

A l'heure où les émeutes de la faim font la Une des journaux, à l'heure où les problèmes d'accès à l'eau potable deviennent un enjeu d'Etat, à l'heure où le développement durable devient une préoccupation majeure de l'humanité, l'INRIA à travers quelques équipes-projets pionnières notamment sur Montpellier, essaye d'apporter sa modeste contribution à la résolution de tels enjeux sociétaux.

En 1980, Jacques-Louis Lions donnait à l'INRIA son visage actuel, animé par la vision que la modélisation mathématique et algorithmique allait devenir une démarche méthodologique pour comprendre le monde. Bref que le monde numérique pouvait être une chance pour le monde tout court. Guidé par cette méthodologie, l'INRIA a grandi et s'est donné des objectifs ambitieux : d'une part, démontrer la prévalence de cette vision scientifique et la façon dont elle transforme notre rapport à l'observation et, d'autre part, montrer les bénéfices technologiques qui en découlent pour favoriser l'émergence de solutions innovantes, répondant aux problèmes scientifiques, économiques et sociétaux du monde.

Aujourd'hui, à travers ce numéro de Lisa, nous voulons montrer que la vision de J.L. Lions nous anime toujours et que les problèmes évoqués au début de cet édito peuvent être aussi abordés sous l'angle de la modélisation et de la simulation afin de confronter la prédiction aux données réelles. C'est ainsi que l'institut a commencé depuis quelques années avec ses partenaires comme l'INRA, le CIRAD et SupAgro à investir des moyens sur la recherche autour des "Ecosystèmes et Plantes numériques". Le point commun de ces recherches est qu'elles sont basées sur des systèmes complexes qui s'inscrivent dans des dynamiques temporelles et en équilibre. Sur un sujet aussi pluridisciplinaire, il est bien évident qu'il faut rassembler des compétences d'horizons variés provenant d'hommes et de femmes motivés à l'esprit de pionnier car ces recherches, sortant souvent hors des sentiers battus, sont à haut risque. C'est sur le site de Montpellier que nous avons réussi à cristalliser le mieux la dynamique autour de cette thématique, comme en témoignent la signature du partenariat avec l'Université Montpellier 2 et bien sûr celle avec Agropolis Fondation pour conduire en commun un programme de recherche sur "La Plante Numérique et ses applications", objet du contenu de ce numéro 12 de Lisa. Enfin, je suis particulièrement heureux que la proposition Campus Université Montpellier Sud de France, qui a le soutien de l'INRIA, ait été récemment couronnée de succès.

Gérard Giraudon

Directeur de l'INRIA Sophia Antipolis - Méditerranée

► L'INRIA renforce sa présence à Montpellier par de nouveaux partenariats

■ avec Agropolis Fondation



Face aux enjeux de l'agronomie et du développement durable, Agropolis Fondation et l'INRIA viennent de signer une convention par laquelle les deux partenaires s'engagent à soutenir des actions de recherche à caractère finalisé, à l'interface entre les sciences agronomiques, les mathématiques et l'informatique.

L'objectif est de structurer et renforcer une communauté scientifique rayonnant à l'international centrée sur les approches de modélisation mathématique et informatique de la plante et de ses utilisations, afin d'en faire une thématique scientifique majeure du pôle montpellierain.

Il s'agit de construire des modèles pour mieux comprendre, simuler et prévoir le développement des plantes et le fonctionnement des écosystèmes, en interaction avec leur environnement. Il s'agit également de confronter les prédictions de ces modèles aux observations, voire de guider l'expérimentation. Les enjeux sont l'optimisation et l'adaptation des systèmes de production, en particulier face aux changements climatiques et aux agressions biologiques dans une logique de développement durable.

■ avec l'Université Montpellier 2 (Sciences et techniques)



L'INRIA, dans le cadre de sa politique générale définie dans son Plan stratégique 2008- 2012, conduit son développement régional en étroite partenariat avec les universités, les écoles et les organismes de recherche, dans le but de favoriser l'émergence en France de pôles d'excellence en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC) visibles au meilleur niveau international.

Dans ce cadre, l'INRIA et l'Université Montpellier 2 ont signé le 5 mai dernier un accord-cadre de partenariat scientifique et technologique, visant à mettre en place des équipes-projets INRIA (EPI) avec pour objectif principal le développement d'un pôle d'excellence dans le domaine des STIC à Montpellier.

