

**PROGRAMME FEDERATEUR « AGRICULTURE ET DEVELOPPEMENT DURABLE »  
Appel à propositions de recherche 2006**

DECEMBRE 2006

**1- FICHE D'IDENTITE DU PROJET****Titre du projet**

<b>La viabilité : une contribution à l'ingénierie du développement durable</b>
--

**Acronyme**

<b>DÉDUCTION</b>
------------------

**Résumé court**

L'expression « développement durable » est largement adoptée, cependant l'explicitation de politiques d'actions « durables » pose problème. L'objectif du projet est de fonder une ingénierie du développement durable intégrant l'activité de contrôle et de régulation. Pour cela, nous associons des laboratoires fondamentaux proposant des formalismes mathématiques originaux, en particulier la théorie de la viabilité, et des partenaires maîtrisant des applications représentatives des enjeux liés au développement durable.
--

**Responsable du projet**

Civilité (M, Mme, Mlle)	Mlle	Titre	IGREF	Nom	Martin	Prénom	Sophie
Adresse électronique	<a href="mailto:sophie.martin@cemagref.fr">sophie.martin@cemagref.fr</a>		Tel	06.20.66.31.32		Fax	04.73.44.06.97
Établissement	Cemagref						
Unité (nom complet)	LISC (Laboratoire d'Ingénierie pour les Systèmes Complexes)						
Département							
N° d'unité							
Directeur d'unité	M Deffuant Guillaume						
Adresse	24, avenue des Landais, B.P. 50085						
Code Postal	63172		Ville	Aubière Cedex 1			

**Ce projet fait-il partie des projets labellisés (ou en cours de labellisation) par un pôle de compétitivité (ou par plusieurs, en cas de projet interpôle) ?**

Oui [ ]            Non [ x]

**Si oui, nom du pôle ou des pôles :**

**Axe(s) thématique(s)<sup>1</sup> auquel le projet se rattache :**

Thématique 1	Les interactions entre les agricultures, du local au global (3.6)
Eventuellement Thématique 2	Capitalisation et mobilisation des savoirs pour le développement durable (3.7)
Eventuellement Thématique 3	De la préservation à l'amélioration des ressources naturelles par l'agriculture (3.2)

**Principales disciplines associées au projet :**

Discipline 1	Mathématiques appliquées
Discipline 2	Modélisation
Discipline 3	Sciences forestières

**Mots clés libres associés au projet (5 maximum)**

Français	Résilience - Ingénierie – Théorie de la viabilité – Sylviculture – Agriculture sur brûlis
Anglais	resilience - engineering – viability theory – forestry – slash and burn

<sup>1</sup> Cf. « Les thématiques de recherche », partie 3 de l'appel 2006

**PADD 2006 - DEDUCTION**

**Equipes de recherche participantes (équipe 1 = équipe du responsable du projet) :**

<b>Equipe n°</b>	<b>Nom du correspondant principal</b>	<b>Prénom</b>	<b>Titre ou grade + organisme employeur</b>	<b>Discipline</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Département de recherche (le cas échéant)</b>	<b>Unité</b>	<b>Nom et Prénom du Directeur de l'unité</b>
<b>1</b>	Martin	Sophie	IGREF (Docteur)	Mathématiques Appliquées	CEMAGREF		LISC	Deffuant Guillaume
<b>2</b>	Aubin	Jean-Pierre	Professeur émérite	Mathématiques Appliquées	Ecole Polytechnique / CNRS	Sciences Humaines et Sociales	CREA	Petitot Jean
<b>3</b>	Hervé	Dominique	CR1	Agronomie	IRD	Département Sociétés et Santé	UR168 Dynamiques environnementales	Michon Geneviève
<b>4</b>	Meredieu	Céline	Chargée de recherche	Foresterie	INRA	EFPA	UPR EPHYSE 1263	Loustau Denis
<b>5</b>	De Coligny	François	Ingénieur de recherche	Informatique	INRA	EFPA	AMAP	Barthélémy Daniel

PADD 2006 - DEDUCTION

Autres partenaires :

Partenaire n°	Nom du correspondant principal	Prénom	Fonction	Organisme	Sigle Organisme	Ville	Pays
1	Rakotozafy	Rivo	Enseignant-chercheur, Dir. Département de Mathématiques	Univ. Fianarantsoa GERME (Fac. Des Sciences)	UF	Fianarantsoa	Madagascar
2	Saint-Pierre	Patrick	Directeur de recherche (Mathématiques Appliquées)	LASTRE	LASTRE	Paris	France

**PADD 2006 - DEDUCTION**

**Durée du projet :**      24 mois      36 mois

**Nombre de personnes-mois<sup>2</sup> mobilisées pour toute la durée du projet :**

Chercheurs et enseignants-chercheurs permanents	Post doctorants déjà recrutés	Doctorants déjà recrutés	Ingénieurs et techniciens permanents	Personnes à recruter
79	0	12	8	49

---

<sup>2</sup> Nombre de personnes x nombre total de mois de travail sur le projet.

## 2- RESUME DU PROJET

L'enjeu de la distinction entre les actions qui respectent les conditions du développement durable et les autres est considérable tant ce label est utilisé pour promouvoir des activités économiques, sociales ou politiques qualifiées de « durables ».

L'objectif de ce projet est justement de tester des outils mathématiques adaptés à l'ingénierie du développement durable. En effet, l'ingénierie écologique propose des indicateurs qui renseignent sur l'état du système mais ne renseignent pas sur les actions ou politiques d'actions à entreprendre.

Par ailleurs, les théories du contrôle ont largement prouvé leur efficacité par le passé. Cependant, ces théories n'ont été étendue au domaine de l'ingénierie écologique que très récemment, pour le calcul de la résilience. Les notions de résilience et de développement durable étant très liées, nous proposons de montrer par ce projet que la théorie de la viabilité apporte des outils mathématiques efficaces pour l'ingénierie du développement durable, à la fois en tant que formalisme pour poser les problèmes et comme source d'algorithmes pour les résoudre.

L'enjeu de ce projet est donc, dans le cadre de l'agriculture au sens large, de formuler des problèmes de gestion durables typiques et d'élaborer un guide de résolution.

Nous avons réuni au service du projet une association d'équipes interdisciplinaire composée de laboratoires fondamentaux (CREA) et appliqués (LISC), qui développent des méthodes et outils issus de la théorie de la viabilité et de partenaires (INRA, IRD) ayant l'expérience de l'étude de systèmes de l'agriculture au sens large soumis à des enjeux de gestion durable. Le projet s'appuiera sur la compréhension mutuelle des problématiques mathématiques et appliquées afin de formuler des problèmes de gestion durable typiques.

Nous proposons de questionner le concept de développement durable à partir de son lien avec la résilience, puis de formaliser dans le cadre de la théorie de la viabilité des problèmes de gestion durables identifiés dans deux applications, d'élaborer les modèles, méthodes et outils pour les résoudre, autrement dit pour construire des stratégies durables, enfin, de généraliser, d'évaluer la pertinence de la méthodologie et d'établir un guide de résolution de problèmes concrets typiques. Les études de cas portent sur les forêts tempérées dans le cadre de la prescription d'actions sylvicoles et sur la forêt tropicale humide dans le cadre des injonctions de conservation (arbitrage entre conservation de la forêt et intensification de l'agriculture dans le corridor forestier de Fianarantsoa, Madagascar).

Il faudra intégrer les dimensions économiques et sociales du développement durable, nos ignorances sur les dynamiques du système, grâce à la possibilité offerte par la théorie de la viabilité de travailler avec des dynamiques incertaines. Du point de vue algorithmique, l'approximation du noyau de viabilité devra être améliorée pour permettre la résolution de problèmes en grandes dimensions. Une attention particulière sera portée à l'analyse des résultats de simulation ainsi qu'à l'évaluation des stratégies d'actions proposées.

Afin de pouvoir exercer une réflexion critique sur toute la durée du projet, les partenaires travailleront sur un problème simplifié qui intégrera progressivement les raffinements nécessaires. Cette organisation permet en outre à chaque partenaire de commencer à travailler au plus tôt et ainsi d'identifier rapidement les difficultés à surmonter.

Enfin, afin de renforcer la dynamique d'équipe et la compréhension mutuelle entre les partenaires au sein de DEDUCTION, nous proposons l'organisation de quatre réunions plénières, ainsi que l'utilisation de la visioconférence et la création d'un espace de travail collaboratif au sein du site web du projet.

