

PROJET DE FEDERATION DE RECHERCHE ECCOREV

-
1. Eléments de contexte
 2. Les finalités d'ECCOREV

Annexe : Les axes fédérateurs des questionnements scientifiques

1. Morphogenèse, risques naturels et variabilité climatique
 2. Vulnérabilité des écosystèmes terrestres et aquatiques
 3. Ecodynamique et toxicologie environnementale
 4. Ecotechnologies et développement durable
-

CHAPITRE 1 : LES ELEMENTS DE CONTEXTE

Le projet ECCOREV est le résultat d'une triple dynamique :

1.1 Une dynamique propre aux équipes de recherche :

La création en 2002 de l'IFR 112 PMSE rassemblant 15 Unités de Recherche issues du CNRS, des Universités d'Aix-Marseille et de Corse, de l'INRA, du CEMAGREF et du CEA, a permis une réelle dynamique scientifique sur les thèmes de la gestion durable des écosystèmes méditerranéens, les relations entre la structure des sols et le flux de matière ainsi que les processus aux interfaces. Cette dynamique s'est créée autour de la mutualisation des équipements scientifiques, mais aussi par les échanges que l'IFR a permis entre disciplines et Unités de Recherche.

L'IFR112 a ainsi permis le montage de projets novateurs dans le domaine de l'écotoxicologie et la toxicologie en particulier dans le cadre du programme CNRS-FNS (puis ANR) ECCO-Dyn pour les études d'impact des nanoparticules manufacturées sur les organismes vivants. Ce programme se développe grâce à l'association de microbiologistes, de génotoxicologues et de physico-chimistes (LBME, LEMIRE, CEREGE) et a été très mobilisateur à l'échelle nationale dans ce domaine. Toujours dans le domaine de l'écotoxicologie, plusieurs unités membres de l'IFR112 se sont associées pour répondre au programme CEA-CNRS-INRA (Toxicologie Nucléaire) ou ANR-Precodd avec le LTE de l'INRA. Par ailleurs si les équipes d'écologues avaient avant l'existence de l'IFR112 des relations étroites, celles-ci se sont élargies aux chimistes et aux physico-chimistes dans le cadre du programme européen IRISE relatif à l'impact des incendies de forêts sur l'évolution des sols et la biodiversité.

Enfin l'IFR112 a oeuvré pour développer les approches modélisatrices reposant sur des mesures expérimentales, en particulier dans le domaine du changement climatique, en permettant la construction d'une tour d'analyse des gaz en forêt méditerranéenne (URFM-CEREGE-IMEP-EMAX).

L'IFR112 a donc été une réussite pour le rapprochement des biologistes et des chimistes et géochimistes autour de projets de recherche fédérateurs. L'évaluation de l'IFR au terme du premier quadriennal a bien confirmé la pertinence de cette démarche fédératrice, démarche qui a fortement contribué à la constitution du Pôle de Compétitivité «Risques et Vulnérabilité des Territoires» (et pour partie au Pôle Cap Energie).

Le projet de fédération ECCOREV s'appuie sur la forte dynamique créée depuis 5 ans par l'IFR 112. Elle s'appuie également sur l'IFR 86 dans le domaine des biotechnologies. Les deux équipes qui rejoignent ECCOREV ont une implantation forte dans la région mais également au niveau national (dans le Pôle des ressources fongiques) et international grâce à l'obtention du label Chaire UNESCO.

1.2. Un environnement régional «incitateur» :

Plusieurs facteurs «régionaux» concourent à justifier le projet ECCOREV :