C'est à travers son centre de recherche Sophia Antipolis - Méditerranée que l'INRIA développe ces relations avec la volonté de structurer et d'amplifier ses activités scientifiques sur Montpellier et la région Languedoc Roussillon sur deux axes principaux : la plante numérique et la médecine numérique. L'INRIA et l'UM2 ont la volonté de construire un partenariat fort qui doit faciliter la création d'équipes-projets communes, qu'elles soient communes aux deux partenaires ou communes aussi à d'autres partenaires. Ils sont en cela encouragés par le premier succès de l'équipe-projet DEMAR (Déambulation et Mouvement Artificiel) commune avec le CNRS et l'Université Montpellier 2 au sein du LIRMM (UMR 5506 - Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier), équipe-projet dans laquelle l'Université Montpellier 1 est également partenaire.

■ avec le Centre Mutualiste de Rééducation Neurologique Propara

Une lettre d'intention a été signée avec le centre Propara (Centre de rééducation et de réadaptation spécialisé pour paraplégiques et tétraplégiques) pour faciliter l'accueil de chercheurs de l'équipe-projet DEMAR (voir ci-dessus) afin de développer une activité de recherche clinique basée sur l'expérimentation auprès de patients en rééducation neurologique.

Modéliser les plantes

En 1996, Jacques-Louis Lions (mathématicien, premier président de l'INRIA) affirmait que la « modélisation et l'analyse mathématique de situations scientifiques, industrielles ou économiques » suivies de « la construction d'algorithmes et du développement de logiciels adaptés aux évolutions technologiques » étaient devenues une démarche classique en modélisation de la combustion (Images des mathématiques, CNRS, 1996). Il poursuivait : « même si d'autres phénomènes échappent encore à cette méthodologie, elle est en passe d'acquiescer un caractère universel ». Sa pensée traçait, presque explicitement, la voie de la modélisation computationnelle de la plante et des écosystèmes. Ce numéro de LISA aborde ce thème au travers de deux Equipes-Projets INRIA (EPI) présentes à Montpellier : MERE et VIRTUAL PLANTS.

Des plantes virtuelles pour mieux comprendre et maîtriser les plantes réelles

La compréhension et le contrôle de la croissance des plantes ont toujours constitué des préoccupations centrales de l'activité humaine, pour se nourrir, pour se chauffer, pour construire, pour soigner, pour s'habiller, etc. Depuis longtemps, nombre de questions de société reposent ainsi sur l'amélioration des techniques de gestion et de prédiction de l'état, de la production ou de la croissance de la végétation. Au-delà des approches agronomiques traditionnelles, qui tentent d'optimiser de la production de biomasse (fruits, bois...), l'intérêt récent de la société pour les questions concernant l'écologie, le développement durable et le changement climatique appelle le développement d'une meilleure compréhension du rôle essentiel des végétaux dans ces questions. Les problèmes scientifiques associés sont nombreux, complexes et demandent de développer une nouvelle approche scientifique, pluridis-

ciplinaire, dans laquelle il devra être possible de contrôler non seulement la production des plantes mais également la façon dont celle-ci est élaborée par les plantes au cours de leur croissance.

Pour étudier ces questions, les chercheurs développent des modèles du fonctionnement et de la croissance des plantes et les outils de simulation associés. Au cours de la dernière décennie, ce travail de recherche a été stimulé par le développement de la puissance des ordinateurs qui a permis aux technologies de modélisation tridimensionnelle (3D) d'atteindre une phase de maturité. Ceci, à son tour, a favorisé le développement de modèles informatiques 3D de plantes, appelés "plantes virtuelles".

Aujourd'hui, grâce aux progrès de la biologie moléculaire et cellulaire, il est devenu possible d'étudier la croissance des plantes à une échelle cellulaire et d'observer la morphogenèse au niveau même des tissus qui génèrent les différents organes de la plante à l'extrémité de chaque tige: les méristèmes (figure 1.a). Dans un tissu en formation, les cellules grandissent, interagissent, échangent des molécules. Par la microscopie et le marquage fluorescent des molécules (figure 1.b), non seulement nous quantifions un grand nombre de paramètres spatiaux, comme la taille des cellules, leur taux de croissance, leurs plans de divi-



Méristème virtuel
(post-doc Jérôme Chopard, collaboration RDP- ENS Lyon)

sion, mais nous repérons aussi les gènes exprimés à un moment donné dans ces mêmes cellules. Des milliers de cellules en crois-

sance, des milliers de gènes exprimés : comment intégrer ces données ? Comment tirer des conclusions de toutes ces observations ? Des approches de modélisation sont devenues indispensables, et plusieurs équipes à travers le monde, dont l'équipe-projet Virtual Plants, ont commencé des travaux dans ce domaine en liaison étroite avec des équipes de biologistes de l'ENS-Lyon, de l'INRA, du CIRAD et de l'IRD. L'objectif ? Comprendre comment les processus génétiques, physiologiques et environnementaux gouvernent le développement des organes ... L'enjeu ? Avoir à terme une maîtrise raisonnée du développement des plantes en fonction de leurs génotypes et des conditions environnementales (sécheresse, pauvreté des sols, etc.).