### 3- DESCRIPTION DU PROJET

**A. Problématique et objectifs scientifiques poursuivis ; indiquer notamment, en l'argumentant, le positionnement par rapport au développement durable et par rapport à l'appel 2006, tant en ce qui concerne « L'esprit des recherches attendues » que « Les thématiques de recherche »<sup>3</sup>.**

L'origine de l'expression « développement durable » est la prise de conscience dans les années 60 de la vulnérabilité de la biosphère. Cette expression désigne les efforts entrepris ou à fournir pour parvenir à concilier activités humaines (en particulier croissance économique) et préservation des écosystèmes (Carson 1962, Meadows et al. 1972). Les tentatives de définition du développement durable sont nombreuses, cependant sa signification reste vague (Mebratu 1998). Son utilisation fréquente comme label, attribué souvent sans véritable justification pour promouvoir des activités économiques ou des actions politiques qualifiées de « durables », pose le problème de la distinction entre les actions qui respectent les conditions du développement durable et les autres (Robinson 2004).

L'ingénierie écologique (Cozic 2004) propose des indicateurs, quantités mesurables ou calculables qui donnent des indications sur l'état du système, mais pas sur les actions ou politiques d'actions à entreprendre. Or le pilotage des systèmes est une activité d'ingénierie, mais les contraintes que doivent satisfaire ces indicateurs, individuellement ou combinés, ne sont pas définies. Le problème du développement durable en ingénierie écologique est généralement un problème « mal posé ».

Les théories mathématiques du contrôle ont prouvé leur efficacité dans le domaine de l'ingénierie classique. Martin (2004) a montré comment l'une de ces théories, la théorie de la viabilité, permet de calculer la résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux. Or, les notions de résilience et de développement durable sont très liées (Holling 2002, Kates et al. 2001).

Ainsi, l'objectif de ce projet est de tester l'hypothèse selon laquelle le formalisme de la théorie de la viabilité associé à l'évaluation de propriétés comme la résilience constitue un outil efficace pour l'ingénierie du développement durable dans le cadre de l'agriculture au sens large.

Le projet porte sur le volet « développement durable et agriculture » de l'appel à propositions. Il vise à produire des avancées conceptuelles et théoriques en étudiant comment des concepts utilisés en agronomie et en écologie, en particulier la résilience, et les théories mathématiques du contrôle, en particulier la théorie de la viabilité, peuvent contribuer aux débats sur le développement durable.

Le projet vise également à produire des outils d'ingénierie adaptés aux enjeux du développement durable, basés sur une analyse mathématique des dynamiques en avenir incertain et des contraintes que celles-ci doivent satisfaire. Il participe ainsi à réduire l'écart entre le contenu du discours scientifique et la justification des actions qualifiées de durables, en établissant "une passerelle entre le descriptif et les outils pertinents pour l'action" (2.4). Un retour des résultats obtenus dans les études de cas permettra de juger de la pertinence des cadres conceptuels et outils mathématiques construits (2.6). Le projet met en place un cadre de travail interdisciplinaire entre mathématiques, mathématiques appliquées, modélisations et expertises (2.8).

Les études de cas portent sur la sylviculture et la forêt défrichée pour l'agriculture, prenant le terme agriculture au sens large. Les réponses fournies par l'étude des actions durables dans ces deux écosystèmes permettront de répondre à plusieurs questions issues des thématiques de recherche décrites dans l'appel à propositions : l'évaluation de différentes stratégies concernant les activités productives au regard de la préservation des ressources naturelles, de différents niveaux d'intervention, distinction entre formes d'interactions « freins ou sources d'émulation pour le développement durable ». La critique des résultats obtenus permettra d'appréhender ce que peut apporter la modélisation et les travaux de simulation pour la gestion durable (3.2 - 3.6).

---

<sup>3</sup> Cf parties 2 et 3 de l'appel 2006

**B. «Etat de l'art» du sujet et de la problématique abordés ; bibliographie ; apport des différentes disciplines au projet et contribution scientifique originale du projet ; réflexivité critique vis-à-vis des concepts, outils et méthodes utilisés**

**1. L'expression « développement durable » et le concept de résilience**

L'expression « développement durable » est née dans les années 60 à la suite du rapport du Club de Rome sur les limites de la croissance. Elle est reprise en 1987 dans le rapport Brundtland de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (CMED) et devient dès lors très populaire. Un développement durable est aujourd'hui communément défini comme un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs.

Ce qui devrait être fait pour atteindre une société durable est un enjeu de comportement humain, qui doit être discuté lors de négociations concernant les futurs souhaités sous des conditions de profonde incertitude et que la science seule ne peut résoudre. Cependant, ses contributions peuvent être cruciales pour informer, poser les problèmes et évaluer les implications de différents scénarios. Kates et al. (2001) ont identifié des questions clés pour la science du développement durable et parmi elles, la détermination de « limites » ou « frontières » pouvant constituer des seuils d'alerte au-delà desquels les risques de dégradation du système deviennent significativement importants.

Or, le concept de résilience défini dans le domaine de l'écologie par Holling en 1973 est l'intensité maximale de la force que le système peut absorber sans changer de comportement, de fonctions, de processus de régulation. Ce concept est par conséquent très pertinent dans le contexte du développement durable.

**2. Deux exemples de problèmes de gestion durable dans le secteur de l'agriculture au sens large**

**Forêts tempérées**

Les écosystèmes forestiers sont des milieux fragiles, comme l'ont rappelé plusieurs événements récents (pluies acides, tempêtes Dhôte 2005, sécheresse Pretzsch 2005). Les gestionnaires s'interrogent donc sur la résistance et la résilience des différents peuplements, réguliers ou irréguliers, purs ou mélangés (Dhôte et al. 2005). Comme la forêt européenne est un milieu fortement anthropisé, il est essentiel dans un contexte de développement durable de comprendre l'influence des actions sylvicoles (choix d'essence, traitement) sur la dynamique des peuplements (Brang et al. 2002). Pour cela les chercheurs développent des modèles de dynamique forestière permettant de simuler et de comparer l'effet de différents scénarios (Houllier et al., 1991, Goreaud et al. 2005). Ces outils peuvent notamment être utilisés lors de la mise au point des guides de sylvicultures. Cependant pour l'instant ces modèles concernent essentiellement la production de bois et sa qualité (Pérot & Ginisty 2004), mais offrent peu d'outils pour estimer la résilience des peuplements simulés (Cordonnier 2004).

Dans le cas particulier du Pin maritime dans les Landes de Gascogne la résistance au vent est un problème crucial et les traitements sylvicoles ont un impact (Meredieu et al., 2006) : par exemple la régularité des hauteurs d'arbres dans le peuplement ou la variation de la surface terrière avec les éclaircies.

**Forêt tropicale humide menacée (corridor forestier de Fianarantsoa, Madagascar)**

Le cordon forestier Est représente, le long des hauts plateaux, ce qui reste à Madagascar de la forêt tropicale humide, où des aires protégées sont reliées par des « corridors » parsemés de dispositifs de conservation par zonage, contractualisés et gérés par des groupements villageois. Les injonctions du développement durable poussent à concilier cette conservation de la forêt et des modalités d'intensification de l'agriculture (riziculture de bas-fonds et abattis-brûlis sur pente) permettant d'améliorer les conditions de vie des populations riveraines. Au Centre Est de Madagascar, le corridor forestier de Fianarantsoa est menacé de fragmentation. Le paysage est réduit à une mosaïque forêt-agriculture, avec des déforestations différentes dans leurs dynamiques sur les versants ouest et est, de part et d'autre d'un cordon qui restera en forêt. Les défriches sur forêt peuvent encore s'étendre sur les bas de pentes à partir des bas-fonds aménagés en priorité en rizières pour des cultures alimentaires, jusqu'à ce que leur interdiction conduise à des reports vers d'autres couverts végétaux, jachères ou peuplements de pins. La prochaine saturation des bas-fonds aménageables et l'observation de fragmentations forestières pouvant conduire à des situations stables nous interrogent sur l'étape de la transition forêt-agriculture dans laquelle se trouve le corridor de Fianarantsoa.

Trois questions se posent :

- Quelle est la résilience de ces forêts humides d'altitude après mise en culture par abattis-brûlis ?

- Quelle est la stabilité et la durabilité d'une mosaïque paysagère forêt-agriculture qui garantisse à la fois un maintien de la biodiversité et une production vivrière suffisante pour les populations riveraines ?

- Quelle est la viabilité des systèmes d'exploitation paysans qui en vivent, dans différentes configurations de « mise en défens » (depuis l'exclusion jusqu'à des usages réglementés des ressources forestières) ?

La posture est d'explorer à l'interface entre agronomie et écologie, en priorité des approches simplifiées, globales ou agrégées, de nature mathématique, puis éventuellement des approches individu-centrées si elles se justifient par rapport aux objectifs annoncés.