- Le territoire régional PACA est confronté à tous les aléas naturels (excepté le volcanisme) ; il est soumis à une pression anthropique très forte, et sera sans doute sensible aux effets du changement climatique de façon particulière (contexte spécifique alliant territoire de montagne et climat méditerranéen). Ce contexte explique l'intérêt de l'Etat et des Collectivités territoriales (en particulier le Conseil Régional) aux thématiques d'ECCOREV.
- Les orientations retenues par le Conseil Régional au travers de son «Schéma régional pour l'Enseignement Supérieur et la Recherche» incitent très fortement à la mutualisation, l'interdisciplinarité et la construction de projets fédérateurs (ECCOREV est cité au paragraphe 3.2.1 du schéma régional).
- Existente en PACA des Pôles de Compétitivités au premier rang desquels le Pôle «Risque et Vulnérabilité des Territoires» et le pôle « Cap-Energies », dont l'objet est de soutenir le développement d'entreprises de service (ingénierie) et d'équipements (capteurs, système de communication...), pour répondre à des besoins sociétaux pris en considération par ECCOREV qui doit donc contribuer à l'émergence de projets portés par ces Pôles.
- Un Pôle Recherche Enseignement Supérieur, PRES, est en cours de structuration sur Aix-Marseille. Il pourrait retenir le thème Environnement-Risques-Energie comme thème prioritaire, concrétisant ainsi l'importance en PACA de ce thème comme axe de formation supérieure (master et doctorat). La structuration d'axes de recherche proposée par ECCOREV doit contribuer à une meilleure articulation entre formation supérieure et recherche en permettant une plus grande fluidité entre «offre de recherche» construite par les équipes membres d'ECCOREV et les Etablissements d'Enseignement Supérieur, notamment au travers des Ecoles Doctorales.

1.3. Des sollicitations nationales et européennes :

La Fédération de Recherche ECCOREV doit permettre de répondre à des sollicitations correspondant à ses thématiques relevant du niveau national ou européen, au travers :

- du programme du 7^{ème} PCRD, sur plusieurs thèmes : (1) « **Pressures on Environment and Climate** » dans les volets remédiation des impacts des activités humaines sur le climat et la qualité de l'environnement, impacts socio-économiques sur l'eau et les territoires, stratégies de réponse (adaptation, mitigation, stratégies) ; (2) « **Natural hazards** » (sécheresses, tempêtes, séismes ; (3) « **Environment and Health** » (polluants chimiques, toxicologie) ; (4) « **Water resources** » (écologie, management, ...) ; (5) « **Vulnerability** » (sol, forêts, contribution de la biodiversité aux services des écosystèmes, biodiversité à long terme ...).
- du programme INCO du 7^e PCRD pour les relations avec les pays méditerranéens d'Afrique du Nord.
- des programmes de l'ANR¹, et en particulier les thèmes suivants :

¹ Les programmes cités correspondent à ceux pour lesquels les membres de la FR ont déjà obtenu des financements de l'ANR.

- **Énergie Durable & Environnement** : « Catastrophes telluriques et tsunamis », « Vulnérabilité : Climat et Milieux », « Programme Ecotechnologies et Développement Durable (PRECODD) », « Programme National de Recherche sur les Bioénergies (PNRB) ».
- **Écosystèmes & Développement Durable** : « Biodiversité », « Génoplande ».
- **Biologie et Santé** : « Physique et Chimie du Vivant (PCV) », « Santé-Environnement et Santé-Travail (SEST) ».

- de la proposition inter-organismes (CNRS, INRA, CNRS, CEMAGREF..) : «Eaux et Territoires»
- du programme «Risques – Décisions -Territoires» (RDT) du MEDD (qui fait suite au programme EPR)
- du programme GICC2 du MEDD sur les impacts des changements climatiques
- du programme LEFE-EVE de l'INSU sur l'évolution du climat et de l'environnement à long terme, particulièrement concerné par la variabilité climatique et les scénarios climatiques pour le futur.
- du programme EC2CO de l'INSU, en particulier pour sa composante CYTRIX sur les cycles hydro-biogéochimiques, transferts et impact écotoxicologique qui favorise les relations avec SHS, ainsi que sa composante «3MTC : Mesures, méthodes, modèles et théories de la Complexité des systèmes naturels et anthropisés ».
- du futur programme de « Toxicologie Nucléaire » (2008-2010) du CEA qui prendra la suite du programme inter-organismes actuel « Toxicologie Nucléaire-Environnementale » (2004-2007)
- du futur chantier HYMEX en cours de lancement par l'INSU, dont l'objectif est de comprendre le cycle hydrologique de la Méditerranée et des processus reliés avec une emphase sur les événements extrêmes et leur impact régional sur les écosystèmes et les activités humaines. Ce chantier devrait être lancé en 2010. ECCOREV pourra apporter une approche complémentaire à l'approche purement hydro-météorologique de HYMEX.