Contact : [Christophe Godin](mailto:Christophe.Godin@inria.fr), EPI Virtual Plants

Tél : 04 67 61 65 77

www.inria.fr/sophia/virtualplants

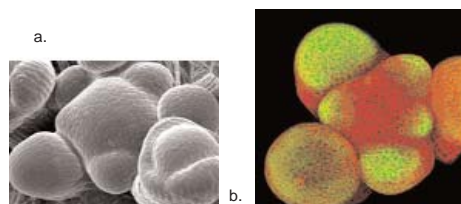


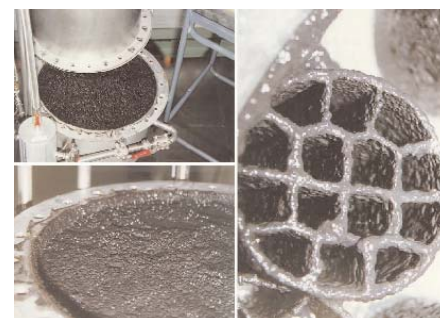
Figure 1. a. Un méristème vu en microscopie électronique. b. Marquage fluorescent de molécules traduisant l'activité d'un gène donné dans certaines cellules du méristème observées en microscopie confocale (photos : J. Traas, ENS-Lyon).

Nos amis les microbes, du bioréacteur à la parcelle

On nous apprend à l'école que les microbes peuvent être dangereux pour notre santé. Et pourtant sur les milliards de microbes présents sur notre planète, la grande majorité nous sont bénéfiques et même nécessaires à notre vie sur Terre. Ils sont en effet de fantastiques agents de dégradation ou de transformation de matières organiques. Sans eux, nos systèmes digestifs seraient incapables de brûler nos nourritures. Sans eux, nos fromages et nos vins seraient insipides. Sans eux, notre planète ne serait qu'une gigantesque décharge. Et bien d'autres encore "services écologiques" que nous leur devons... Depuis Pasteur, l'homme a appris à observer les processus microbiens, à les utiliser ou au contraire à s'en protéger. Dans les stations d'épuration des eaux usées, on ne

fait que reproduire en "bioréacteur" ce que la Nature sait déjà bien faire : convertir des substrats indésirables en boues, mais ici à une échelle volontairement concentrée. Grâce au développement des outils en 'omique' (génomique, protéomique, transcriptomique, ...) les individus "microbes" sont de mieux en mieux cernés. On sait aujourd'hui que c'est la biodiversité qui leur permet de s'adapter aux divers milieux. Mais connaître un catalogue microbien et leurs caractéristiques individuelles est-il suffisant pour comprendre, estimer, prédire et contrôler des écosystèmes de milliards d'individus ? Dans ce monde microscopique, on se bouscule pour accéder à sa nourriture. On se gêne. On s'organise en communauté, dont chacun a sa mission (à chacun son repas préféré), car "l'union fait la force". On les

observe se rassembler et former des flocons ou des biofilms protecteurs. Ils résistent bien nos microbes ! et ingénieusement ! Seraient-ils intelligents ?



Les bactéries ont fait leur travail
© INRA-LBE

s et leurs utilisations

Communiquent-ils entre eux ? Nous sommes encore fort loin d'appréhender tous ces phénomènes issus de la multitude d'individus présents dans un bioréacteur de dépollution ou une parcelle de sol fertile.

Et pourtant c'est à "haut débit" que la biologie moléculaire nous fournit de nouvelles données, mais ce sont de nouveaux modèles mathématiques "spatio-temporels" qui nous manquent pour nous aider à comprendre ce monde à portée de microscopes... Maîtriser, contrôler, optimiser, inventer de

nouvelles utilisations des microbes, tels sont les défis. Et puis il y a ce rêve fou : le monde virtuel ! Construire in silico un écosystème virtuel, et simuler toutes ces expériences que tous les microbiologistes rêvent de monter depuis des décennies... Plus modestement, l'EPI MERE (Modélisation et ressources en eau) réfléchit, élabore et confronte à la réalité des modèles computationnels d'écosystèmes microbiens de la dépollution biologique, en partenariat avec l'INRA et le Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement à Narbonne.