L'UR 168 de l'IRD gère sur ce site deux conventions, l'une avec le CNRE (Centre national de recherche en environnement) qui prend fin en juillet 2007 et l'autre avec l'Université de Fianarantsoa sur deux ans (2006-2007), renouvelable. C'est dans le cadre de cette convention IRD-Univ. Fianarantsoa (programme MEM) que l'IRD s'affiche équipe partenaire dans le projet DEDUCTION. Les équipes franco-malgaches comprennent des experts (agronomes, écologues, géographes), et des modélisateurs, informaticiens (Java) et mathématiciens.

### 3. La théorie de la viabilité et l'évaluation de la résilience

L'objet de la théorie de la viabilité (Aubin 1991) est d'expliquer mathématiquement et numériquement les évolutions gouvernées par des « systèmes évolutionnaires », qui apparaissent en économie, en écologie, en biologie, etc., aussi bien qu'en automatique (Aubin et al. 2004, Aubin et al. 2000, Aubin 1997). De tels systèmes ne sont pas déterministes, mais régissent sous incertitude des évolutions soumises à des contraintes de viabilité (ou d'optimalité intertemporelle) et guident ces évolutions vers des cibles afin de les atteindre en temps fini. Il s'agit essentiellement de faire émerger les rétroactions sous-jacentes qui permettent de réguler le système et de trouver des mécanismes de sélection pour les mettre en œuvre. Parmi les contrôles ou régulons figurent des matrices de connexions couplant les systèmes écologiques, à forte inertie et échelle de temps profonde avec des systèmes économiques moins inertes à cause des décisions permanentes des êtres humains et à courte échelle de temps pour certaines de ces décisions. Les feedbacks calculés par la théorie de la viabilité décrivent l'évolution de ces matrices de connexion en fonction de l'évolution des variables du système. Une notion toute récente est celle de versatilité d'une évolution, qui associe la plus grande d'une mesure adéquate des vitesses de cette évolution sur un horizon de temps, fini ou infini. La théorie de la viabilité associée à l'algorithme de viabilité (Saint-Pierre 1994) permet de calculer à un état initial la versatilité de telle ou telle composante du système, et en particulier, de leurs dérivées (l'inertie d'une composante étant la versatilité de sa vitesse). La fonction de résilience peut en particulier être calculée par la théorie de la viabilité comme fonction du coût de restauration des propriétés perdues à la suite de violentes perturbations (Martin 2004).

### Bibliographie

- J.-P. Aubin, T. Bernardo & P. Saint-Pierre (2004). A Viability Approach to Global Climate Change Issues, *Advances in Global Change Research*, Haurie A & Viguier (Eds.), Klüwer 113-144.
- J.-P. Aubin, Bonneuil N. & Maurin F. (2000). Non-linear Structured Population Dynamics with Co-Variation, *Mathematical Population Studies* **91**, 1-31.
- J.-P. Aubin (1997). *Dynamic economic theory: a viability approach*, Springer-Verlag
- J.-P. Aubin (1991). *Viability Theory*, Birkhäuser.
- P. Brang, B. Courbaud, A. Fischer, I. Kissling Naf, D. Pettennella, W. Schonenberger, J. Spork & V. Grimm (2002). Developing indicators for the sustainable management of mountain forests using a modelling approach, *Forest policy and economics* **4**, 113 – 123.
- R. Carson (1962). *Silent Spring*, Houghton Mifflin, Boston.
- F. de Coligny, P. Ancelin, G. Cornu, B. Courbaud, P. Dreyfus, F. Goreaud, S. Gourlet-Fleury, C. Meredieu, C. Orazio & L. Saint-André (2004). Copsis : Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture : Open architecture for a shared forest-modelling platform. In *Proceedings of the IUFRO Working Party S5.01-04 conference (September 2002) Harrison, British Columbia, Canada*, pp 371-380.G.
- T. Cordonnier (2004). *Perturbations, diversité et permanences des structures dans les écosystèmes forestiers*. Doctorat ENGREF, Paris XI. 256 p.
- P. Cozic & B. Boisseau (2004). *Ingénierie écologique. Des recherches pour l'action, sur les systèmes écologiques*. Collection Hors-série revue "Ingénieries Eau-Agriculture-Territoires". 156 p.

- J. F. Dhôte (2005). Implications of forest diversity for the resistance to strong winds. In « Forest Diversity and Function : Temperate and Boreal Systems », M. Scherer-Lorenzen, Ch. Körner, E.D. Schulze (éds), Springer Vlg (Berlin), *Ecological Studies* **176**, 291-307.
- J.F. Dhôte, T. Cordonnier, P. Dreyfus & N. Le Goff (2005). Quelques enjeux autour des forêts hétérogènes tempérées. Rendez vous techniques ONF. Numéro spécial forêts hétérogènes.
- F. Goreaud, F. de Coligny, B. Courbaud, F. Dhôte, P. Dreyfus & T. Perot (2005). La modélisation : un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt, *Vertigo* 6(2), 12 pp.
- [http://www.vertigo.uqam.ca/vol6no2/art6vol6no2/vertigovol6no2\\_goreaud\\_et\\_coll.pdf](http://www.vertigo.uqam.ca/vol6no2/art6vol6no2/vertigovol6no2_goreaud_et_coll.pdf)
- L. H. Gunderson & C. S. Holling (2002). Panarchy: understanding transformations in human and natural systems. Island Press, Washington, D.C., USA.
- C. Holling (1973). Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecology and Systematics* **4**, 1–24.
- F. Houllier, J. Bouchon & Y. Birot (1991). Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. *Revue Forestière Française*, XLIII (2), 87-108.
- Kates, R.W. et al. (2001). Sustainability science, *Science* **292**, 641-642.
- J. Lovelock (1991). GAIA: The Practical Guide to Planetary Medicine, Gaia Books, London.
- S. Martin (2005). La résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux. Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, Mathématiques Appliquées.
- S. Martin (2004). The cost of restoration as a way of defining resilience : a viability approach applied to a model of lake eutrophication, *Ecology and Society* **9**(2), 8.
- <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art8/>
- D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers & W. W. Behrens III (1972). The Limits to Growth : a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind, Universe Books, New York.
- D.Mebratu (1998). Sustainability and sustainable development : historical and conceptual review, *Environmental Impact Assessment Review* **18**, 493–520.
- T. Perot & C. Ginisty (2004). Bilan et perspectives sur les modèles de croissance, de dynamique forestière et de qualité des bois. Rapport de convention Cemagref/DGFAR, Cemagref : 190p.
- H. Pretzsch (2005). Diversity and productivity in forests : evidence from long-term experimental plots. In « Forest Diversity and Function : Temperate and Boreal Systems », M. Scherer-Lorenzen, Ch. Körner, E.D. Schulze (éds), Springer Vlg (Berlin), *Ecological Studies* **176**, 41-64.
- J. Robinson (2004). Squaring the circle ? Some thoughts on the idea of sustainable development, *Ecological Economics* **48**, 369–384.
- P. Saint-Pierre (1994). Approximation of viability kernel, *Applied Mathematics and Optimization* **29**, 187–209.

### **C. Résultats attendus et leur pertinence du point de vue de la contribution de l'agriculture aux objectifs de développement durable**

Le principal résultat attendu est un guide méthodologique pour traiter des problèmes typiques de gestion durable comprenant :

- la formalisation mathématique de ces problèmes typiques,
- les algorithmes de résolution et leur implémentation.

Ce guide aura été élaboré à partir de la résolution de problèmes de gestion durable dans deux cas concrets. Pour chaque application, les résultats attendus sont la détermination de stratégies résolvant les problèmes de gestion durable identifiés (par exemple, gestion sylvicole et choix des espèces en forêts tempérées ; localisation des zones cultivées en forêt et temps de régénération forestière comparé à la durée de l'exploitation agricole à Madagascar).

Ces résultats sont pertinents du point de vue du développement durable pour les deux raisons suivantes.

Le développement durable implique des jugements sur les actions humaines, bonnes ou mauvaises, durables ou pas. Les résultats attendus pour les deux applications et le guide permettant de généraliser la méthodologie à d'autres cas concrets répondent très directement à cette exigence.

En outre, la démarche envisagée (reconstruction renouvelée des dynamiques à partir des données et des modèles existants, construction de stratégies durables, puis démarrage d'un nouveau cycle si les résultats obtenus suggèrent des modifications) offre un cadre de développement d'expérimentations

de « médecine écologique » à la manière des médecins « qui parvenaient à la guérison en naviguant à l'estime au milieu des incertitudes scientifiques » (Lovelock 1991). Nous sommes au centre des préoccupations de l'ingénierie écologique qui doit partir d'un « diagnostic » pour apporter des « solutions » ou remèdes. C'est en cela que l'ingénierie écologique rejoint l'agronomie.

