouche	17 kE	[8][9]
<b>DEPHY</b> : Développement et Evaluation PHYsiques des modèles atmosphériques	INSU/LEFE	2010-2013 (4 ans)	Chéruy Hourdin	90 kE	[2][7][16]
<b>Dynamique du pergélisol et impacts hydrogéologiques</b> : caractérisation numérique et physique	INSU/EC2CO	2010-2011 (2 ans)	Jost*	54 kE	[28]
<b>PASTEK</b> : Impact des changements globaux sur le soutien hydrologique du Mékong	GIS Climat	2010-2012	Mouche Mügler	127 kE	[23][27]
<b>HYDROSOL</b> : Influence de l'hydrodynamique du sol sur la modélisation du changement climatique régional et de ses impacts sur les ressources en eau	R2DS IdF	2009-2012 (3 ans)	Ducharne* Chéruy Hourdin	113 kE	[1][2]
<b>WATCH</b> : Water and Global Change	FP6	2007-2011 (4 ans)	Polcher	255 kE	[15]

Tableau 4. Principaux contrats obtenus depuis 2009. La coordination d'un projet apparaît par un astérisque (\*).

## 8. Références bibliographiques externes

- [32] Anyah, Weaver, Miguez-Macho, Fan, Robock (2008). Incorporating water table dynamics in climate modeling: 3. Simulated groundwater influence on coupled land-atmosphere variability, *J. Geophys. Res.*, 113, D07103.
- [33] Beven, Kirkby (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24:43-69.
- [34] Bierkens, van den Hurk (2007). Groundwater convergence as a possible mechanism for multi-year persistence in rainfall, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02402.
- [35] Boberg, Christensen (2012). Overestimation of Mediterranean summer temperature projections due to model deficiencies. *Nature Climate Change*, 2, 433–436.
- [36] Comunian, Renard (2009). Introducing whyda : a world-wide collaborative hydrogeological parameters database. *Hydrogeology Journal*, 17(2):481-489.
- [37] de Marsily (1995). *L'eau*. Collection Dominos, Flammarion.
- [38] Dirmeyer, Schlosser, Brubaker (2009). Precipitation, recycling, and land memory: An integrated analysis, *Journal of Hydrometeorology*, 10 (1), 278-288.
- [39] Dürr, Meybeck, Dürr (2005). Lithologic composition of the Earth's continental surfaces derived from a new digital map emphasizing riverine material transfer. *GBC*, 19(4):GB4S10.
- [40] Fan, Miguez-Macho, Weaver, Walko, Robock (2007). Incorporating water table dynamics in climate modeling: 1. Water table observations and equilibrium water table simulations. *JGR*, 112:D10125.
- [41] Fan, Li, Miguez-Macho (2013). Global Patterns of Groundwater Table Depth. *Science*, 339, 940-943.

- [42] Gleeson, Smith, Moosdorf, Hartmann, Dürr, Manning, van Beek, Jellinek (2011). Mapping permeability over the surface of the Earth. *GRL*, 38(2):L02401.
- [43] Kollet, Maxwell (2008). Capturing the influence of groundwater dynamics on land surface processes using an integrated, distributed watershed model. *WRR*, 44(2):W02402.
- [44] Konikow (2011). Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea-level rise, *GRL*, 38, L17401.
- [45] Koster et al. (2004). Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation, *Science*, 305, 1138–1140.
- [46] Lehner, Döll (2004). Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *J. Hydrology*, 296(1-4):1-22.
- [47] Leung, Huang, Qian, Liang (2011). Climate-soil-vegetation control on groundwater table dynamics and its feedbacks in a climate model. *Clim. Dyn.*, 36(1):57-81.
- [48] Liang, Xie, Huang (2003). A new parameterization for surface and groundwater interactions and its impact on water budgets with the variable infiltration capacity (VIC) land surface model. *JGR*, 108(D16):8613-8629.
- [49] Lo, Famiglietti (2010), The Effect of Water Table Dynamics on Land Surface Hydrologic Memory. *J. Geophys. Res.*, 115, D22118.
- [50] Lo, Famiglietti (2011), Precipitation response to land subsurface hydrologic processes in atmospheric general circulation model simulations, *J. Geophys. Res.*, 116, D05107.
- [51] Mahanama, Koster (2003). Intercomparison of soil moisture memory in two land surface models. *J. Hydrometeorology*, 4:1134-1146.
- [52] Maxwell, Chow, Kollet (2007). The groundwater–land-surface–atmosphere connection: Soil moisture effects on the atmospheric boundary layer in fully-coupled simulations, *Adv. Wat. Res.*, 30, 2447-2466.
- [53] Miguez-Macho, Fan, Weaver, Walko, Robock (2007). Incorporating water table dynamics in climate modeling: 2. formulation, validation, and soil moisture simulation. *JGR*, 112(D13):D13108.
- [54] Rochetin, Grandpeix, Rio, Couvreur (2013). Deep convection triggering by boundary layer thermals. Part 2: Stochastic triggering parametrization for the LMDZ GCM, *J. Atmos. Sci.*, accepted.
- [55] Schär, Lüthi, Beyerle, Heise (1999). The soil-precipitation feedback: A process study with a regional climate model, *J. Climate*, 12 (3), 722-741.
- [56] Seneviratne, Corti, Davin, Hirschi, Jaeger, Lehner, Orlowsky, Teuling (2010). Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review, *Earth-Science Reviews*, 99, 125-161.
- [57] Shiklomanov, Rodda et al. (2003). *World water resources at the beginning of the twenty-first century*. Cambridge University Press Cambridge, UK.
- [58] Strückmeier, Richts (2008). Groundwater Resources Map of the World 1:25,000,000. BGR & UNESCO.
- [59] Taylor, de Jeu, Guichard, Harris, Dorigo (2012). Afternoon rain more likely over drier soils. *Nature*, 489, 423-426.
- [60] Therrien, McLaren, Sudicky, Panday (2010). HydroGeoSphere: A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. Manual, Groundwater Simulation Group, University of Waterloo, Canada 469 pp.
- [61] Vergnes, Decharme (2012). A simple groundwater scheme in the TRIP river routing model: global off-line evaluation against GRACE terrestrial water storage estimates and observed river discharges. *HESS*, 16, 3889-3908.
- [62] York, Person, Gutowski, Winter (2002). Putting aquifers into atmospheric simulation models: an example from the Mill Creek watershed, northeastern Kansas. *Adv. in Wat. Res.*, 25(2):221-238.