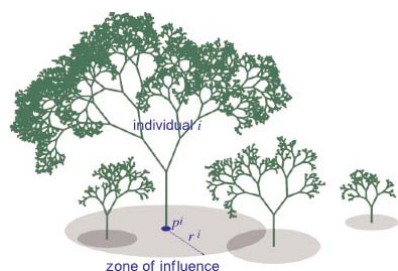
► Simuler une forêt ?

La modélisation de la dynamique d'écosystèmes à grande échelle est à la fois un enjeu décisionnel important et un défi majeur pour les biologistes, notamment ceux travaillant sur les écosystèmes forestiers. Les forêts tropicales sont au cœur de la problématique du réchauffement global. Particulièrement coûteux à mettre en place, les sites forestiers expérimentaux demandent à être exploités sur de grandes échelles de temps. La modélisation computationnelle s'avère être une approche particulièrement pertinente pour répondre à cette exigence. Elle offre aux scientifiques de la forêt un outil expérimental in silico qui permettra de tester des scénarios non vérifiables en pratique, ou d'optimiser les expérimentations sur site.

Les modèles classiques de dynamiques forestières rendent compte de l'évolution globale de la biomasse ou de l'évolution des populations agrégées en classes de diamètres. Ces modèles ne permettent que très partiellement de rendre compte des questions de biodiversité ou d'intégrer les cycles biogéo-

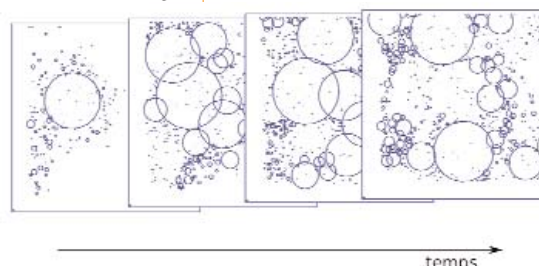
chimiques comme celui du carbone. Ces deux dernières décennies ont vu l'émergence de modèles spatialement explicites et individus-centrés, le plus souvent mis en œuvre à l'aide de procédures de simulation de Monte Carlo. Les probabilités numériques offrent un cadre conceptuel à ces modèles sous la forme de processus de Markov de branchement, spatialement explicites. Ces outils sont déjà développés par Nicolas Champagnat (EPI TOSCA) dans le cadre de la biologie et l'écologie évolutionnaire.

L'EPI MERE anime l'ARC MICR (Action de Recherche Collaborative "Modélisation stochastique, inférence numérique et contrôle pour l'évaluation et la gestion de ressources renouvelables"). Cette ARC a favorisé le développement de liens avec le CIRAD plus particulièrement avec l'unité "Dynamique des forêts naturelles" de Montpellier. Avec l'aide de Nicolas Desassis (post-doctorant EPI MERE), un premier modèle spatio-temporel de dynamique forestière est en cours d'élaboration. En plus d'un cadre mathématique rigoureux, cette approche permet une intégration numérique explicite sous forme d'algorithmes de Monte Carlo. Elle permet enfin de coupler le modèle à des données de nature hétérogène : des relevés de terrain mais éga-



Les modèles individus-centrés intègrent explicitement des modèles de compétition entre individus pour l'accès aux ressources (lumière, eau...). Dans cet exemple simple, une "zone d'influence" est associée à chaque individu (arbre) : la probabilité de mort par compétition de cet individu est alors fonction du pourcentage de cette zone occupée par d'autres individus.

Les dynamiques forestières sont ici modélisées à l'aide de processus markoviens individus-centrés en espace-temps continus et sont simulées sur calculateurs sous forme d'algorithmes de Monte Carlo.



Un bioréacteur semi-industriel © INRA-LBE

Contact : Alain Rapaport, EPI MERE

Tél : 04 99 61 26 52

www.inria.fr/recherche/equipes/mere.fr



Vue aérienne, canopée forestière tropicale - © Photo de Dominique Louppe, CIRAD 2006)

Les forêts tropicales sont au cœur de la problématique du réchauffement global. La modélisation computationnelle de ces écosystèmes est un thème de recherche particulièrement ambitieux qui ne peut se développer que dans un contexte multidisciplinaire.

lement des images de télédétection.

