

# R2DS

## Réseau de recherche sur le développement soutenable

### Projets 2009

HYDROSOL  
Influence de l'hydrodynamique du sol sur la modélisation du changement  
climatique régional et de ses impacts sur les ressources en eau

Projet coordonné par A. Ducharne, UMR 7619 Sisyphe, Paris

30 mars 2009

# FICHE PROJET

NB : les références bibliographiques sont détaillées en section 3.2.10 pour les publications des partenaires liées directement au projet, et sinon en note de bas de page.

## 3.1 Fiche résumée (2 pages maximum)

TITRE DU PROJET :

**HYDROSOL : Influence de l'hydrodynamique du sol sur la modélisation du changement climatique régional et de ses impacts sur les ressources en eau**

1. Coordonnateur responsable du projet :

Nom : DUCHARNE, Agnès

Fonction : CRI CNRS

Institution / Laboratoire : UMR 7619 Sisyphe (CNRS – UPMC – EPHE)

Adresse postale : UPMC Case 105, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05

Téléphone : 01 44 27 51 27

Fax : 01 44 27 45 88

Email : [Agnès.Ducharne@upmc.fr](mailto:Agnès.Ducharne@upmc.fr)

Nom du directeur du laboratoire : Pierre RIBSTEIN

2. Tutelle du laboratoire choisie comme organisme gestionnaire du contrat : CNRS

3. Personne contact dans la tutelle gestionnaire :

Nom : HAMON Ludovic

Fonction : Responsable du Service du partenariat et de la Valorisation

Adresse postale : 16 Rue Pierre et Marie Curie - 75005 PARIS

Téléphone : 01 42 34 94 17

Fax : 01 42 34 95 08

Email : [spv@dr2.cnrs.fr](mailto:spv@dr2.cnrs.fr)

4. Partenaires (institutions, entreprises...) du projet en Ile-de-France

Laboratoire partenaire n°1 : UMR 7619 Sisyphe (CNRS – UPMC – EPHE)

Laboratoire partenaire n°2 : IPSL : Laboratoire de Météorologie Dynamique, UMR 8539 (CNRS – UPMC – ENS – X – CNES) ; SIRTa (Site Instrumenté de Palaiseau)

Laboratoire partenaire n°3 : UMR EGC (INRA – AgroParisTech)

Laboratoire partenaire n°4 : Cemagref Antony, unité HBAN

5. Autres partenaires non franciliens : non

6. Objectifs du projet (résumé) : techniques, économiques, sociétaux

La dynamique des flux d'eau dans le sol module la séparation des précipitations entre ruissellement et infiltration, et donc la dynamique de l'évapotranspiration, des écoulements et de l'humidité souterraine (e.g. Gascoïn et al., 2009b). Elle exerce donc un contrôle essentiel sur les flux d'eau et d'énergie depuis les surfaces continentales, et avec des conséquences sur le couplage de ces dernières avec l'atmosphère et le climat d'une part, et sur les ressources en eau d'autre part.

Les principes physiques qui régissent ces flux d'eau dans le sol, assimilable à une zone non saturée, sont bien connus et décrits par l'équation de Richards. Son utilisation sur des domaines étendus, telle que réalisée dans les modèles de surface à des fins d'hydrologie régionale ou de modélisation

climatique, se heurte dans la pratique à une connaissance partielle des propriétés des sols et au temps de calcul important que nécessite une résolution précise de cette équation. A l'échelle de la maille des modèles climatiques ou des modèles hydrologiques régionaux, l'hydrodynamique de la zone non saturée est donc souvent décrite de manière simplifiée, et rarement validée.

Nous proposons d'explorer l'importance de ces processus à partir de données in-situ d'humidité du sol et flux de surface, issues de plusieurs sites du bassin de la Seine (SIRTA/IPSL, Chartres et Grignon/INRA, Orgeval/Cemagref). Elles seront comparées aux simulations de 2 modèles de surface décrivant les flux hydriques dans la zone non saturée sur des bases physiques : le modèle ORCHIDEE de l'IPSL (Krinner et al., 2005), avec une paramétrisation en 11 couches de l'hydrodynamique du sol (de Rosnay et al., 2002); et le modèle CLSM (Ducharne et al., 2000), qui décrit un continuum entre la zone saturée et non saturée, mais en simplifiant cette dernière sur 3 couches.

Dans un premier temps, ces modèles seront forcés par des données météorologiques observées et comparés entre eux et aux données in situ, afin d'isoler les processus dominants et d'améliorer la représentation de la zone non saturée dans ces 2 modèles.

Une deuxième étape sera réalisée avec le modèle de climat de l'IPSL, couplant le modèle de surface ORCHIDEE et le modèle de circulation atmosphérique LMDZ, dans une configuration régionalisée sur l'Ile-de-France permettant des comparaisons systématiques au jour le jour avec les observations du SIRTA (Coindreau et al., 2007). Il s'agira de déterminer si l'amélioration de l'hydrologie obtenue dans la première étape permet d'améliorer le climat simulé.

Dans une troisième étape, nous réaliserons des simulations du changement climatique avec le modèle climatique zoomé guidé couplé avec ORCHIDEE, pour déterminer si et comment l'hydrodynamique de la zone non saturée influence les impacts hydrologiques simulés, dont une source d'incertitude importante réside dans l'évolution du stress hydrique sur l'évapotranspiration (Ducharne et al., 2007). L'objectif final est une meilleure quantification des impacts hydrologiques du changement climatique en Ile de France et dans le bassin de la Seine, dont les retombées sociétales sont nombreuses vu l'importance des régimes hydrologiques et des ressources en eau pour les activités humaines.