CHAPITRE 2 : LES FINALITES D'ECCOREV

L'objet de ce chapitre est de présenter le fondement du projet ECCOREV, ou tout au moins le cadre de cohérence constitué autour les interrogations scientifiques et sociétales auxquelles les questions de recherche devront se référer, cette fédération étant bien construite sur un «objet» (fédération thématique) et non sur une «discipline». Ce «fondement» est construit à partir d'un paradigme et d'un territoire de référence, de l'affichage d'un double parti pris, et de la définition d'une double finalité.

2.1. Un paradigme et un territoire de référence

La notion de «risque» est consubstantielle de l'interaction Homme/Nature (une nature sans l'homme ne connaît pas les risques). Et cette notion de «risques» n'émerge qu'à partir de la notion de «**vulnérabilité**», qui se définit dans les deux sens suivants :

- la nature est vulnérable aux pressions anthropiques : les pollutions, les aménagements (occupation des sols, infrastructures...) depuis les perturbations directes sur les milieux «de proximité», jusqu'aux effets «planétaires» tels que l'effet de serre.
- l'homme est vulnérable aux aléas de la nature elle-même (notion de risques naturels tels qu'inondations, séismes...), voire au «retour» que la nature fait de ses propres «agressions» (contamination de l'homme par ses propres «productions toxiques»)

Ce rappel, qui peut paraître une évidence, est essentiel pour fonder les finalités du projet ECCOREV qui se situe délibérément dans le cadre d'une approche «systémique» identifiant, pour les associer entre eux, les divers processus mobilisés pour qualifier les «aléas» et la «vulnérabilité», tant du point de vue de l'«Homme» que de la «Nature». Par ailleurs est associé à ce paradigme un «territoire» constitué de l'espace méditerranéen, territoire considéré comme «zone laboratoire» au sein de laquelle les «tensions» en terme de fonctionnement des écosystèmes sont particulières et les «vulnérabilités» bien souvent exacerbées.

2.2. Un double parti pris

Pour des raisons exposées ci-après, il apparaît stimulant de prendre en considération deux «parti pris» de nature à enrichir les questionnements scientifiques :

i) Privilégier l'approche par la Vulnérabilité

Que ce soit au niveau des «questionnements préalables» ou au niveau des propositions de recherche, les constructions scientifiques proposées dans le cadre d'ECCOREV s'efforceront de privilégier l'approche par la vulnérabilité par rapport à l'approche par l'aléa pour les deux raisons suivantes :

- la notion de vulnérabilité induit la plupart du temps une intégration interdisciplinaire bien plus forte que l'approche par l'aléa (l'aléa sismique, ou hydrologique, concerne par exemple une communauté scientifique relativement concentrée, et déjà par ailleurs bien structurée), en particulier du fait de la nécessaire implication d'une dimension «économique» (les coûts directs et indirects des «dégâts» et comportement des agents qui anticipent et se couvrent contre les risques) et «sociale» (les «représentations» sociales de la vulnérabilité). Cette priorisation de la vulnérabilité peut donc être facteur efficace de développement de l'interdisciplinarité.
- la notion de vulnérabilité mais en relation très directe les questions de recherche et les attentes de la société. Les attentes sociétales portent avant toute chose sur la vulnérabilité, et beaucoup moins sur l'aléa, même si l'aléa est ensuite mis en avant comme «expression du danger».

ii) orienter la recherche vers l'action

Délibérément, le projet ECCOREV met avant l'intérêt d'orienter la recherche vers l'action, et ceci pour les deux raisons suivantes :

- mieux répondre aux «attentes sociales» qui, dans le domaine de l'environnement et des risques, sont très fortes.
- stimuler la recherche par l'effet de rétroaction entre attentes sociales et productions scientifiques.

Ce faisant, et c'est sans doute une originalité liée au thème lui-même d'ECCOREV, cette orientation n'oppose en rien recherche fondamentale et recherche finalisée, les «réponses» nécessaires à l'action requérant bien souvent des avancées nouvelles dans des domaines assez fondamentaux.