#### **D. Description du projet : étapes, méthodologie, outils, données, terrains...**

**L'hypothèse que nous souhaitons tester dans ce projet est le fait que le formalisme de la théorie de la viabilité associé à l'évaluation de propriétés comme la résilience constitue un outil efficace pour l'ingénierie du développement durable.**

##### **1. Etapes**

L'étape 1 : questionner les concepts de développement durable, de durabilité et de gestion durable, en particulier mettre en lumière les contradictions internes et les conditions dans lesquelles elles peuvent être résolues.

L'étape 2 : en s'appuyant sur la réflexion critique précédente, définir des problèmes de gestion durable dans deux applications, sylviculture et interactions agriculture – forêt ; puis en déduire des contraintes sur les modèles des systèmes.

L'étape 3 : dans les deux applications, recueillir éventuellement les données nécessaires et réaliser les modèles.

L'étape 4 : formaliser mathématiquement ces problèmes de gestion durable, trouver les algorithmes de résolution, les implémenter.

(Les étapes 3 et 4 seront menées en parallèle.)

L'étape 5 : coupler modèles et algorithmes de résolution, résoudre les problèmes de gestion durable en calculant les stratégies satisfaisantes.

L'étape 6 : analyser l'adéquation entre les résultats obtenus et les résultats attendus.

L'étape 7 : élaborer un guide de résolution de problèmes de gestion durable typiques.

Nous effectuerons deux cycles (étapes 2 à 6), le premier avec des problèmes de gestion durable simples, le second avec des problèmes comportant des difficultés supplémentaires.

##### **2. Méthodologie**

Dans ce projet, nous souhaitons :

- coupler de manière forte les modèles réalisés dans le cadre de deux applications et des outils d'analyse de ces dynamiques élaborés dans le cadre de la théorie de la viabilité ;
- exploiter ces outils dans le cadre de problèmes de gestion durable concrets, simples puis plus compliqués, pour tester leur efficacité ;
- établir des discussions et mises en commun entre équipes avant et après chaque phase de travail pour s'assurer que les outils proposés par les uns permettent de résoudre les problèmes que se posent les autres.

##### **3. Outils**

###### **Calcul des noyaux de viabilité**

###### L'algorithme de viabilité

L'algorithme de viabilité est un outil puissant qui intègre la description quantitative fonctionnelle de la dynamique d'un système et la description qualitative des contraintes et des objectifs. Lorsque le système est paramétré par un contrôle dynamique et soumis à un environnement incertain, l'algorithme peut générer des règles de décision qui garantissent la pérennité de l'évolution au sens où les contraintes seront toujours satisfaites, les objectifs réalisés et ceci de manière robuste au regard de l'incertitude. Il a été étendu au cas des systèmes hybrides ou impulsionsnels. Les développements de l'algorithme réalisés au sein de LASTRE visent à permettre de traiter des problèmes de viabilité comportant 5 variables d'état.

###### L'approximation avec les Support Vector Machines

Les noyaux de viabilité peuvent être approchés en utilisant un algorithme spécifique, basé sur l'algorithme de viabilité, qui utilise une méthode d'apprentissage statistique : les Support Vector Machines. Cette méthode récente vise à explorer des systèmes avec 7 variables d'états et un grand

nombre de contrôles. La SVM peut également servir de contrôleur et ainsi permettre de déterminer des politiques d'action qui maintiennent le système dans l'ensemble des états désirés.

### **Modèles de forêts tempérées**

#### Le modèle Pin Maritime

Le modèle de croissance du Pin maritime est un modèle de type « arbre en peuplement sans spatialisation ». Il permet de simuler la croissance de peuplements de Pin maritime monospécifiques et équiennes dans différentes stations du massif des Landes de Gascogne. Il est utilisé pour comparer différents scénarios sylvicoles : date et intensité des éclaircies. Les arbres sont caractérisés par leur circonférence à 1.30 m. La croissance et la compétition sont modélisées au niveau peuplement puis la croissance est redistribuée au niveau arbre.

Les entrées de ce modèle sont :

- l'âge du peuplement,
- la surface,
- le nombre d'arbres par classes de circonférence dans la placette,
- un couple (hauteur dominante – âge) permettant de définir la fertilité de la station.

Ce modèle permet de prévoir la circonférence et la hauteur de chacun des arbres du peuplement au cours de sa croissance et selon les dates et les intensités des éclaircies.

#### La plate-forme Capsis

Capsis est un simulateur de croissance d'arbres en peuplements (INRA) avec élaboration d'itinéraires sylvicoles. Il intègre des modèles de croissance de type "arbre indépendant des distances" (MAID), ou de type "peuplement", ou mixte "arbre / peuplement", pour peuplements réguliers monospécifiques. Il a été étendu aux peuplements forestiers hétérogènes (irréguliers et/ou mélangés) en offrant la possibilité d'intégrer des modèles très variés de dynamique forestière. Il prend en compte les principaux processus (croissance, compétition, mortalité et régénération / recrutement) et les différents niveaux pertinents d'organisation spatiale (arbres en peuplement, mosaïque de collectifs d'arbres ou de peuplement-types...). Les modèles candidats sont intégrés dans la plate-forme par co-développement par leurs auteurs.

### **Modèles du corridor forestier de Fianarantsoa**

#### Modèle à compartiments, chaînes de Markov

Dans une problématique de déforestation-régénération forestière, l'analyse des changements d'états du sol à la parcelle nous conduit à analyser les flux entre 2 compartiments (Forêt – Non Forêt) depuis la Forêt ou au contraire dans le sens d'une régénération forestière, ou jusqu'à 6 compartiments d'occupation du sol (Forêts, Recrus forestiers, Jachères herbacées, Cultures sous pluie, Boisements de pins essentiellement, Riziculture de bas-fond), que l'on espère prédire en ayant recours à des chaînes de Markov. On cherche à combiner un modèle probabiliste markovien à un modèle déterministe à base de règles pour relier des pratiques des agriculteurs à l'échelle de la parcelle (mise en culture, mise en jachère, mise à feu) au paysage qui en résulte à l'échelle d'un territoire villageois, que l'on cherche à évaluer par images satellites (SPOT 2004) et photos aériennes plus anciennes.

Pour cerner la transition forêt-agriculture à l'échelle du corridor, on cherche dans un modèle dynamique basé sur des automates cellulaires à relier la saturation des bas-fonds aménageables et l'évolution des massifs forestiers à trois dates (1933-1956-2004) aux données démographiques disponibles par communes (dernier recensement en 2006).

Plusieurs modèles d'évolution de l'occupation du sol sont en chantier :

- le modèle Transition (modélisation des changements d'états au niveau d'un terroir villageois), thèse en informatique de Venot Ratiarson, enseignant-chercheur ENI,
- le modèle Corridor (modélisation du peuplement du corridor à partir de l'aménagement des bas-fonds et la défriche des forêts), thèse en informatique de Cyprien Rakotoasimbahoaka, enseignant-chercheur ENI,
- une recherche sur les dispositifs de conservation par zonage des massifs forestiers et leur gouvernance par les villageois, thèse en agronomie-géographie d'Aurélié Toillier (IRD) et partie d'HDR de Solo Randriamahaleo, mathématicien, enseignant-chercheur ENI.

#### 4. Données

##### Forêts tempérées

Le modèle de croissance PP3 pour le Pin maritime nécessite pour sa mise à jour la poursuite de mesures dendrométriques régulières dans des dispositifs permanents. Le GIS Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers a pour objet l'acquisition de données sur un réseau de placettes de pin maritime. Un technicien de l'Unité Expérimentale de l'Hermitage (INRA UE570) collectera les données nécessaires à la poursuite du projet sur l'ensemble des placettes sylvicoles testant les effets du milieu, de la génétique et du scénario sylvicole sur la croissance du Pin maritime en peuplement.

##### Corridor forestier de Fianarantsoa

###### Données spatiales (portion du corridor) :

Le transect actuellement étudié au nord du corridor (sud du parc de Ranomafana), calé sur 4 cartes topo au 1/100 000, est couvert par des photos aériennes au 1/50 000ème et 1/10 000ème entre 1955 et 1991, images satellite SPOT à 20 m et 10 m de résolution de différentes dates dont la dernière en 2004 validée sur le terrain en 2005.

###### Données agro-écologiques

Des recherches ont porté en 2003-2007 sur les peuplements forestiers et végétations des jachères herbacées-arbustives-arborées, les conditions de la régénération forestière, les dynamiques d'espèces protégées, invasives et/ou valorisées, les variabilités de climat et sols, les potentialités des terrains et cultures, les voies d'intensification agricole.

3 thèses en écologie sont encadrées par S. Carrière :

Herizo Randriambanona (2004-2007) : « Régénération forestière comparée dans les recrus post-agricoles sur forêts artificielles (pins) et sur forêts naturelles de la région du corridor à Fianarantsoa » ; Josua Randriamalala (2006-2008) : « Diversité écologique des jachères » ; Monica Picot (2006-2008) : « Rôles des chiroptères sur le maintien d'une biodiversité dans les zones anthropisées en bordure de forêts ».