## 7. Etapes clés du projet (présentation des *Work packages*)

Etape	Modèles mobilisés	Période	Résultats anticipés
<b>1. Hydro rétro</b>	Modèles de surface en mode forcé (ORCHIDEE et CLSM)	Rétrospective (Période d'acquisition des données)	Evaluation des modèles par comparaison de l'humidité du sol et des flux de surface avec les observations in situ Amélioration probable de la paramétrisation des flux d'eau dans la zone non saturée
<b>2. Climat rétro</b>	Modèle de surface de surface ORCHIDEE couplé au modèle atmosphérique LMDZ	Rétrospective	Conséquences de l'étape 1 sur le réalisme des variables météorologiques et hydrologiques Amélioration probable de LMDZ couplé à ORCHIDEE
<b>3. Climat futur</b>	Modèle de surface de surface ORCHIDEE couplé au modèle atmosphérique LMDZ	Prospective	Simulations de scénarios de changement climatique Conséquences de l'étape 1 sur le changement climatique régional et ses impacts hydrologiques Analyse des impacts hydrologiques régionaux

## 8. Planning prévisionnel

Le projet est prévu pour durer 3 ans, d'Octobre 2009 à Septembre 2012. Les 3 étapes décrites dans le tableau ci-dessus couvrent un peu moins d'1 an chacune, en comptant le temps nécessaire à la valorisation des résultats sous forme de publications scientifiques et rapports, et libérant en fin de projet le temps nécessaire à la rédaction de la thèse.

## 3.2 Description détaillée du projet :

TITRE DU PROJET :

**HYDROSOL : Influence de l'hydrodynamique du sol sur la modélisation du changement climatique régional et de ses impacts sur les ressources en eau**

Il s'agit d'un projet ciblé dans le cadre de la problématique I. « Vulnérabilités écologiques, économiques et institutionnelles faces aux changements globaux », sur le thème « Interactions entre changement climatique, usage des terres, régime hydrologique, systèmes écologiques, biodiversité et cycles biogéochimiques ».

Le projet proposé est plus particulièrement ciblé sur l'hydrologie des surfaces continentales, qui interagit avec le système climatique, y compris dans sa réponse au forçage anthropique en gaz à effet de serre, et qui contrôle les régimes hydrologiques et les ressources en eau. A ce titre, le projet s'inscrit aussi dans le thème « Dynamique et gestion des services environnementaux dans le contexte de changements globaux » pour l'aspect « ressources en eau ».

### I. Coordonnateur responsable du projet :

Nom : DUCHARNE, Agnès

Fonction : CRI CNRS

Institution / Laboratoire : UMR 7619 Sisyphe (CNRS – UPMC – EPHE)

Adresse postale : UPMC Case 105, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05

Téléphone : 01 44 27 51 27

Fax : 01 44 27 45 88

Email : [Agnès.Ducharne@upmc.fr](mailto:Agnès.Ducharne@upmc.fr)

Nom du directeur du laboratoire : Pierre RIBSTEIN

### 2. Tutelle du laboratoire choisie comme organisme gestionnaire du contrat : CNRS

### 3. Personne contact dans la tutelle gestionnaire :

Nom : HAMON Ludovic

Fonction : Responsable du Service du partenariat et de la Valorisation

Adresse postale : 16 Rue Pierre et Marie Curie - 75005 PARIS

Téléphone : 01 42 34 94 17

Fax : 01 42 34 95 08

Email : [spv@dr2.cnrs.fr](mailto:spv@dr2.cnrs.fr)

### 4. Partenaires (institutions, entreprises...) du projet en Ile-de-France

Laboratoire partenaire n°1 : UMR 7619 Sisyphe (CNRS – UPMC – EPHE)

Laboratoire partenaire n°2 : IPSL : Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), UMR 8539 (CNRS – UPMC – ENS – X – CNES) ; SIRTa (Site Instrumenté de Palaiseau)

Laboratoire partenaire n°3 : UMR EGC (INRA – AgroParisTech)

Laboratoire partenaire n°4 : Cemagref Antony, unité HBAN

### 5. Partenaires non franciliens : non

## 6. Objectifs et finalité du projet (maximum 1 page)

L'objectif de ce projet est d'améliorer le réalisme d'un modèle climatique régional centré sur la région Ile de France, en particulier en ce qui concerne le cycle de l'eau et les précipitations, qui sont notoirement mal quantifiées par les modèles climatiques (e.g. Randall et al., 2007), ce qui est très pénalisant pour fournir une quantification utile des impacts du changement climatique sur l'hydrologie continentale et ses manifestations les plus sensibles pour la société, tels qu'écoulements et régimes hydrologiques, ressources en eau et sécheresse (Ducharne et al., 2007).

Une stratégie couramment utilisée pour lever ce verrou est de recourir à des méthodes de régionalisation du climat. Il s'agit de traitements a posteriori des sorties des modèles climatiques, visant à introduire les hétérogénéités spatiales non résolues à l'échelle grossière de ces derniers, tout en corrigeant les défauts statistiques les plus pénalisants pour la simulation hydrologique, comme les biais des précipitations (Ducharne et al., 2009a). Une autre stratégie serait bien sûr d'améliorer le réalisme du climat simulé par les modèles climatiques. C'est à cette tâche, ambitieuse et difficile, que ce projet de thèse se propose de contribuer, grâce à l'expertise des laboratoires partenaires en termes de mesures et modélisation climatique et hydrologique.

Le postulat de base est qu'on peut améliorer le réalisme du climat simulé en améliorant la description des flux de surface. Il s'agit des flux d'eau et d'énergie échangés entre les surfaces continentales et l'atmosphère sus-jacente, qui influencent et sont influencés par les caractéristiques de l'atmosphère et de la surface. Ces flux sont constitués des flux radiatifs (rayonnement visible et infrarouge émis par la surface) et des flux de chaleur sensible et latente. Il est important de noter que ce dernier terme participe au couplage entre les bilans d'eau et d'énergie, puisqu'il est directement associé à un flux d'eau, le flux d'eau évaporée depuis les surfaces continentales ou évapotranspiration. Ce terme est lui-même étroitement contrôlé par les précipitations locales et le fonctionnement hydrologique des surfaces continentales, qui module la séparation des précipitations entre ruissellement et infiltration dans le sol, et donc la dynamique de l'évapotranspiration, tout comme celle des écoulements et de l'humidité souterraine.