2.3. Première finalité : Développer les approches systémiques pour mieux comprendre les processus :

Mieux comprendre les interactions « Homme-Nature » exprimées à travers la notion de risques, et donc de vulnérabilité, suppose en terme de compréhension des processus, de savoir associer les processus que l'on peut qualifier de « bio-géo-physiques » et les processus « anthropiques ».

Pour se faire il semble possible de distinguer :

En matière de processus « bio-géo-physiques » :

i) Les processus physiques à l'échelle des territoires :

Les principaux processus physiques pris en compte sont :

- **les séismes** : compréhension des dynamiques sismotectoniques, et évaluation de l'aléa sismique.
- **le mouvement gravitaire** : compréhension des causes géomécaniques (glissements, effondrements...) et évaluation des aléas.
- **l'hydrologie** : des crues à l'étiage
- **érosion, flux, transferts et morphogénèse** : du bassin versant au littoral.

- **changement climatique** et son effet sur l'hydrologie, le niveau marin et les écosystèmes, en particulier sur l'aléa «incendies de forêt».

Ces différents processus que l'on peut qualifier de «physiques» (on est plutôt dans les «sciences de la terre») interagissent entre eux (eau et érosion, érosion et mouvement gravitaire, mouvement gravitaire et morphogénèse...) mais ont une caractéristique commune : ils s'étudient à **l'échelle des territoires**.

ii) Les processus biologiques et biogéochimiques à l'échelle des territoires

Les processus biologiques et biogéochimiques à l'échelle des territoires pris en compte sont :

- le **fonctionnement des écosystèmes** et les caractéristiques de ce fonctionnement au regard de la **biodiversité** (degré dépendance biodiversité/résilience)
- **l'écologie du paysage** dans sa dimension morphogénèse et écosystème.
- **l'organisation spatiale** et transfert des masses
- **les processus de transfert des contaminants** dans les écosystèmes, tant en ce qui concerne les toxiques «classiques» que les radionucléides.

Ces différents processus interagissent également entre eux (fonctionnement des écosystèmes et transfert des contaminants, organisation spatiale et fonctionnement des écosystèmes...) mais se situent également à l'échelle des territoires. Si, au regard de ces processus, l'essentiel des vulnérabilités se situent du côté de la «nature», l'aléa concerne pour une bonne part les activités anthropiques dont les contextes socio-économiques constituent un enjeu majeur.

Comme pour les processus physiques, l'approche par la vulnérabilité sera à privilégier, en particulier pour aborder ces questions sur le registre des Sciences Humaines et Sociales, en particulier sur la question des normes, et de leur évolution (du fait en particulier des nouvelles directives européennes) et de l'internalisation des coûts indirects dans les processus de productions économiques (voir effet Directive REACH).

iii) Les transferts et les impacts à l'échelle «micrométrique»

L'ensemble des processus physiques (i), biologiques et biogéochimiques (ii) mettent en jeu des transferts entre les différents compartiments constitutifs des «territoires». Les modélisations correspondantes sont à cette échelle des territoires.

Ces processus mettent cependant aussi en jeu des «fonctions de transferts» à des échelles infra qui correspondent essentiellement aux échanges moléculaires et particuliers, notamment aux interfaces eau/sol, sol/plante, plante/air.

La compréhension de ces processus de transferts est donc indispensable pour la compréhension des processus à l'échelle des territoires. C'est aussi à cette échelle que se déterminent les phénomènes de **toxicité** et **d'écotoxicité**. Les phénomènes en cause sont essentiellement :

- Les comportements biogéochimiques des contaminants dans les écosystèmes
- Les mécanismes d'adaptation et de transformation des toxiques

- Impact et mode d'action des toxiques sur le vivant
- Identification des molécules cibles qui marquent spécifiquement l'intoxication

En matière de processus « anthropiques » :

i) Les politiques publiques en environnement

La part croissante des questions liées à l'environnement dans les politiques publiques constitue également un objet de recherche. A travers les exemples étudiés, seront analysés les dispositifs et des outils destinés à favoriser la prise en compte de l'environnement. Selon les politiques et les enjeux, on assiste à la multiplication des dispositifs réglementaires, financiers ou contractuels. Entre politique de l'interdit, incitations financières "contractualisées" ou "conditionnalisées" et recours aux mécanismes de marché le panel est important des expérimentations aujourd'hui en cours.