###### Données socio-économiques (XXème siècle) :

Evolution de l'occupation du sol en 1911 (premières sources), 1933, 1955, 1975, 1991, 2004 ; Données de recensement par communes consolidées en 1933 et 1956 sur les portions de commune situées dans le corridor (dernier recensement à partir de 2006) ; Typologie d'exploitations agricoles en lisière ou dans la forêt et organisation spatiale en réponse aux mises en défens (thèse d'A. Toillier encadrée par D. Hervé, 2006-2008 : « Impact des dispositifs de conservation par zonage sur l'organisation spatiale de l'agriculture »).

#### 5. Terrains

##### Corridor forestier de Fianarantsoa

Des données démographiques par commune seront accessibles à partir de 2007 (premiers résultats du dernier recensement) et la validation sur le terrain d'images SPOT supplémentaires peut être menée dès mars 2007, soit sur le même transect, soit sur un transect additionnel plus au sud du corridor.

Des interprétations d'images sont à compléter pour disposer de jeux de cartes d'occupation du sol à trois dates et des extensions de l'aire du corridor couverte sont envisageables. A. Toillier a contribué à l'élaboration d'un SIG sur MapInfo mais qui devra être actualisé à partir de 2007 sur poste de recrutement local. Logiciels SIG et de traitement d'images sont à installer à l'Université de Fianarantsoa sur poste de travail ordinateur + imprimante.

Le traitement d'images de faciès paysagers en lisière de forêt ou de mosaïques forêt-agriculture dans lesquels on connait l'histoire culturelle des parcelles et/ou les règles de transition entre états d'occupation du sol et/ou des successions de formations végétales est une opération importante pour valider le modèle de Markov, qui peut nécessiter un survol avion de portions déterminées du paysage. Pour les modèles de changement d'états, des histoires culturelles des parcelles depuis la première défriche sont à compléter afin d'atteindre une profondeur temporelle de 20 à 40 ans (Hervé, Carrière, Randriambanona, Randriamalala).

##### E. Organisation et conduite du projet :

**E1. décrire l'organisation générale du projet sous forme de « work packages » en indiquant, pour chacun, ses objectifs, son responsable, les équipes impliquées et les principaux participants, son calendrier, son contenu (tâches), les résultats attendus et les**

« deliverables » ; un « work package » spécifique devra porter sur la coordination du projet.

### 1. Structure du projet, interactions entre les WPs et organisation dans le temps

Le projet est composé de 6 Work Packages :

WP1 : La gestion durable en pratique comme problème de viabilité.

WP2 : Modélisation des problèmes de gestion durable dans les applications

WP3 : Construction de stratégies durables : méthodes mathématiques et applications

WP4 : Réflexion critique : élaboration d'un guide de résolution de problèmes concrets de gestion durable

WP5 : Diffusion des résultats

WP6 : Animation et coordination

Afin de pouvoir exercer une réflexion critique au cours du projet et non seulement à son terme, les tâches des WPs seront effectuées par les partenaires dans un premier temps sur un problème simplifié, les raffinements seront intégrés par la suite. Cette organisation permet en outre à chaque partenaire de commencer à travailler tôt et ainsi à identifier rapidement les difficultés à surmonter.

Le plan de travail comporte 3 phases :

#### Première phase (mois 0-5) : définir le(s) problème(s) de gestion durable

Cette phase est contenue dans le WP1 et toutes les équipes sont impliquées.

#### Deuxième phase (mois 5-15) : phase pilote

Dans WP1, définir pour chaque application des problèmes de gestion durable simples.

Dans WP2, développer un modèle simple pour chaque application, puis tester les méthodes et algorithmes appliquées aux problèmes de gestion durable simples définis dans WP1.

Dans WP3, développer les méthodes et algorithmes pour résoudre ces problèmes simples, coupler les modèles et les algorithmes, calculer et analyser les solutions.

Dans WP4, critique des résultats obtenus impliquant toutes les équipes

Remarque : « simple » doit se comprendre comme suffisamment simplifié pour pouvoir être traités par des méthodes et outils élaborés au cours de cette phase.

#### Troisième phase (mois 15-36) : phase de développement

Dans WP1, définir des problèmes de gestion durables intégrant des difficultés supplémentaires.

Dans WP2, faire des modèles plus raffinés des applications prenant en compte les enjeux posés par les problèmes de gestion durables définis dans WP1 et les implémenter, incluant éventuellement la production de données complémentaires pour les calibrer et les valider.

Dans WP3, élaboration de nouvelles méthodes pour traiter les problèmes raffinés et intégrer les critiques issues de la phase pilote.

Dans WP4, analyse critique des méthodes employées, généralisation et élaboration d'un guide de résolution des problèmes de gestion durable dans le cadre de la théorie de la viabilité.

En fait, il s'agit d'une boucle entre WP1, WP2, WP3 et WP4 : WP1 définit des problèmes de gestion durables, WP2 crée le modèle du système qui intègre les éléments contenus dans le problème posé par WP1, WP3 crée les méthodes et les outils pour résoudre le problème posé par WP1 dans le cadre du modèle élaboré par WP2, WP4 critique les résultats obtenus, WP1 intègre ces critiques dans la redéfinition des problèmes, ...  
Il est prévu d'effectuer cette boucle deux fois.

Le diagramme de la figure 1 illustre la structure du projet et les interactions entre WPs, le diagramme de la figure 2 détaille la progression dans le temps.

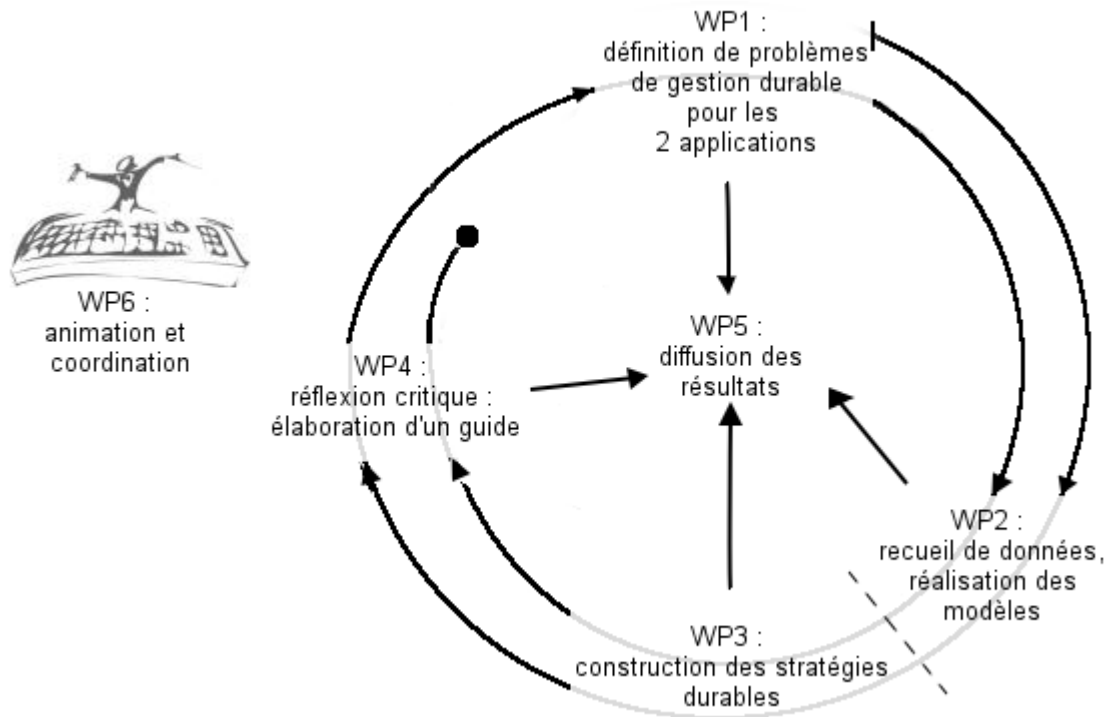


Figure 1: Structure du projet

Ce projet regroupe des équipes étudiant des systèmes de l'agriculture au sens large soumis à des enjeux de gestion durable et des équipes élaborant des outils mathématiques et algorithmiques dans le cadre de la théorie du contrôle. Les échanges entre ces équipes sont essentiels à la réussite de ce projet. Le plan de travail est organisé de telle sorte que ces échanges précèdent toutes les phases de travail. Trois réunions plénières seront organisées au cours du projet (au début du projet, au terme de la phase pilote, et pour la dernière phase de WP4). En dehors de ces réunions, les échanges entre les équipes seront assurés par l'intermédiaire d'un espace de travail collaboration au sein du site Web, par visio-conférence et déplacements ponctuels.