L'EPI ARIANA développe depuis quelques années des outils d'analyse d'images aériennes et satellitaires pour évaluer certaines ressources forestières par comptage et classification des houppiers. Ces méthodes s'appuient sur une modélisation probabiliste spatiale. Il est donc naturel d'envisager de développer une collaboration. Cela permettra d'intégrer aux modèles spatio-temporels, des données de télédétection avec l'appui de techniques d'assimilation de données.

Contact : Fabien Campillo, EPI MERE

Tél : 04 99 61 22 38

www.inria.fr/recherche/equipes/mere.fr

Vivien Rossi - CIRAD, Unité dynamique des forêts naturelles

La mission principale de notre unité est d'élaborer des règles de gestion durable des peuplements forestiers tropicaux, c'est-à-dire exploiter leurs ressources en préservant à long terme leurs différentes fonctions écologiques, économiques et sociales. Au-delà de la compréhension des mécanismes biologiques et écologiques sous-jacents à cet écosystème forestier, cela nécessite de modéliser les dynamiques de ce peuplement pour d'une part, affiner cette compréhension et pour, d'autre part, étudier par simulations ses réactions face aux perturbations.

Notre partenariat avec l'INRIA, initié par Fabien Campillo de l'EPI MERE dans le cadre de l'ARC MICR début 2007, vise à développer des modèles décrivant fidèlement les dynamiques forestières tout en restant rigoureux mathématiquement. Les compétences de MERE en matière de modélisation permettent de combiner les concepts les plus récents et aboutis de modèles spatio-temporels aux connaissances du CIRAD en matière de modélisation forestière. Cette collaboration donne déjà des résultats prometteurs.

Partenariat



Entretien avec Anne-Lucie Wack, directrice de Agropolis Fondation

Pourquoi ce partenariat entre Agropolis Fondation et l'INRIA ?

Il existe à Montpellier, et dans ses environs - Avignon, Perpignan - une concentration de compétences scientifiques de premier rang mondial sur la Plante, récemment labellisée comme Réseau Thématique de Recherche Avancée (RTRA). Ce réseau, porté par Agropolis Fondation, rassemble des équipes de haut niveau travaillant depuis le gène jusqu'à la plante entière, les agro-écosystèmes et l'utilisation des plantes, sur un très grand nombre d'espèces tempérées, méditerranéennes et tropicales.

Il existe par ailleurs à Montpellier un pôle de compétences, fort de plus de 500 scientifiques dans le domaine des Mathématiques & STIC, pôle que vient conforter la nouvelle dynamique liée à l'arrivée de l'INRIA sur le site de Montpellier.

C'est la conjonction unique de ces compétences, mais aussi la très forte dynamique de structuration et de réorganisation du paysage scientifique local - encore récemment confortée par la récente sélection de Montpellier dans le cadre de l'Opération Campus- qui constituent le terreau du partenariat entre Agropolis Fondation et l'INRIA.

Ce contexte montpelliérain très dynamique offre en effet aujourd'hui des outils et des facilités nou-

velles pour mobiliser des compétences de différentes disciplines et pouvoir ainsi explorer les nouvelles questions scientifiques posées aux Mathématiques et à l'Agronomie par l'évolution des technologies (par ex. analyses haut débit générant de grandes masses de données) et par les grands défis liés au développement des plantes, base de la bio-économie mondiale : demande croissante d'utilisation des plantes, à des fins alimentaires et non alimentaires (les bio-énergies, le carbone vert...); interactions plantes cultivées et changement climatique; prévention des risques sanitaires, environnementaux et sociaux.

C'est dans cette perspective qu'Agropolis Fondation et l'INRIA ont décidé de soutenir, ensemble, des recherches interdisciplinaires et finalisées sur les "Plantes et Ecosystèmes numériques". L'ambition de ce partenariat est double : faire en sorte que cette thématique devienne à Montpellier une thématique majeure reconnue et visible à l'international, et susciter sur ces questions une mobilisation forte de partenaires du secteur public et privé. C'est donc un important effet de levier qui est escompté.

Ce partenariat a été mis en œuvre dès sa signature, avec le lancement d'un premier appel à projets sur les "Plantes et Ecosystèmes numériques".