La sensibilité du climat aux flux de surface est démontrée par de très nombreux travaux, qu'il s'agisse d'expériences réelles de transformation des surfaces continentales (e.g. déforestation tropicale) ou d'expériences numériques, pour lesquelles le climat simulé par le modèle de circulation générale du LMD ne fait pas exception (e.g. Ducharne et al., 1998 ; Ducharne et Laval, 2000). Dans les modèles planétaires, cette sensibilité n'a pas encore permis d'amélioration suffisante des précipitations simulées pour que les écoulements associés puissent se comparer favorablement aux données correspondantes, à savoir les débits des fleuves.

Les modèles régionaux de climat semblent plus intéressants dans ce cadre, comme indiqué par exemple par des travaux récents au LMD. Pour valider le modèle climatique LMDZ du LMD, Coindreau et al. (2007) ont mis en place une version zoomée du modèle de circulation générale de l'IPSL sur la région Ile-de-France, guidée aux limites du domaine à partir de l'analyse des observations météorologiques par un modèle météorologique. Ce guidage régional permet de bien reproduire la variabilité journalière du climat local, comme démontré par comparaison avec les données SIRTA (voir section 8). Si les précipitations simulées restent médiocres, de réelles voies d'améliorations sont proposées :

- La surestimation des précipitations hivernales pourrait être corrigées en corrigeant les données de d'humidité de l'air et de pression qui servent à guider le modèle ;
- La sous-estimation des précipitations estivales peut-être corrigée en augmentant l'évapotranspiration, ce qui corrige du même coup le biais de la température de l'air.

L'évapotranspiration augmente avec l'humidité du sol, et dépend donc fortement du fonctionnement hydrodynamique du sol, et plus généralement de toute la zone non saturée en interaction avec la zone saturée constituée par les nappes phréatiques. L'objectif de ce projet est donc d'améliorer la description de ces processus dans le modèle LMDZ, dans l'espoir d'améliorer le climat simulé (Étapes 1 et 2). L'évaluation de ces améliorations sur la période récente instrumentée guidera notre analyse des scénarios de changement climatique qui seront réalisés en Etape 3.

## 7. Sujet et problématique: (2 pages maximum)

La dynamique des flux d'eau dans le sol module la séparation des précipitations entre ruissellement et infiltration, et donc la dynamique de l'évapotranspiration (qui augmente quand l'humidité du sol augmente), des écoulements et de l'humidité souterraine (e.g. Gascoïn et al., 2009b). Elle exerce donc un contrôle essentiel sur les flux d'eau et d'énergie depuis les surfaces continentales, et avec des conséquences sur le couplage de ces dernières avec l'atmosphère et le climat d'une part, et sur les ressources en eau d'autre part.

Les principes physiques qui régissent ces flux d'eau dans le sol, qui s'inscrit dans la zone non saturée qui se développe au dessus de la zone saturée constituée par les nappes phréatiques, sont bien connus et décrits par l'équation de Richards. Son utilisation sur des domaines étendus, telle que réalisée dans les modèles de surface à des fins d'hydrologie régionale ou de modélisation climatique, se heurte dans la pratique à une connaissance partielle des propriétés des sols et au temps de calcul important que nécessite une résolution précise de cette équation. A l'échelle de la maille des modèles climatiques ou des modèles hydrologiques régionaux, l'hydrodynamique de la zone non saturée est donc souvent décrite de manière simplifiée, et rarement validée.

Etant donné l'amélioration des précipitations simulées par LMDZ zoomé guidé en Ile-de-France en augmentant l'évapotranspiration, et la sensibilité de cette dernière à l'hydrodynamique du sol, nous proposons d'explorer l'importance des processus hydrodynamiques du sol sur la simulation des flux de surface et du climat régional de l'Ile de France, grâce à des données nouvellement acquises depuis l'étude de Coindreau et al. (2007).

En particulier, les données du SIRTA exploitées dans cette étude ne couvraient pas l'évapotranspiration, ce qui empêchait de déterminer si l'augmentation de ce flux permettant une amélioration des précipitations estivales était réaliste ou pas. Cette lacune est comblée depuis 2006, ce qui constitue une avancée certaine. Une collaboration a par ailleurs été engagée auprès d'autres partenaires pour obtenir des données complémentaires dans le bassin de la Seine : données d'humidité du sol et micro-météorologiques sur deux sites instrumentés pendant 3 ans (Chartres & Grignon) auprès de l'UMR EGC « Environnement et Grandes Cultures » (UMR INRA-AgroParisTech) ; données de débit et d'humidité du sol, y compris des estimations par télédétection radar, dans le site atelier du GIS ORACLE du Cemagref, qui couvre les bassins versants du Petit et du Grand Morin, deux affluents de la Marne.

La première étape vise à améliorer la simulation de l'hydrodynamique du sol et des flux de surface dans le modèle ORCHIDEE (Krinner et al., 2005), qui sert à simuler des processus dans LMDZ. Pour faciliter l'analyse des résultats, cette étape sera cependant menée en dehors de LMDZ, en mode forcé par des variables météorologiques observées (soient directement issues des sites, soient issues de la base de données SAFRAN de Météo-France). Il existe deux versions d'ORCHIDEE, une version simple à 2 couches invalidée par Coindreau et al. (2007) et une version plus physique à 11 couches (de Rosnay et al., 2002). Il s'agira donc de comparer les variables simulées (e.g. évapotranspiration, chaleur sensible, écoulements, humidités du sol) avec les variables mesurées, et de chercher la paramétrisation de l'hydrodynamique du sol d'ORCHIDEE qui permet la simulation la plus réaliste (version et jeu de paramètres). Ce travail sera enrichi d'une comparaison avec les résultats d'un autre modèle de surface, le modèle CLSM (Ducharne et al., 2000), qui décrit l'hydrodynamique du sol à partir de l'équation de Richards, mais avec des simplifications différentes de celles réalisées dans ORCHIDEE « 11 couches ». Ce modèle CLSM présente l'intérêt d'avoir été calibré et validé par comparaison avec des débits observés en 23 stations du le bassin de la Seine (Ducharne et al., 2009b). Plusieurs études ont aussi montré la sensibilité directe de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration simulées par ce modèle aux paramètres de conductivité hydraulique du sol (e.g. Gascoïn et al., 2009b). La comparaison des différents modèles entre eux et avec les données in situ permettra d'isoler les processus dominants et d'améliorer la représentation de la zone non saturée dans les 2 modèles.