Plusieurs pistes de recherche peuvent être ici esquissées :

- La première concerne le poids croissant du droit international et communautaire dans les politiques de protection de la nature. Seront étudiées tant les formes localisées d'application de ces règles que la multiplication des formes d'arbitrage qu'elles impliquent entre échelles de décision.
- La seconde s'intéresse au poids croissant de la conditionnalité environnementale, en particulier dans les politiques européennes (Pac, fonds structurels...) ou nationales (nouveaux Cper, contrats de rivières...). Dans le cadre ces instruments hybrides, ceux s'appuyant sur un principe de compensation écologique, visant à compenser des impacts sur les milieux naturels non pas par des paiements compensatoires mais par des actions d'ingénierie écologique ou des échanges fonciers, ouvre une voie de collaboration privilégiée entre sciences du vivant et sciences économiques et sociales.
- La troisième s'intéresse à la production et l'usage des indicateurs écologiques, environnementaux ou plus largement de développement durable dans les politiques publiques et dans les modalités concrètes de gestion des risques environnementaux. Comprendre pourquoi parmi les indicateurs produits par les sciences de l'environnement, certains ont plus de facilité à se transformer en normes et à rentrer concrètement dans le champs de l'action publique constitue un lieu d'échange propice entre disciplines.
- La dernière concerne la spécificité des politiques environnementales et la multiplication des procédures contractuelles. La définition de politiques de protection de l'environnement et de lutte contre les nuisances a induit une remise en cause des logiques administratives sectorielles. Parce que la protection de l'environnement concerne à la fois les grandes industries et le monde agricole, les collectivités locales et les citoyens, elle nécessite de trouver des arènes de négociations plus larges que les simples accords sectoriels, forcément ponctuels et limités quant au public visé

ii) La demande sociale :

Autour de la thématique des risques et de la vulnérabilité les questions suivantes peuvent faire l'objet de recherches afin de mieux connaître la demande sociale dans ce domaine.

- La question des normes de gestion qui, généralement héritées du passé, se révèlent inapplicables dans le cadre d'un changement social, économique et technologique très rapide.
- La question des valeurs et des croyances produites par deux siècles de "modernité" qui ont trop largement cloisonné le "social" et le "naturel", avec l'idée que la rationalité scientifique avait définitivement permis aux sociétés modernes d'échapper aux contraintes naturelles.
- La question de la segmentation des politiques publiques et des découpages territoriaux qui n'ont pas plus échappé à cette idéologie de la modernité et de la coupure Nature-société que le sens commun.
- La question de la construction symbolique des territoires qui affecte des pratiques et des usages déconnectés des risques.
- La question de la déresponsabilisation individuelle et de l'Etat garant de la sécurité publique.
- La question de la démocratie participative, de plus en plus évoquée dans la gestion de l'environnement et difficile à mettre en œuvre

D'une manière plus générale il faudra se poser la question de l'interdisciplinarité entre les sciences naturelles et les sciences humaines pour étudier les objets socio-naturels que sont les objets environnementaux.

Conclusion sur cette première finalité :

L'identification des laboratoires porteurs d'ECCOREV a montré que des équipes multidisciplinaires relevant des «Sciences dures» étaient, grâce aux travaux conduits dans le cadre de l'IFR 112, déjà relativement bien structurées au sein de chacun des 3 axes que sont :

- les processus physiques
- les processus biologiques et biogéochimiques
- les transferts et impacts.

La première finalité d'ECCOREV sera :

- **d'aller plus loin dans l'intégration des 3 axes que sont les processus physiques, les processus biologiques et biogéochimiques, et les transferts et impacts, pour véritablement se placer dans le cadre d'une approche systémique intégrant l'ensemble. Ceci suppose en particulier de savoir intégrer la compréhension des processus à différentes échelles, depuis l'échelle particulière jusqu'à l'échelle des territoires.**
- **de donner une place particulière aux SHS en privilégiant l'analyse des processus à partir de la vulnérabilité pour ne plus s'enfermer dans une approche déterministe de l'aléa, en abordant en particulier les questions à partir des demandes sociales et des politiques publiques.**

2.4. Deuxième finalité : apporter des réponses pour agir

Cette deuxième finalité se situe clairement dans le champ de l'action publique et privée pour réduire les «risques» en jouant tant sur l'aléa que la vulnérabilité. Bien évidemment **ces réponses n'ont de sens qu'en lien avec la compréhension des processus en cause.**

Cette finalité est donc indissociable de la première finalité d'ECCORREV qui portait sur la compréhension des processus.