## 2. Description détaillée des WPs

### WP1 : La gestion durable en pratique comme problème de viabilité

**Objectifs** : Bien poser les problèmes de gestion durable

**Responsable** : Sophie Martin (LISC)

**Equipes impliquées et principaux participants** : LISC (Martin S., Chapel L., Huet S., Alvarez I., Goreaud F.) CREA (Aubin J.P., Frankowska H., Bourguine P.) LASTRE (Saint-Pierre P.) MEM (Hervé D.) EPHYSE (Meredieu C.) AMAP (de Coligny F.)

**Calendrier** : 0 – 5 mois ; 15-17 mois

#### **Contenu** :

Tâche 1.1 : réflexion conceptuelle sur le développement durable à partir de son lien avec la résilience (bibliographie, échange entre les mathématiciens, les modélisateurs, les spécialistes de terrain)

Tâche 1.2 : formalisation dans le cadre de la théorie de la viabilité de problèmes de gestion durables identifiés dans les deux applications (de difficultés croissantes) et mise au point de la procédure de validation des résultats

Tâche 1.3 : à partir de ces problèmes, définition des contraintes sur les modèles à réaliser dans WP2

#### **Résultats attendus** :

R 1.1 La formulation de problèmes de gestion durables dans les deux applications

R 1.2 Les caractéristiques de problèmes-types de gestion durable

**WP2 : Modélisation des problèmes de gestion durable dans les applications (recueil de données, reconstruction des dynamiques)**

**Objectifs : réaliser des modèles permettant d'étudier les problèmes de gestion durables définis dans WP1**

**Responsable : Dominique Hervé (IRD)**

**Equipes impliquées et principaux participants : LISC (Martin S., Goreaud F.) MEM (Hervé D., Carrière S., Toillier A.) EPHYSE (Meredieu C.) AMAP (de Coligny F.) Univ Fianarantsoa ( Razanaka S., Ratiarson V., Rakotoasimbahoaka C.)**

**Calendrier : 5-10 et 17-28 mois**

**Contenu :**

Tâche 2.1 : Choix formels des variables et des dynamiques en fonction des problèmes de gestion durables formulés au WP1

Tâche 2.2 : Recueil de données éventuellement, puis reconstruction des dynamiques ou adaptation de modèles existants pour chaque application

Tâche 2.3 : Mise en commun des expériences

**Résultats attendus :**

R 2.1 Pour chaque application, des modèles permettant d'étudier les problèmes de gestion durable formulés au WP1

-----

**WP3 : Construction de stratégies durables : méthodes mathématiques et applications**

**Objectifs : développer et mettre en œuvre dans les deux applications les méthodes et outils de résolution issues de la théorie de la viabilité**

**Responsable : Jean-Pierre Aubin (CREA)**

**Equipes impliquées et principaux participants : LISC (Martin S., Chapel L., Alvarez I., Goreaud F.) CREA (Aubin J.P., Frankowska H.) LASTRE (Saint-Pierre P.) EPHYSE (Meredieu C.) Univ Fianarantsoa (Rakotozafy Rivo, Randriamahaleo Solo)**

**Calendrier : 5-14 et 17-34 mois**

**Contenu :**

Tâche 3.1 : Formalisation et résolution mathématique des problèmes de gestion durable types décrits lors de WP1

Tâche 3.2 : Développement et implémentation des algorithmes (algorithme de viabilité, SVMs, algorithmes génétiques)

Tâche 3.3 : Couplage des algorithmes avec les modèles réalisés dans WP2 et calcul des solutions aux problèmes concrets posés dans WP1

Tâche 3.4 : Analyse des résultats : pertinence, incertitude et confrontation avec les experts

Tâche 3.5 : Mise en commun des résultats obtenus dans les deux applications

**Résultats attendus :**

R 3.1 : Des méthodes et des algorithmes pour résoudre les problèmes de gestion durable définis dans WP1

R 3.2 : Les solutions des problèmes de gestion durable posés dans WP1 pour les deux applications

R 3.3 : L'évaluation des solutions pour les deux applications

-----

**WP 4 : Réflexion critique : élaboration d'un guide de résolution de problèmes concrets de gestion durable**

**Objectifs : analyser l'efficacité de la méthodologie employée et la généraliser à des problèmes de gestion durable typique**

**Responsable : Sophie Martin (LISC) et post-doc (LISC)**

**Equipes impliquées et principaux participants : LISC (Martin S., Chapel L., Huet S., Alvarez I., Goreaud F.) CREA (Aubin J.P., Frankowska H., Bourguine P.) LASTRE (Saint-Pierre P.) MEM (Hervé D.) EPHYSE (Meredieu C.) AMAP (de Coligny F.)**

**Calendrier : 13-16 et 32-36 mois**

**Contenu :**

Tâche 4.1 : analyse de l'adéquation entre les problèmes posés et les résultats obtenus à partir des résultats de WP1 et WP3

Tâche 4.2 : évaluation de l'efficacité de la méthode sur les résultats obtenus dans les applications : gain par rapport aux méthodes de gestion utilisées jusque là ; coûts de la mise en œuvre, identification des facteurs limitants et des corrections à apporter.

Tâche 4.3 : généralisation et élaboration d'un guide méthodologique pour traiter les problèmes typiques de gestion durable définis dans WP1

**Résultats attendus :**

R 4.1 : Une analyse critique de la méthode à partir des résultats de WP3

R 4.2 : Un guide méthodologique pour traiter des problèmes typiques de gestion durable.

-----

**WP5 : Diffusion des résultats**

**Objectifs : communiquer les travaux réalisés et les résultats obtenus**

**Responsable : Paul Bourguine (CREA)**

**Equipes impliquées et principaux participants : LISC (Martin S.) CREA (Bourguine P.)**

**Calendrier : 5-36 mois**

**Contenu :**

Tâche 5.1 : Réalisation d'un site web, mise en ligne des travaux menés dans les WP1-2-3-4

Tâche 5.2 : Rédaction d'articles

Tâche 5.3 : Organisation d'un workshop final

**Résultats attendus :**

R 5.1 : Site Web

R 5.2 : Articles

-----

**WP6 : Animation et coordination**

**Objectifs : Susciter et faciliter les échanges entre équipes multi-disciplinaires, assurer le bon déroulement des tâches, le respect du calendrier, les échanges avec l'ANR**

**Responsable : Sophie Martin (LISC)**

**Calendrier : 0-36 mois**

**Contenu :**

Tâche 6.1 : Organisation des trois réunions plénières.

Tâche 6.2 : pour chaque WP, en coordination avec le responsable, organisation de rencontres entre les équipes partenaires impliquées.

Tâche 6.3 : animation de l'espace de travail du site Web

Tâche 6.4 : validation des résultats attendus dans WP1, WP2, WP3 et WP4.

Tâche 6.5 : rédaction des rapports intermédiaires scientifiques et financiers.

**Résultats attendus :**

R 6.1 : Rapports d'avancement annuels

R 6.2 : Comptes-rendus des réunions

-----

**E2. indiquer la contribution de chaque équipe à la mise en œuvre du projet (tâches prises en charge par chaque équipe) et les modalités de coordination entre les différentes équipes ;**

**1. LISC**

Ses travaux en théorie de la viabilité et en modélisation placent le LISC comme intermédiaire entre les équipes thématiques et disciplinaires. Sophie Martin coordonne le projet.

L'équipe du LISC est engagée de manière significative dans tous les WPs, et plus particulièrement la formulation des problèmes de gestion durable, le développement des modèles pour l'application en sylviculture, l'approximation des noyaux de viabilité avec des SVMs, l'analyse des résultats et la réflexion critique. F. Goreaud sera très impliqué dans la modélisation en sylviculture, il effectuera une part importante du travail de modélisation lié à cette application.

**2. CREA**

L'équipe du CREA sera spécifiquement chargée des questions de conceptualisation, de formalisation et de modélisation mathématique, en étroite collaboration avec LASTRE spécifiquement chargée des problèmes algorithmiques et des équipes du CEMAGREF, de l'INRA et de l'IRD pour les problèmes concrets de sylviculture et d'agriculture sur forêt motivant la formalisation mathématique.

L'équipe du CREA contribuera non seulement à l'exploitation des travaux sur la résilience, mais s'attachera également à l'examen du couplage des systèmes écologiques (sylvestres, en particulier, avec des échelles d'inertie fortes et d'échelles de temps profond) avec les systèmes économiques (de fait, macro-économiques), aux échelles de temps courtes (au moins, en ce qui concerne les décisions prises sans prendre en compte les contraintes passées). Dans le cas du couplage des systèmes écologique et économique, l'équipe du CREA se posera le problème de minimiser au moment de la décision les coûts futurs (à un horizon fini ou infini) nécessaires au maintien de la viabilité et/ou de la résilience du système écologique considéré (coût de la transition économique). Les systèmes à structure d'âge (celui des arbres plantés régulièrement) seront examinés pour explorer leur pertinence en sylviculture.