Une deuxième étape sera réalisée avec le modèle de climat de l'IPSL, au sein duquel le modèle de surface ORCHIDEE est couplé au modèle de circulation atmosphérique LMDZ. Ce modèle de climat est exploité dans une configuration régionalisée sur l'Ile-de-France permettant des comparaisons systématiques au jour le jour avec les observations du SIRTA (Coindreau et al., 2007). Il s'agira de déterminer si l'amélioration de l'hydrologie obtenue dans la première étape permet d'améliorer le climat simulé, par comparaison avec les variables météorologiques mesurées sur les sites, et plus généralement avec l'analyse SAFRAN des données météorologiques observées par Météo-France de 1970 jusqu'à 2007 (Quintana-Sequi et al., 2008)<sup>1</sup>.

Dans une troisième étape, nous réaliserons des simulations du changement climatique avec le modèle climatique zoomé guidé couplé avec ORCHIDEE, pour déterminer si et comment l'hydrodynamique de la zone non saturée influence les impacts hydrologiques simulés, dont une source d'incertitude importante réside dans l'évolution du stress hydrique sur l'évapotranspiration (Ducharne et al., 2007).

## 8. Programme scientifique (5 pages maximum) :

### 8a. Modèles, données et terrains d'analyse

Comme indiqué ci-dessus, ce projet repose sur la confrontation de résultats de modèles avec des données observées dans un domaine recouvrant l'Ile de France et le bassin de la Seine.

#### Le modèle LMDZ guidé

Comme tout modèle climatique, le modèle de l'IPSL se compose de plusieurs sous modèles dont certains sont optionnels :

- un modèle de circulation générale atmosphérique est la composante essentielle qui décrit la dynamique atmosphérique (évolution des champs de pression, température et humidité, et des vents résultants) et les processus physiques associés (convection, changements de phase, transfert radiatif et nébulosité, turbulence, couche limite) dans un maillage tridimensionnel. Pour des applications climatiques, ces modèles décrivent généralement l'atmosphère sur l'ensemble du globe, avec un maillage d'environ 200 km de côté, et 10 à 30 couches selon la verticale. Un tel modèle est contraint par la composition de l'atmosphère (masse et composition, notamment en aérosols et gaz à effet de serre), par le rayonnement solaire, et par les flux échangés avec la surface terrestre et océanique.

Le modèle atmosphérique est ici le modèle LMDZ, dont une caractéristique importante est le maillage à résolution variable ou « zoom ». Cette caractéristique permet, en maintenant la continuité d'une simulation planétaire, d'augmenter la résolution dans une région où les points de grille sont resserrés, alors que la résolution est au contraire plus lâche que la résolution moyenne aux antipodes du centre du zoom. A la suite de Coindreau et al. (2007), nous commencerons cette thèse avec une version à résolution horizontale de 48x32 mailles, ce qui permet de réaliser des simulations pluriannuelles du climat régional sur une bonne station de travail. Un zoom sur le point de coordonnées 48°N, 2°E (alors que Paris se situe en 48° 52' N, 2° 21' E) permet d'atteindre une résolution maximale de 120 km environ (Figure 1).

Une autre caractéristique de la version utilisée est son guidage régional par les analyses des observations météorologiques par le modèle météorologique de l'ECMWF. En rapprochant les vents, températures et humidités simulés aux limites du domaine régional des valeurs observées, ce guidage permet de bien reproduire la variabilité journalière du climat local, comme démontré par comparaison avec les données SIRTA (Coindreau et al., 2007).

- les échanges avec l'océan peuvent être soit simulés par couplage avec un modèle de circulation générale océanique, ce qui nécessite des temps de calcul très importants ; ils peuvent aussi être calculés à partir de la température de surface de la mer, connue soit par l'observation, soit par les résultats d'une simulation, ce qui réduit beaucoup les temps de calcul par rapport à une simulation couplée.





observés en 23 stations jaugées du bassin (surfaces contributives comprises entre 1000 et 65 000 km<sup>2</sup>), y compris Paris et Poses, la station la plus à l'aval du bassin avant d'entrer dans le domaine estuarien.

La comparaison des différents modèles entre eux et avec les données in situ permettra d'isoler les processus dominants et d'améliorer la représentation de la zone non saturée dans les 2 modèles. Le principe est de déterminer empiriquement la meilleure paramétrisation et le meilleur jeu de paramètres associés pour réaliser une simulation réaliste de l'hydrodynamique et des flux de surface, selon une démarche proche du « calage » en hydrologie.

#### Les données observées

Les premières données mobilisées pour ce projet sont des analyses d'observations météorologiques :

- Analyses par le modèle météorologique de l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) pour guider le modèle LMDZ.
- Analyses SAFRAN de Météo-France (Quintana-Segui et al., 2008<sup>1</sup>). Ce système d'analyse permet d'interpoler les données météorologiques acquises par Météo-France sur l'ensemble du territoire métropolitain sur un maillage de résolution de 8 km x 8 km et avec un pas de temps horaire. La période couverte est pour l'instant 1970-2007. La base de données résultante comprend l'ensemble des données météorologiques nécessaires à forcer un modèle de surface continentale, et sa comparaison avec les données à partir desquelles elles sont interpolée est très satisfaisante, y compris pour les précipitations. Ces données seront mobilisées pour forcer les modèles ORCHIDEE et CLSM dans l'étape 1, et comme élément de validation du modèle LMDZ zoomé guidé dans l'étape 2.

Un autre type de données est constitué de données locales acquises in situ, comme récapitulé dans le Tableau 1 ci-dessous. Ces données locale serviront dans l'étape 1 pour forcer (données météo, éventuellement complétées par les données SAFRAN) et évaluer (données d'humidité du sol, des flux turbulents, débits, etc.) des applications locales des modèles de surface ORCHIDEE et CLSM. Elles serviront aussi à l'évaluation du modèle couplé LMDZ – ORCHIDEE dans l'étape 2, pour les variables simulées par ORCHIDEE (humidité de surface, écoulements), pour celles simulées par LMDZ (météorologie de proche surface), ou pour le terme de couplage entre ces deux modèles, à savoir les flux turbulents (chaleur sensible et latente).