Cette deuxième finalité, tournée vers l'«action», s'inscrit délibérément dans une perspective de **recherche finalisée**, cette perspective n'étant en rien contradictoire avec l'acquisition de savoir plus fondamentaux requis par la construction de ces «réponses pour agir». C'est dans cette dimension que le projet ECCOREV fera la preuve de son intérêt socio-économique, tant au regard de transferts vers l'action publique et privée que vers les développements technologiques.

Cette deuxième finalité s'exprimera au travers de 2 types d'enjeux :

i) Des réponses techniques notamment en terme de remédiation

Ces réponses se situent essentiellement dans les domaines suivants :

- la **réhabilitation des écosystèmes pollués** :
 - . détection des polluants (bio-senseurs)
 - . réhabilitation des sols, traitement des effluents
- les **écotechnologies** :
 - . valorisation des déchets
 - . production d'énergie (biomasse, micro-organismes photosynthétiques)

ii) Des réponses sur le registre socio-économique :

Sur ce registre, les réflexions structurées sont encore en phase de simple «émergence», le projet ECCOREV n'ayant pas l'antériorité de l'IFRE PMSE pour finaliser ce type de réponse, à la différence des réponses «technologique» évoquée en i). A ce stade, sont indentifiables les types de «réponse» suivants :

- La réglementation et sa mise en œuvre. La faculté d'observer et de mesurer les effets environnementaux entraîne la production de nouveaux règlements. Le droit de l'environnement est une discipline en plein essor.
- les «mécanismes incitatifs publics ou privés » qui peuvent influencer sur la réduction ou le renforcement de l'aléa d'origine anthropique, (prise en compte des «externalités»). Les outils classiques sont la taxation ou la détaxation, les contrats d'assurance et les contrats complexes (assortis d'options multiples) pour partager les risques et allouer les bénéfices.
- les mécanismes de marché qui peuvent permettre une gestion plus efficace des nuisances envers l'environnement (ex. marché des droits à polluer)
- Les «instruments financiers» qui peuvent influencer sur la réduction ou le renforcement de la vulnérabilité (des habitants et des entreprises). Exemple : les « dérivés climatiques » (warrant ou options appuyés sur un sous jacent volatile, indicateur de l'activité climatique)

- L'émergence de « stratégies environnementales », dans les grandes entreprises. Les motivations de ces stratégies sont multiples (réglementation, pression de l'opinion et des marchés, stratégies d'image) mais doivent contribuer à réduire les nuisances et risques.
- les facteurs sociaux qui peuvent influencer sur les comportements face aux aléas tant des « citoyens » (sur le registre des valeurs et des croyances, « mémoire du risque » par exemple) que des « institutions » (l'évolution des « normes », segmentation des politiques publiques...). C'est dans ce cadre que devra être exploré le champ du « droit de l'environnement ».

La nécessité d'une approche transversale sur ce type de réponse est évidente si l'on ne veut pas tomber dans des visions trop « sectorielles », en analysant les enjeux socio-économiques séparément et indépendamment, par nature d'aléa par exemple (les inondations, les feux, les séismes...)

La deuxième finalité d'ECCOREV sera :

- **de pouvoir réinjecter les « réponses techniques » proposées (remédiation) dans l'analyse globale des processus écosystémiques et anthropiques pour s'assurer de l'effet final de ces innovations, en faisant la démonstration de leur faisabilité « socio-économique » et de leur efficacité face aux vulnérabilités initiales. Il s'agit-là, à l'évidence, d'une ambition originale au regard des approches souvent réduites à l'effet « de proximité » (dans le temps et l'espace) de ces solutions de remédiation.**
- **d'aborder la question des outils « non technologiques » fournis par le droit et les mécanismes d'incitations socio-économiques, dont la faisabilité et l'efficacité dépendent de leur forte adéquation aux solutions « technologiques » . (On ne peut mettre sur pied de nouveaux marchés de droits à polluer sans savoir sur quels indicateurs portent ces droits et sur les effets attendus de tels marchés sur les mécanismes physiques à l'oeuvre.)**

Ces ambitions constituent à l'évidence des évolutions sensibles par rapport aux finalités portées jusqu' alors par l'IFR 112.