Contact : Anne-Lucie Wack

Tel : 04 67 04 75 74

www.agropolis-fondation.fr

Agropolis Fondation, créée en 2007 par l'INRA, le CIRAD et Montpellier SupAgro, récemment rejoints par l'IRD, est la Fondation de Coopération Scientifique support juridique du Réseau Thématique de Recherche Avancée (RTRA) "Montpellier Agronomie et Développement Durable", labellisé en octobre 2006 dans le cadre des nouvelles mesures de la Loi de programme pour la recherche du 18 avril 2006.

Ce RTRA est un réseau pluridisciplinaire qui rassemble environ 800 scientifiques travaillant sur la Plante au sens large du terme (du gène aux systèmes) avec une très large gamme de disciplines en sciences bio-techniques et sciences sociales.

La Fondation bénéficie d'une dotation initiale de 20 millions d'euros, auxquels s'ajoutent un engagement de 5 millions d'euros de la région Languedoc-Roussillon, et près d'un million d'euros apportés par l'IRD-nouveau membre fondateur- et l'INRIA dans le cadre du récent partenariat sur les "Plantes et écosystèmes numériques".

La Fondation est localisée à Montpellier, au cœur de la communauté scientifique Agropolis International, forte de plus de 2300 scientifiques dans le domaine agri-environnemental, avec une expertise reconnue sur les problématiques méditerranéennes et tropicales.

La mission de la Fondation est de favoriser l'ouverture, la visibilité et l'attractivité internationale du réseau, notamment en permettant aux équipes d'attirer à Montpellier les meilleurs scientifiques mondiaux du domaine et de renforcer leurs partenariats internationaux avec le secteur public ou privé.

Pour cela, la Fondation lance régulièrement des appels à projets. En 2007, 21 projets ont été ainsi financés pour un montant total de 1,6 millions d'euros. Une deuxième vague d'appels à projets de la Fondation a été lancée le 10 avril 2008.

Programme EuroMéditerranée 3+3

Le programme EuroMéditerranée 3+3 (Algérie, Espagne, France, Italie, Algérie, Maroc, Tunisie) est destiné à créer un espace méditerranéen de collaboration scientifique dans le domaine des mathématiques appliquées et de l'informatique, notamment pour les sciences du vivant et de l'environnement. Lancé initialement par l'INRIA en 2006, il fédère aujourd'hui l'INRIA, l'INRA et le CIRAD du côté français, mais aussi le MESRS (Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique d'Algérie), le CNRST (Centre National de la Recherche Scientifique et Technique du Maroc) et le MESRST (Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de la Technologie de Tunisie).

L'objectif de ce programme est de :

- développer et structurer les liens régionaux médi-

terraneens de l'INRIA (en particulier à travers son centre de recherche Sophia Antipolis - Méditerranée), du CIRAD (Centre Agropolis de Montpellier) et de l'INRA avec leurs partenaires du Maghreb, d'Espagne et d'Italie,

- préparer des programmes scientifiques plus ambitieux associant l'ensemble des partenaires de l'Arc méditerranéen et le Maghreb, destinés à la Commission Européenne, par exemple.

Il s'agit, à partir d'un appel annuel à projets (dernier appel clôturé au 15 juin 2008), de sélectionner des **Réseaux Thématiques** assis chacun sur un minimum de deux pays du Nord et de deux pays du Sud pour les développer en finançant la mobilité de leurs membres.

Parmi les 7 projets retenus lors du premier appel à projets, 2 concernent des équipes du centre INRIA Sophia Antipolis - Méditerranée :

- RORAS, Robotique pour la Réhabilitation et les mouvements Articulaires Simulés, avec l'Equipe-

Projet INRIA COPRIN (Contraintes, OPTimisation et Résolution par INTervalles), l'Université de Sciences et de Technologie d'Oran (Algérie), l'Ecole nationale d'Ingénieurs de Monastir (Tunisie) et l'Universita di Cassino (Italie),

- E2M, Epuration des eaux et modélisation, avec l'Equipe-Projet INRIA MERE (Modélisation et ressources en eau), l'Université Aboubekr Belkaid Tlemcen (Algérie), l'Université de Tunis ElManar LAMSIN (Tunisie), Politecnico di Milano et SISSA Trieste (Italie) et l'université de Mulhouse.

Le bilan des 3 ans du programme fera l'objet d'une **manifestation à Sophia Antipolis du 8 au 10 octobre 2008**, au cours de laquelle les projets retenus dans l'appel 2008 seront présentés.

Contact : Suzanne.Reynders@inria.fr

Relations internationales INRIA Sophia Antipolis - Méditerranée

Tél : 04 92 38 79 75

<http://www-direction.inria.fr/international/>