**Tableau 1. Synthèse des données disponibles sur les sites retenus pour l'étude.**

Opérateur	Localisation	Instrumentation	Référence
SIRTA (LMD/IPSL)	Ecole Polytechnique, Palaiseau (91)	Météo et flux radiatifs (v, T, q, Rg, Ratm, Prec, albédo) Humidité du sol : profils jusqu'à 50cm Flux turbulents depuis Oct 2006 Hauteur de couche limite etc.	Haeffelin et al., 2005 Coindreau et al., 2007
INRA	Chartres (28) et/ou Thiverval- Grignon (78)	Météo (v, T, q, Rg, Prec) Humidité du sol : profils TDR jusqu'à 120 cm + recalé à partir gravimétrie toutes les 2 à 3 semaines 3 ans	Rosnoblet (2002) Thèse de B Jabbur
GIS ORACLE (Cemagref HBAN)	Bassin de l'Orgeval	Débits en 13 stations sur 1070 km <sup>2</sup> Pluviométrie et météo Profils d'humidité par TDR jusqu'à 155 cm (AIMWATER + FIRE) toutes les 12h tous les 2 jours depuis 1990 Piézométrie (Cemagref + FIRE)	Riffart et al., 2006 Weisse et al., 2002

Les mesures de débit sont le troisième type de données pouvant être mobilisées dans le cadre de ce projet, pour l'évaluation des modèles de surface en mode forcé (Etape 1) comme en mode couplé (Etape 2). Nous exploiterons notamment des données de débit fournies par le GIS ORACLE, et les 23 stations de la Banque HYDRO sélectionnées par Ducharne et al. (2009b) car situées à des confluences importantes du réseau hydrographique de la Seine et renseignées sans lacune importante sur la période 1980-2007.

Les dernières données importantes pour le projet seront les données d'évolution de teneurs en gaz à effet de serre et de température de surface de la mer pour forcer les simulations du changement climatique prévues en étape 3. Ce type de données est disponible au LMD qui participe aux simulations de l'IPCC et prépare déjà les simulations du 5<sup>ème</sup> rapport. Les données ad hoc seront donc déterminées au cours la thèse.

## 8b. Programme des travaux, échéancier et partage des tâches entre les partenaires

Le travail se déroulera en trois étapes récapitulées dans le tableau suivant.

Etape	Modèles mobilisés	Période	Résultats anticipés
<b>1. Hydro rétro</b>	Modèles de surface en mode forcé (ORCHIDEE et CLSM)	Rétrospective (Période d'acquisition des données)	Evaluation des modèles par comparaison de l'humidité du sol et des flux de surface avec les observations in situ Amélioration probable de la paramétrisation des flux d'eau dans la zone non saturée
<b>2. Climat rétro</b>	Modèle de surface de surface ORCHIDEE couplé au modèle atmosphérique LMDZ	Rétrospective	Conséquences de l'étape 1 sur le réalisme des variables météorologiques et hydrologiques Amélioration probable de LMDZ couplé à ORCHIDEE
<b>3. Climat futur</b>	Modèle de surface de surface ORCHIDEE couplé au modèle atmosphérique LMDZ	Prospective	Simulations de scénarios de changement climatique Conséquences de l'étape 1 sur le changement climatique régional et ses impacts hydrologiques Analyse des impacts hydrologiques régionaux

Le projet est prévu pour durer 3 ans, d'Octobre 2009 à Septembre 2012. Comme indiqué dans le tableau suivant, les 3 étapes du projet couvriront un peu moins d'1 an chacune, en comptant le temps nécessaire à la valorisation des résultats sous forme de publications scientifiques et rapports, ce qui libèrera en fin de projet le temps nécessaire à la rédaction de la thèse.

Le partage des tâches est aussi récapitulé dans le tableau ci-dessous. Le doctorant travaillera sous la direction conjointe d'A. Ducharne (Sisyphé) et F. Hourdin (LMD, HDR) et disposera d'un espace de travail et de l'accès aux moyens de calcul des deux laboratoires, qui sont voisins sur le campus de Jussieu. F. Chérut (LMD) participera aussi à l'encadrement de la thèse pour les simulations climatiques zoomées guidées sur l'Île de France avec le modèle LMDZ.

Le rôle des autres participants (M Haefelin, SIRTA ; A. Tuzet, UMR EGC ; C. Loumagne, Cemagref HBAN) sera double : fournir les données prévues et l'appui pour leur exploitation et leur analyse ; participer au comité de thèse.

Etape	Partenaires impliqués	Année 1	Année 2	Année 3
1. Hydro rétro	P1, P2, P3, P4	x		
2. Climat rétro	P1, P2, P3, P4		x	
3. Climat Futur	P1, P2			x

## 9. Partenariat et travaux antérieurs des proposants (2 pages maximum)

- Contrats précédents ou en cours connexes au sujet traité
- Qualification et antériorité des partenaires

### Partenaire n°1 : UMR Sisyphe (Paris, Jussieu)

L'UMR Sisyphe est un des leaders français en ce qui concerne les impacts du changement climatique sur l'hydrologie et les ressources en eau à l'échelle régionale, que ce soit en Ile de France (projets GICC-Seine & RExHySS financés par le programme GICC et coordonnés par A. Ducharne) ou dans d'autres bassins français : plaine du Rhin (projet ANR VULNAR), bassin de la Loire (projet ICC-HYDROQUAL financé par l'EP Loire).

Ces applications reposent sur la maîtrise de la modélisation des flux hydriques au sein des hydrosystèmes continentaux, qui constitue un des points forts de l'UMR Sisyphe. Une large gamme de modèles y sont disponibles, dont le modèle CLSM développé par A. Ducharne, qui décrivent ces flux sur des bases physiques au sein des principaux compartiments hydrologiques (surface continentale, sols, aquifères, cours d'eau), et qui peuvent être couplés. Ces modèles ont largement été développés et/ou validés sur le bassin de la Seine, lequel fait l'objet d'une connaissance approfondie de la part de l'UMR Sisyphe, qui assure par exemple depuis plus de 20 ans la coordination du programme PIREN-Seine, associant plusieurs organismes de recherche et les principaux acteurs de la gestion de l'eau.