2.5. Des retombées prometteuses en matière de modélisation et de prédiction

La modélisation mathématique est un outil majeur pour comprendre les processus quelle que soit leur échelle. On peut citer les modèles climatiques globaux et régionaux, les modèles de fonctionnement des écosystèmes, les modèles de propagation des incendies, les modèles de répartition des espèces, les modèles de transfert des nucléides dans les cours d'eau, la biosphère continentale ou marine, les modèles de croissance d'arbres. Ces modèles sont également précieux pour faire interagir les différents objets étudiés dans ECCOREV, en particulier en intégrant divers scénarios climatiques nécessaires pour étudier l'évolution de la biodiversité, du risque d'incendie ... Cela se fait par couplage des différents modèles concernés. Enfin ces modèles sont nécessaires pour la prédiction et donc pour apporter des réponses pour agir. Par exemple, si le modèle couplé climat / croissance d'arbre

indique qu'une espèce thermophile va pouvoir potentiellement étendre en altitude son aire de répartition, au détriment d'une autre espèce moins résistante, cela peut servir de base de réflexion au forestier dans sa gestion à long terme des forêts (plantation, éclaircie).

D'autre part les modèles classiques ne prennent généralement pas en compte les comportements socio-économiques. Or la modélisation mathématique est aussi un instrument privilégié de recherche dans les sciences économiques. Le couplage des modèles mathématiques climatiques et des modèles mathématiques macro et micro-économiques permet d'affiner les scénarios et de préciser les actions à entreprendre. Le rapport Stern fournit un exemple intéressant de couplage de tels modèles.

Une des retombées du projet d'ECCOREV sera d'une part de faciliter le partage entre équipes de ressources en terme de modèle et d'autre part d'induire des «avancées» en ce qui concerne l'interfaçage des modèles, et ceci dans une perspective d'agrégation et de désagrégation d'échelle indispensable pour véritablement se mettre dans le cadre d'une approche systémique.

2.6. Conclusion sur les finalités d'ECCOREV :

Les éléments présentés ci-avant constituent le «cadre de référence» de la fédération à l'intérieur duquel les projets initiés, accompagnés et soutenus par la Fédération devront se mettre en place. Ces éléments sont le fruit :

- des actions engagées jusqu'alors dans le cadre de l'IFR 112 (voir chap. 1)
- et des réflexions spécifiques conduites dans le cadre du projet ECCOREV selon 4 axes distincts, ces contributions essentielles pour donner du corps au projet figurant en annexe A du présent rapport.

Bien entendu, les projets eux-mêmes ne seront pas de ce niveau de généralité et tout l'enjeu sera de savoir garder cette perspective globale, tout en sachant travailler à l'échelle des projets très concrets.

C'est cette préoccupation qui a conduit à l'idée de «programmes mobilisateurs». Ces «programmes mobilisateurs» seront vu comme des outils destinés à faciliter le lien entre des projets et des équipes centrés sur un sujet bien spécifique et la cohérence globale de ces sujets avec les finalités de la fédération. Ces «programmes mobilisateurs» seront donc le support de la réflexion prospective, et de l'interfaçage entre des disciplines qui auraient le plus de mal à s'associer.

Le chapitre 4 donne une première idée de ce que pourraient être ces programmes mobilisateurs, étant bien entendu que leur définition même constitue la première étape de l'animation scientifique propre à ECCOREV (il s'agit donc, à ce stade, d'une toute première proposition qui a vocation à évoluer).

ANNEXE

Description des axes

AXE 1. MORPHOGENESE, RISQUES NATURELS ET VARIABILITE CLIMATIQUE

Cet axe a pour vocation d'étudier les processus qui concourent à l'évolution de la topographie et des paysages à toutes les échelles de temps, c'est-à-dire de l'échelle instantanée de la « crise » (tempête, inondation, incendie, glissement de terrain, séisme), à l'échelle plus long terme des paysages, des marqueurs morphologiques ou des bassins versants.