## Annexe. Résumé

Le projet GEM vise une description cohérente du rôle des eaux souterraines (ES) dans la dynamique du système Terre. Elles constituent en effet 30% des ressources en eau douce exploitables actuellement, avec des temps de résidence importants, permettant de tamponner les contrastes saisonniers des débits mais pouvant aussi de renforcer la variabilité interannuelle. Là où elles sont suffisamment proches de la surface continentale, les ES peuvent aussi augmenter l'humidité des sols et l'évapotranspiration (ET), avec un impact possible sur les températures et les précipitations, en terme de valeurs moyennes mais aussi de variabilité (cycle diurne et déclenchement de la convection, persistance des événements extrêmes, variabilité interannuelle). Elles pourraient même influencer l'évolution du climat sous l'effet de l'augmentation des gaz à effet de serre, notamment l'amplitude du réchauffement régional (sensibilité climatique).

Le partenariat élaboré pour mener ce projet rassemble des compétences pluridisciplinaires sur les processus impliqués (hydrogéologie, hydrologie, processus de surface, couche limite, physique du climat) et leur modélisation, via trois équipes complémentaires rattachées à l'IPSL, à l'UMR Sisyphe, au LSCE et au LMD. Il bénéficie aussi deux thèses, conçues pour être complémentaires, et qui débiteront toutes deux en octobre 2013 pour 3 ans. Dans ce cadre, nous cibons le modèle du système de Terre de l'IPSL, et plus particulièrement le couplage du modèle atmosphérique LMDZ avec le modèle de surface continentale ORCHIDEE, à l'échelle planétaire, et nous proposons un plan de recherche en 4 volets.

Le volet V1 vise à développer une paramétrisation des ES suffisamment simple et flexible pour décrire des nappes là où elles existent et avec des propriétés relativement réalistes, en profitant des nombreuses données disponibles avec une couverture globale (caractéristiques hydrogéologiques, topographie, zones humides, etc.). On vise notamment une description cohérente des temps de résidence et de la profondeur de la nappe, identifiée comme une variable clé des interactions nappes / surface / climat. A la résolution typique d'un modèle du système Terre (mailles de 100 km de côté ou plus), on ne peut cependant pas supposer que cette profondeur est uniforme dans l'espace, et nous proposons une paramétrisation sous-maille, introduisant une fraction de maille « humide », alimentée par la convergence des ES du reste de la maille, et où la nappe est suffisamment proche de la surface pour alimenter l'humidité du sol. Ces développements seront guidés par une évaluation approfondie du fonctionnement des surfaces continentales (hydrologie, flux turbulents) en mode forcé par des données atmosphériques, et par un travail en parallèle sur le changement d'échelle à l'aide d'un modèle hydrogéologique discrétisé en colonnes 1D (volet V2). Ce dernier servira à identifier des configurations équivalentes à l'échelle de la maille ORCHIDEE/LMDZ, en termes de subdivision de l'espace, processus / équations, et paramètres associés, pour enrichir ou faire évoluer le volet V1. Le volet V3 examinera l'influence des ES sur le climat simulé, en commençant par des expériences idéalisées de sensibilité à plusieurs profondeurs de nappe fixes sur l'ensemble des continents. Il s'agira ensuite de comparer des simulations LMDZ/ORCHIDEE avec et sans la paramétrisation des ES développée par les volets V1 et V2 : d'abord en climat récent pour valider l'approche et tenter de faire le lien entre les éventuelles améliorations (ou dégradations) et une explication en termes de processus ; puis en changement climatique, pour examiner comment la nouvelle paramétrisation est susceptible de modifier la trajectoire de ce dernier, et son impact sur les ressources en eau. Enfin, l'ensemble du projet repose sur un important travail de collecte et traitement de données (volet V4) : données hydrogéologiques et topographiques dédiées au développement de la paramétrisation des ES ; données de forçage d'ORCHIDEE et de validation ; données mondiale sur les prélèvements anthropiques dans les eaux souterraines et de surface, pour pouvoir ultérieurement analyser l'impact de ces prélèvements sur l'évolution des débits voire du climat.