Plus particulièrement, le modèle CLSM a été validé dans le bassin de la Seine, mais aussi dans ceux de la Somme, de la Loire, du Rhône, des rivières Red et Arkansas aux USA, ainsi que sous des climats aussi extrêmes que ceux de la moraine du glacier Zongo dans les Andes Boliviennes (projet PNRH) ou de l'Afrique de l'Ouest (projet ALMIP dans le cadre du programme AMMA).

### Partenaire n°2 : IPSL : Laboratoire de Météorologie Dynamique (Paris, Jussieu) et SIRTa (Palaiseau)

Le LMD est un des membres de l'Institut Pierre-Simon Laplace, qui regroupe plus de 30% du dispositif national de recherche du CNRS et des universités dans le domaine des sciences de l'océan et de l'atmosphère, soit quelques 750 personnes.

Ce laboratoire a pour objet de recherche les mécanismes, l'évolution et la prévision des phénomènes météorologiques et du climat. Une de ses activités essentielles est la modélisation du climat, plus particulièrement dans sa composante atmosphérique, grâce au développement incessant du modèle LMDZ. Ce modèle a été évalué dans de nombreux exercices d'intercomparaison de modèles de circulation générale, depuis le projet AMIP<sup>1</sup> ciblant les modèles atmosphériques jusqu'aux exercices de l'IPCC mobilisant des modèles couplés océans-atmosphère.

F. Hourdin et F. Chéruy sont spécialisés sur les questions de dynamique atmosphérique, couche limite et convection, et sont responsables de la version zoomée guidée sur l'Ile de France de LMDZ.

Le SIRTa (Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique) est un site d'expérimentation national dédié à la recherche sur les processus physiques de l'atmosphère – en particulier ceux associés au cycle de vie des nuages dans la couche limite atmosphérique et la troposphère libre. C'est un service de l'Institut Pierre Simon Laplace (Fédération de Recherche CNRS – FR636), mis en œuvre par le Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539) sur le campus de l'Ecole Polytechnique (Palaiseau ; 48.7°N, 2.2°E).

Il faut enfin noter qu'A. Ducharne a été formée au LMD sur les couplages entre l'hydrologie continentale et le climat, lors de sa thèse avec Katia Laval, responsable de la petite équipe dédiée aux surfaces continentales au LMD.

---

<sup>1</sup> Gates, W. L., J. Boyle, C. Covey, C. Dease, C. Doutriaux, R. Drach, M. Fiorino, P. Gleckler, J. Hnilo, S. Marlais, T. Phillips, G. Potter, B. Santer, K. Sperber, K. Taylor and D. Williams, 1998: An Overview of the Results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I ), Bulletin of the American Meteorological Society, 73, 1962-1970.

### Partenaire n°3 : UMR « Environnement et Grandes Cultures » (Paris et Grignon)

L'objectif central de l'UMR EGC est l'étude et la modélisation du fonctionnement des couverts végétaux et du sol dans le contexte des grandes cultures, en interaction avec les facteurs de l'environnement (sol, eaux, atmosphère) et les pratiques agricoles. Ces recherches vont de l'étude de processus à l'échelle locale jusqu'à l'intégration dans des modèles à grande échelle, en collaboration notamment avec l'IPSL (LMD et LSCE).

L'équipe Biosphère-Atmosphère, à laquelle appartiennent A. Tuzet et A. Perrier, dérive de l'ancienne Unité de Bioclimatologie de Grignon et offre une expertise internationalement reconnue dans le domaine des flux d'eau au sein du continuum sol-plante-atmosphère, y compris sur la problématique de l'irrigation sur laquelle A. Perrier est associé au projet RExHySS qui vise à quantifier l'impact du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques du bassin de la Seine (projet GICC coordonné par A. Ducharne). A. Perrier est aussi un des concepteurs du modèle de surface qui a engendré ORCHIDEE (Ducoudré et al., 1993).

L'équipe Biosphère-Atmosphère maintient notamment des sites d'observation micro-météorologique comme ceux de Thiverval-Grignon ou de Chartres, dont les données seront utilisées dans ce projet de thèse.

### Partenaire n°4 : Cemagref HBAN (Antony)

Le Cemagref d'Antony est l'opérateur du GIS ORACLE, qui est un Observatoire de Recherche en Environnement (ORE) regroupant les bassins versants de l'Orgeval, du Grand Morin et du Petit Morin, bassins suivis hydrologiquement depuis de nombreuses années (47 ans pour l'Orgeval). L'objectif de cet observatoire est de permettre l'étude et la compréhension des déterminants du fonctionnement hydrologique des bassins suivis, représentatifs des milieux ruraux anthropisés à dominante sédimentaire de la région.

Parmi les nombreux projets qui ont bénéficié des données et des infrastructures de cet observatoire, on peut noter des projets ciblés sur la télédétection de l'humidité de surface, et notamment le projet Européen AIMWATER (Weisse et al., 2002) ou le projet CNES AMETHIST (Paris et al., 2008, 2008b) dans lesquels l'IPSL était impliqué via le CETP. On peut aussi noter que le GIS ORACLE fait partie du dispositif expérimental de la Fédération Ile de France de Recherche sur l'Environnement (FIRE) dont l'UMR fait partie.

## **10. Publications de l'ensemble des proposant (2 pages maximum)**

Nous nous sommes ici limités aux publications directement liées au projet, séparées en deux catégories (revues à comité de lecture et autres supports de publications, e.g. ouvrages, rapports de recherche, documents de travail accessibles, etc.). Nous indiquons aussi à quel(s) partenaire(s) du projet appartiennent les auteurs, en suivant la numérotation de la section 4 : P1 indique Sisyphe ; P2 l'IPSL (LMD+SIRTA) ; P3 l'UMR EGC et P4 le Cemagref HBAN.

Ceci montre que les partenaires impliqués sont actifs et innovants dans leur domaine de spécialité et que des collaborations existent déjà entre ces partenaires, constituant deux gages importants quant à la faisabilité du projet et à la qualité de ses retombées scientifiques.