**3. MEM**

L'équipe du MEM réunira sur le chantier malgache les données disponibles (surtout 2007) et collectera les données complémentaires (2007 et 2008) nécessaires à l'implémentation des modèles envisagés. Les travaux de thèse en cours seront valorisés dans la mesure du possible dans les questions de développement durable prioritaires et les enseignants-chercheurs du GERME (Groupe d'étude et de recherche pour la modélisation en environnement), équipe interdisciplinaire math-info de l'Université de Fianarantsoa, seront associés à l'implémentation mathématique et informatique.

**4. EPHYSE**

L'unité de recherche Ephyse sera chargée de mettre à disposition le modèle de croissance PP3 pour le Pin maritime implémenté sous la plate-forme de simulation CAPSIS. Elle apportera son expertise sur le fonctionnement des écosystèmes à base de pins maritimes dans le cadre d'une gestion sylvicole active. Cette expertise se fera en étroite collaboration avec l'expertise de modélisation forestière du LISC. Les mesures de croissance dans les peuplements seront poursuivies pour permettre l'amélioration future du modèle en fonction des recommandations faites dans ce projet.

**5. AMAP**

L'intégration de nouveaux modèles et outils dans la plate-forme Capsis est régie par une charte acceptée par les nouveaux partenaires. Celle-ci précise qu'AMAP assure la formation, l'aide au démarrage et le support nécessaires. La formation peut se faire lors de sessions annuelles ou bien à la demande pour des besoins précis. L'aide au démarrage est planifiée de concert dans les meilleurs délais une fois le projet effectivement démarré. Le support s'effectue à la demande au gré des besoins.

La plate-forme est diffusée sous licence libre avec la plupart de ses composants qui peuvent du coup être réutilisés aisément par les autres partenaires du projet Capsis.

**E3. décrire le calendrier général du projet sous forme d'un échéancier récapitulatif des différents « work packages », tâches, « deliverables » ; un diagramme de Gantt (déroulement des tâches dans le temps) est souhaitable.**

Voir figure 2.

**E4. Le cas échéant, indiquer les coordinations prévues avec d'autres programmes ou projets de recherche, notamment ceux déposés dans le cadre du programme fédérateur ADD (appels 2005 ou 2006).**

Le terrain à Madagascar du corridor forestier de Fianarantsoa est également un site de l'ADD GATO (« Gouvernance, Agricultures, Territoires, Organisations »), projet soumis à l'ANR en 2006, dirigé par Sylvie Lardon (INRA-SAD, UMR Métafort, Clermont-Ferrand), Eduardo Chia (Ensam-Cirad) et Jean-Philippe Tonneau (CIRAD). La thématique spécifique à ce site est la transformation des territoires sous une injonction de conservation des forêts, et la recherche de dispositifs de gouvernance conciliant conservation et développement agricole, en associant les acteurs au processus.

**F. Difficultés et risques susceptibles de peser sur la bonne réalisation du projet et moyens prévus pour y parer**

Connexion internet à Fianarantsoa soumise à intempéries de nature climatique pendant la période des cyclones. Pas de visio-conférence actuellement opérationnelle ni à Antananarivo, ni à Fianarantsoa. La ville de Fianarantsoa est à 8-10h de route de la capitale Antananarivo et joignable éventuellement par petit avion.

**G. Autres**

Appartenance du LISC au réseau européen ALTER-NET dont le domaine de recherche est l'étude des interactions entre écosystèmes, biodiversité et société.

Appartenance du CREA au réseau européen ONCE-CS (prolongement du réseau Exystence) dont l'objectif est de renforcer les coopérations dans le domaine de la recherche sur les systèmes complexes.

Animation scientifique à Montpellier, par l'UR 168 de l'IRD, sur la modélisation de l'environnement Montpellier (atelier AME, 2003-2005 puis 2006-2007 et colloque de décembre 2005, NSS-Dialogues/IRD, avec CIRAD et CEMAGREF)