### **Publications de rang A concernant directement le projet**

Cheruy F. and F. Aires (2009). Cluster analysis of cloud properties over the Southern Europe Mediterranean area in observations and a model. *Monthly Weather Review*, in press. **P2**

Coindreau O., M. Haeffelin, F. Hourdin, A. Mathieu, C. Rio, 2007 : Assessment of Physical Parameterizations Using a Global Climate Model with Stretchable Grid and Nudging. *Monthly Weather Review*, Vol. 135, No. 4, pages 1474-1489. **P2**

De Noblet-Ducoudré N., Gervois S., Ciais P., Viovy N., Brisson N., Seguin B., Perrier A. (2004).

- Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie*, 24, 397-407. **P2,3**
- Dirmeyer PA, Zeng FJ, Ducharne A, Morrill J, Koster RD (2000). Sensitivity of surface fluxes to soil water content in three land surface schemes, *Journal of Hydrometeorology*, 1:121-134. **P1**
- Ducharne A, Laval K, Polcher J (1998). Sensitivity of the hydrological cycle to the parameterization of soil hydrology in a GCM, *Climate Dynamics*, 14: 307-327. **P1,2**
- Ducharne A, Koster RD, Suarez MJ, Praveen K, Stieglitz M (2000). A catchment-based approach to modelling land surface processes in a GCM - Part 2: Parameter estimation and model demonstration, *Journal of Geophysical Research*, 105 (D20): 24823-24838. **P1**
- Ducharne A, Baubion C, Beaudoin N, Benoit M, Billen G, Brisson N, Garnier J, Kieken H, Lebonvallet S, Ledoux E, Mary B, Mignolet C, Poux X, Sauboua E, Schott C, Théry S, Viennot P (2007). Long term prospective of the Seine river system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, 375, 292-311, doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.011 **P1**
- Ducoudré N, Laval K, Perrier A (1993). SECHIBA : a new set of parameterizations of the hydrologic exchanges at the land-atmosphere interface within the LMD atmospheric general circulation model. *J. Climate*, 6(2), 248-273. **P2,3**
- Gascoïn S, Ducharne A, Ribstein P, Carli M, Habets F (2009a). Adaptation of a catchment-based land surface model to the hydrogeological setting of the Somme River basin (France). *Journal of Hydrology*, in press, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.01.039. **P1**
- Gascoïn S, Ducharne A, Ribstein P, Lejeune Y, Wagnon P (2009b). Dependence of bare soil albedo to soil moisture on the moraine of the Zongo glacier (Bolivia): implications for land surface modelling. *JGR*, accepté avec révisions mineures. **P1**
- Haefelin M. & 28 co-auteurs dont F. Hourdin (2005). SIRTa, a ground-based atmospheric observatory for cloud and aerosol research. *Annales Geophysicae*, 23, 253-275. **P2**
- Hourdin F, Musat I, Bony S, Braconnot P, Codron F, Dufresne JL, Fairhead L, Filiberti MA, Friedlingstein P, Grandpeix JY, Krinner G, LeVan P, Li ZX and Lott F (2006). The LMDZ4 general circulation model : climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection, *Climate Dynamics*, 27 (7-8), 787-813. **P2**
- Koster RD, Suarez MJ, Ducharne A, Praveen K, Stieglitz M (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 1: Model structure, *Journal of Geophysical Research*, 105 (D20): 24809-24822. **P1**
- Krinner G., Viovy N., Noblet-Ducoudré N. de, Ogée J., Polcher J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S., Prentice I. C. (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global biogeochemical cycles*, 19, GB1015.1-GB1015.33. **P2**
- Le Hegarat-Masclé S., Zribi M., Alem F., Weisse A., Loumagne C. (2002). Soil moisture estimation from ERS/SAR data: Toward an operational methodology. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40 (12), 2647-2658. **P4**
- Oudin L., Weisse A., Loumagne C., Le Hegarat-Masclé S. (2003) Assimilation of soil moisture into Hydrological models for flood forecasting a variational approach. *Canadian Journal of Remote sensing*, 29(6), 679-686. **P4, 1**
- Paris T., Zribi M., Hasenauer S., Loumagne C. (2008). Analysis of surface and root-zone soil moisture dynamics with ERS scatterometer and the hydrometeorological model SAFRAN-ISBA-MODCOU at Grand Morin watershed (France). *Hydrol and Earth Syst Sci*, 12, 1415-1424. **P4**
- Pereira, Perrier, Allen and Alves (1999). Evapotranspiration: Concepts and Future Trends, *J.Irrig. and Drain. Eng.*, 125(2), 45-51. **P3**
- Perrier A., Tuzet A. - 2005 - Le cycle de l'eau et les activités au sein de l'espace rural. Enjeux globaux, solutions locales et régionales. *Comptes-Rendus - Géoscience*, 337, 39-56. **P3**
- Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fiechter, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi and K.E. Taylor (2007). *Climate Models and Their Evaluation*. Chapter 8 In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 74 pp. **P2**

- de Rosnay, P., J. Polcher, M. Bruen, and K. Laval (2002), Impact of a physically based soil water flow and soil-plant interaction representation for modeling large-scale land surface processes, *J. Geophys. Res.*, 107(D11), 4118, doi:10.1029/2001JD000634. **P2**
- Tuzet A., Perrier A., Leuning R. - 2003 - A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell and Environment*, 26, 7, 1097-1116. **P3**