### Diagramme de Gantt des tâches

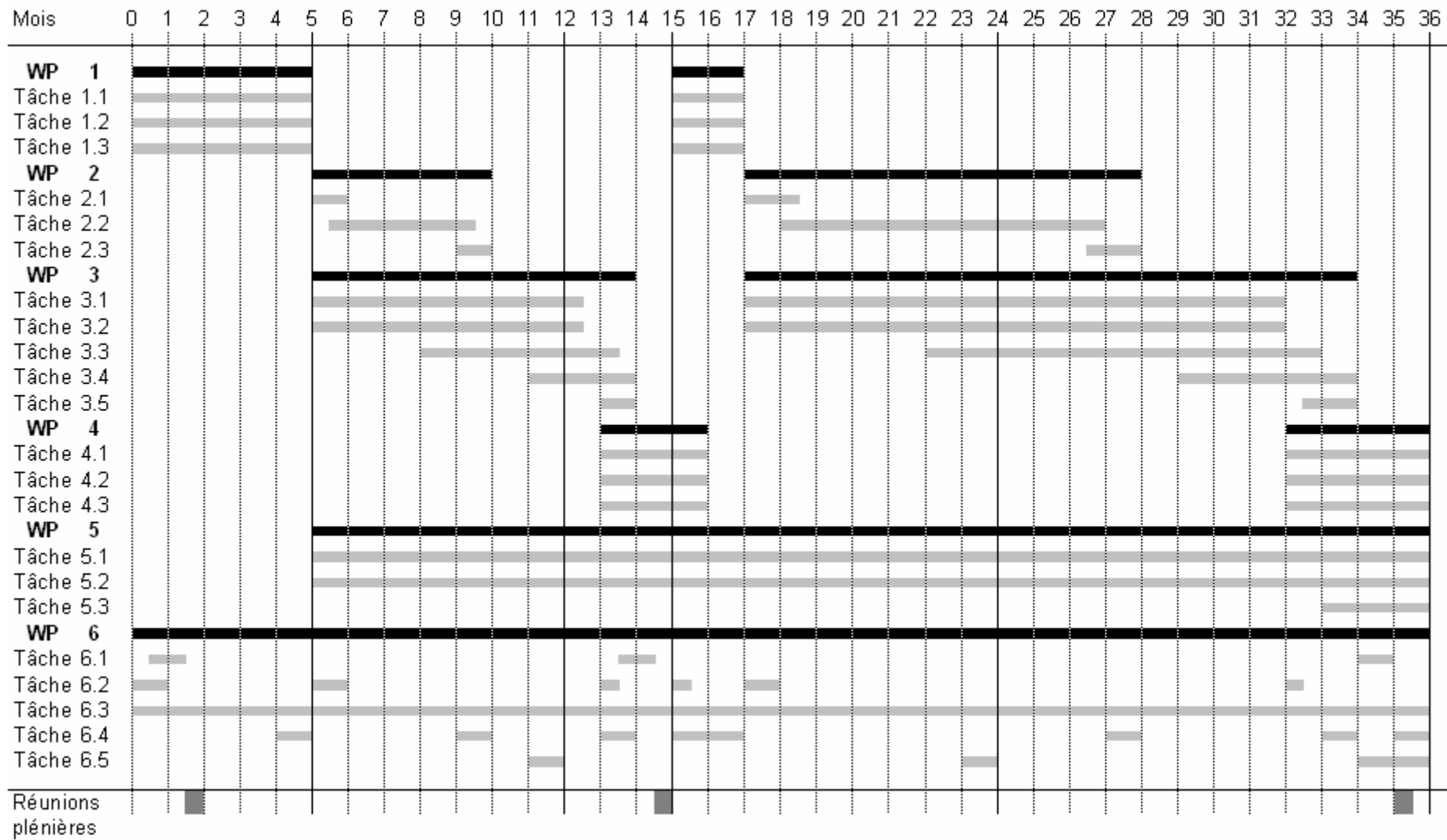


Figure 2a

### Diagramme de Gantt des résultats attendus

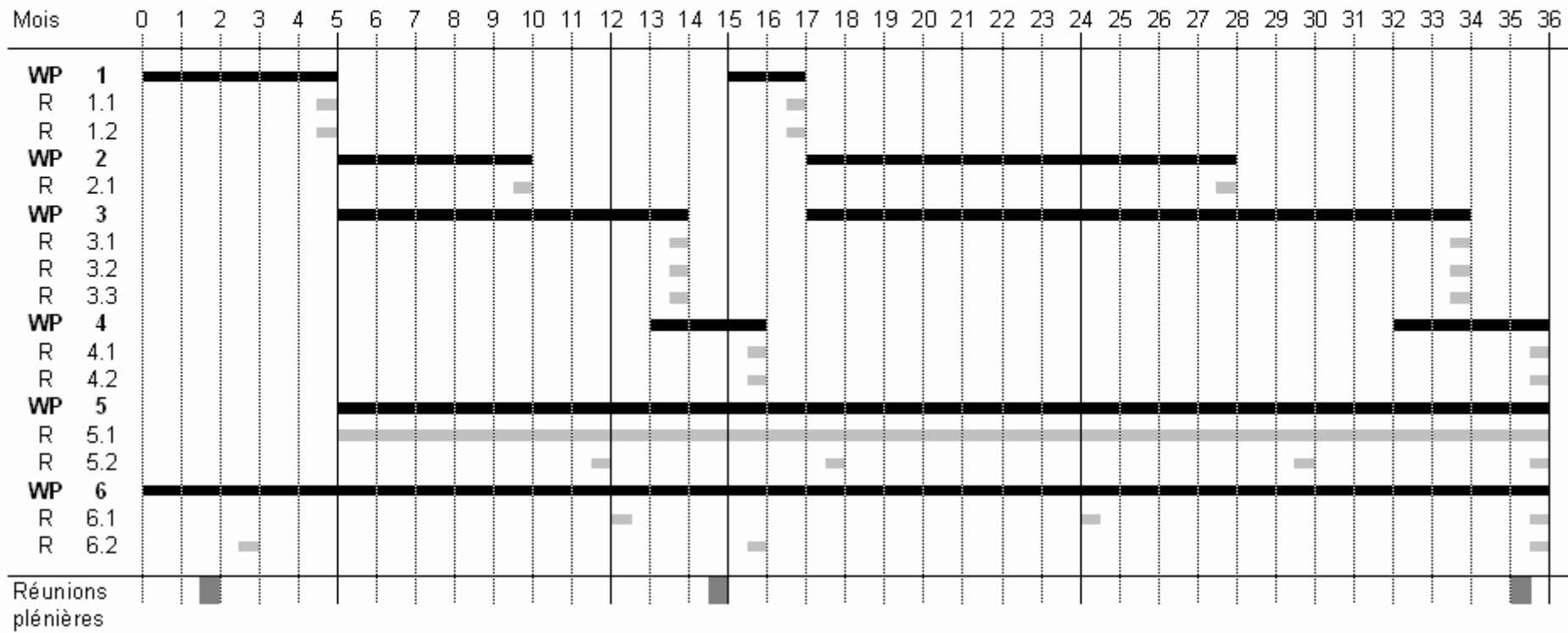


Figure 2b

**4- COLLABORATIONS  
AUTRES PARTENAIRES<sup>4</sup>**

- Partenaire n°1

**Organisme :** Université de Fianarantsoa - B.P. 1264 - 301 Fianarantsoa - MADAGASCAR

**Correspondant principal :** RAKOTOZAFY Rivo (Directeur du département de mathématiques, Faculté des sciences, Université de Fianarantsoa - B.P. 1264 - 301 Fianarantsoa – MADAGASCAR.

**Modalités d'implication dans ce projet :** prestataire de service de l'équipe MEM

**Apport du partenaire dans la réalisation du projet :**

- Participation aux recueils de données et à la construction des modèles du corridor forestier de Fianarantsoa
- Implémentation du modèle
- Couplage du modèle avec les modules de résolutions des problèmes de gestion durable
- Avancées sur la formalisation du développement durable intéressant à la fois les responsables des politiques de conservation à Madagascar et les réflexions en cours dans l'UR 168 sur les relations entre pratiques locales et politiques environnementales.

**Pertinence et intérêt de ce partenariat au regard du sujet traité :**

- Compétences en algorithmique et programmation, analyse numérique, systèmes experts et intelligence artificielle, bases de données, simulations numériques, modélisation des dynamiques des ressources naturelles à des fins de gestion.
- Compétences en écologie forestière (forêts secondaires, boisements, recrues forestiers), écologie et photo-interprétation (jachères herbacées, pratique du feu), agro-écologie (régénération post culturale, jachères), SIG, dans le cadre du programme MEM mené en collaboration avec l'IRD.
- Implantation sur le terrain, dans la région du « corridor » forestier.

**Pertinence et intérêt de ce partenariat au regard du renouvellement souhaité des approches thématiques et pratiques existantes :**

- Travail conjoint de mathématiciens et d'informaticiens dans l'équipe GERME (Groupe d'étude et de recherche pour la modélisation en environnement), issus du département de mathématiques et de l'Ecole Nationale d'Informatique, qui font partie de l'Université de Fianarantsoa.
- Ouverture sur des questions appliquées d'environnement et de développement durable, susceptibles de mobiliser d'autres chercheurs malgaches souvent formés en France mais non mobilisés dans leur propre pays. L'équipe du GERME est susceptible de se renforcer en laboratoire afin, entre autre, de développer sur le moyen terme et mettre en application les résultats du projet DEDUCTION à l'échelle de Madagascar. Dans ce cadre, la « formation » d'un noyau d'enseignants chercheurs malgaches à la théorie de la viabilité, autour de cas concrets et locaux, sera assurée d'un effet démultiplicateur évident.

**Moyens mis en œuvre par le partenaire dans le cadre de cette collaboration (budget, personnes, mois, modalités de financement...)**

Nom	Prénom	Titre ou grade	Discipline	Organisme employeur	Engagement prévu
Ratiarson	Venot	Enseignant-chercheur	Informatique Appliquée	Univ Fianarantsoa	12 mois
Rakotoasimbahoaka	Cyprien	Enseignant-chercheur	Informatique Appliquée	Univ. Fianarantsoa	12 mois
Rakotozafy	Rivo	HDR (2007) Dir. Dept. Math	Mathématiques Appliquées	Univ. Fianarantsoa	8 mois
Randriamahaleo	Solo	Dir. Germe, Projet HDR	Mathématiques Appliquées	Univ. Fianarantsoa	3 mois
Razanaka	Samuel	Doctorat d'Etat	Ecologie	Univ. Fianarantsoa	3 mois
Randriambanona	Herizo	Doctorant (thèse 2007)	Ecologie, forêts	UF, MEM	6 mois
Rakotoarimanana	Vonjison	Projet HDR	Ecologie, prairies	UF, MEM	6 mois

<sup>4</sup> Non mentionnés dans la partie 2 ou la partie 4bis

**PADD 2006 - DEDUCTION**

Randriamalala	Josua	Doctorant	Ecologie, jachères	UF, MEM	6 mois
X	X	Ingénieur	SIG cartographie	Univ. Fianarantsoa	8 mois

- Partenaire n°2

**Organisme** : LASTRE - 14 rue Domat, 75005 Paris

**Correspondant principal** : Saint-Pierre Patrick

**Modalités d'implication dans ce projet** : prestataire de service de l'équipe LISC

**Apport du partenaire dans la réalisation du projet** :

L'équipe de LASTRE sera spécifiquement chargée de valider et de réaliser la mise en oeuvre numérique des modules de résolution des problèmes de gestion durable.

La contribution de LASTRE est triple : dans un premier temps, et en étroite collaboration avec le CREA, elle assurera, par l'échange des connaissances et du savoir faire de l'équipe, la cohérence méthodologique de l'ensemble du projet centré autour de la question "qu'est ce qu'un problème de gestion durable ?", dans un deuxième temps, l'équipe de LASTRE réalisera les logiciels spécifiques dédiés à la résolution des différents problèmes qui émergeront et dans un troisième temps, elle participera au couplages des modèles des systèmes concrets et des modules de résolution, à l'analyse des résultats obtenus, à l'évaluation de l'ensemble du projet arrivé à son terme, et à l'élaboration de propositions de développements scientifiques concrets.

**Pertinence et intérêt de ce partenariat au regard du sujet traité** :

L'équipe LASTRE (Laboratoire d'Application des Systèmes Tychastiques Régulés), formée de chercheurs issus du milieu universitaire et d'ingénieurs de haut-niveau, a pour vocation d'appliquer dans la "sphère réelle" les innovations théoriques apportées par la théorie de la viabilité et l'analyse des systèmes complexes (contraints, en environnement incertain, éventuellement impulsions). Cette équipe a réalisé plusieurs applications, dont deux en automatique (pilotage autonome d'un "glider" (sous-marin) et d'un "pionner" (véhicule terrestre) capable d'atteindre une cible dans un environnement contraint), une en finance (évaluation d'instruments financiers dans un environnement incertain) et une concernant la mesure de l'impact climatique sur l'économie (dans le cadre d'une collaboration avec le PIK - Potsdam Institute for Climate). Le savoir-faire de cette équipe, s'appuyant sur une réelle complémentarité des compétences de ses membres, est vaste et se résume à une capacité de faire aboutir, grâce entre autres à une maîtrise des méthodes numériques ensemblistes, les projets qu'elle entreprend.