### **Autres publications & communications concernant directement le projet**

- Chéruy F, Dupont JC, Frédéric Hourdin F, Haeffelin M (2009). Analyse du couplage atmosphère-surface continentale à l'aide des mesures du SIRTA et d'un modèle de climat zoomé et guidé. Communication orale, Journée SIRTA 20 Avril 2009. **P2**
- Ducharne A et l'équipe RExHySS (2009a). Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme, Encadré dans le rapport "Ecosystèmes et événements extrêmes" de l'Académie des Sciences, in press. **P1,3**
- Ducharne A, Bellier S, Crespi O, Gascoïn S, Zhao Y (2009b). Validation of a catchment-based land surface model in the Seine River basin (France) using a simple routing model, in prep. **P1**
- Dufresne JL & 30 coauteurs dont F Hourdin (2006). Simulation du climat récent et futur par les modèles du CNRM et de l'IPSL. *La Météorologie*, N° 55, 45-59. **P2**
- Paris T, Zribi M, Loumagne C, Wagner W, Ducharne A, Habets F (2008b). Comparison between surface soil moisture obtained by remote sensing, field experiments, and land surface modelling. EGU General Assembly 2008, Avril 2008 (Vienna, Austria). **P4,1**
- Riffard M., Birgand F., Loumagne C., Andreassian V., Kao C., Chaumont C., Ansart P. (2006). Orgeval, an experimental site since 1962 for the study of hydrological hazards and biochemical processes. *Geophysical Research Abs*, vol. 8, 02338, 2pp. **P4**
- Rosnoblet, J (2002). Dynamique du bilan hydrique parcellaire au sein de l'espace rural-conséquences sur les transferts hydrologiques. Doctorat, INAPG p.146. **P3**
- Viennot P, Ducharne A, Habets F, Lamy F, Ledoux E (2009). Fonctionnement hydrodynamique du bassin de la Seine, Plaquette du programme PIREN-Seine, sous presse. **P1**
- Weisse A., Le Hégat-Masclé S., Aubert D., Loumagne C. - 2002. Le projet Européen AIMWATER: Utilisation de l'humidité des sols mesurée par radar embarqué (ERS/SAR) pour la modélisation pluie-débit. *La Houille Blanche*(1): 35-40. **P4**

**II.** Pour les projets d'investissement, joindre les devis des équipements objets de la demande de subvention ainsi que les lettres d'engagement des partenaires financiers pour les co-financements déjà acquis.

Voir devis joint au dossier papier pour un serveur de calcul de 5612 Euros HT (DELL).

### 3.3 Tableaux récapitulatifs et budget prévisionnel

#### 3.3.1 Récapitulatif des dépenses de fonctionnement

	Financement Région					Co-financement (indiquer les co-financements qui seront acquis de façon certaine – les frais de personnel statutaire ne constituent pas des co-financements)				
	Allocations doctorales (€)	Allocations post-doctorales (€)	Personnel technique (€)	Autres frais de fonctionnement (€) <sup>(*)</sup> <sup>(**)</sup>	TOTAL	Personnel technique (€)	Autres frais de fonctionnement (€)	Autres co-financements (allocations, gestion...)	TOTAL	Partenaire financier
<b>Titre du projet</b> HYDROSOL  <b>Coordonnateur</b> A.Ducharne  <b>Partenaires</b> Sisyphé, IPSL, EGS, Cemagref	100 080			10 000	110 080					
<b>Total</b>	100 080			10 000	110 080					

(\*) Montant total net de la TVA récupérable

(\*\*) Le montant total de ces autres frais de fonctionnement n'excèdera pas 10% de l'enveloppe globale allouée au programme de recherche (investissement et fonctionnement)

#### Présentation détaillée des dépenses de personnel technique

Dépenses de personnel technique	Total	Subvention régionale	Co-financement
Recrutement CDD 1 Descriptif du poste :			
Recrutement CDD 2 Descriptif du poste :			
....			
<b>Total</b>			

**Présentation détaillée des « autres dépenses de fonctionnement »**

<b>Autres dépenses de fonctionnement</b>	<b>Montant total (TTC)</b>	<b>TVA récupérable</b>	<b>Montant total net TVA récupérable</b>	<b>Subvention sollicitée</b>	<b>Co-financement</b>	<b>Partenaire financier</b>
Frais de formation des allocataires	2392	392	2000	2000		
Manifestations scientifiques						
Animation du réseau, communication	3588 Frais de publication	588	3000	3000		
Accueil de chercheurs étrangers (transports et per diem)						
Consommables plates-formes	5980	980	5000	5000		
<b>Total</b>	<b>11 960</b>	<b>1 960</b>	<b>10 000</b>	<b>10 000</b>		

**3.3.2 Récapitulatif des dépenses d'équipement**

<b>N° projet si projet déjà financé au titre d'un programme précédent</b>	<b>Descriptif des équipements</b>	<b>Coût total H.T.</b>	<b>Coût total T.T.C.</b>	<b>Montant total net TVA récupérable</b>	<b>Subvention sollicitée</b>	<b>Montant co-financement en distinguant (A) pour acquis et (D) pour sollicité</b>	<b>Partenaire financier</b>
<b>Titre du projet</b> HYDROSOL							
<b>Coordonnateur</b> A. Ducharne							
<b>Partenaires</b> Sisyphé, IPSL, EGC, Cemagref							
	Serveur de calcul	5612	6712	1100	6712		
	Equipement 2						
<b>Total</b>	...	5612	6712	1100	6712		



**3.3.3 Budget prévisionnel (ne concerne que la répartition de la subvention sollicitée) :**

<b>TITRE ET NUMERO (si projet déjà financé au titre du programme 2005, 2006, 2007 et 2008)</b>			
<b>Dépenses de personnel</b>			
	<b>Durée Date de début</b>	<b>Montant unitaire</b>	<b>Montant total</b>
Allocations doctorales	3 ans Début = Octobre 2009	2780€ /mois	100 080
Allocations post-doctorales			
Dépenses de personnel technique			
<b>Autres dépenses de fonctionnement</b>			
	<b>Montant TTC</b>	<b>TVA Récupérable</b>	<b>Subvention sollicitée</b>
Frais de formation des allocataires	2392	392	2000
Manifestations scientifiques (donner le détail des coûts) :			
...			
Animation du réseau, communication	3588	588	3000
Accueil de chercheurs étrangers (transports et per diem)			
Consommables plates-formes	5980	980	5000
<b>TOTAL dépenses fonctionnement</b>	<b>11 960</b>	<b>1 960</b>	<b>10 000</b>
<b>Equipements</b>			
	<b>Montant TTC</b>	<b>TVA Récupérable</b>	<b>Subvention sollicitée</b>
Serveur de calcul	6712	1100	5612
Equipement 2			
...			
<b>TOTAL investissements</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

1 960