La variabilité climatique constitue souvent le paramètre « déclencheur » des processus « morphogénétiques ». Mais elle n'est efficace que dans des contextes topographiques et/ou lithologiques favorables. Les modes de gestion anthropiques peuvent aggraver les impacts des instabilités naturelles, voire déterminer l'apparition des risques : glissements de terrain, incendie, inondations, tempêtes, mobilisation littorale... L'objectif de cet axe est de caractériser et quantifier ces « instabilités » (ou aléas) et d'analyser leurs interférences avec les enjeux humains en terme de vulnérabilité.

1) ATTENTES SOCIALES

- la région PACA est confrontée sur son territoire à la panoplie quasi-complète des aléas naturels : séismes (et phénomènes associés), écroulements - chutes de blocs, effondrements karstiques ou miniers, glissements de terrain, inondations (crues rapides et lentes) et sécheresses, érosions torrentielles (laves torrentielles, ravinements dans les marnes noires), incendies de forêt, avalanches, tempêtes, mobilité littorale...
- la variabilité climatique (court (crise) et long terme) est un facteur prédominant dans le déclenchement de certains de ces aléas, et contribue généralement à aggraver la vulnérabilité associé aux aléas.
- les enjeux socio-économiques sont, plus ou moins localement, forts à très forts. Les métropoles urbaines ont un développement exponentiel (par exemple on va vers une zone urbaine continue entre Marseille et Toulon l'horizon du milieu du siècle). Les grandes zones d'habitation et/ou industrielles ne sont pas toujours installées dans des endroits où la sécurité par rapport aux risques naturelles est suffisante. La région dispose d'une forte concentration de stations balnéaires et de stations de sports d'hiver. Enfin, à l'intérieur du territoire, les terres agricoles ont souvent une forte valeur ajoutée.
- la prévention (cartes d'aléas, PPR) et la prévision, incluant des dispositifs d'alerte, des risques constituent des éléments majeurs de l'action des responsables publics : services d'Etat et collectivités locales. La canicule de l'été 2003 est un bon exemple de situation où la prévision n'a pas rempli son rôle.
- les citoyens n'ont pas toujours une perception correcte des risques auxquels ils sont exposés ou s'exposent. On peut citer comme exemple la construction de villas dans des forêts très inflammable, dans des régions inondables, etc...
- les aménagements de protection des enjeux exposés mobilisent des investissements importants et pluriannuels qui nécessitent d'être priorisés et/ou coordonnés à différentes échelles du territoire.

2) LES FRONTS SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

- Des avancées demeurent à accomplir pour la compréhension de nombreux aléas ;
- Des progrès significatifs dans l'étude des phénomènes peuvent être réalisés en brisant le cloisonnement entre certaines disciplines scientifiques (ex : mécanique des matériaux et mécanique des fluides, géomécanique, géomorphologique et géochimie/pédologie, ingénierie du risque, sociologie et histoire, gestion économique et psychologie du risque, etc.) ;
- Les couplages représentent encore de nombreux verrous scientifiques: couplages multiphysiques, couplages multiéchelles, couplages entre approches discrètes et approches continues.
- Les nouvelles technologies contribuent à l'émergence de nouvelles possibilités à explorer pour l'instrumentation des ouvrages ou des sites à risque (satellites, lasers, drones, fibres optiques.....), et contribuer à la fois à la surveillance et la modélisation numérique (validation, analyse inverse);
- Le développement des grands codes de calcul, qui mobilise des compétences et des moyens qui dépassent le cadre d'un seul laboratoire, doit être mutualisé; les transferts et la valorisation de ces codes, avec des acteurs socio-économiques de la Région, ont encore de grandes marges de progrès;
- Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sont perfectibles : leur amélioration doit associer les équipes qui travaillent sur les aléas (naturels ou technologiques) – et les moyens de s'en protéger - et celles spécialisées en sciences économiques ou sociales. Une meilleure compréhension des comportements humains est également indispensable dès lors qu'il s'agit d'établir des stratégies de gestion de crise (décisions, évacuations en période de crise) ou d'aménagement (« acceptabilité » des ouvrages).
- Les scientifiques travaillant sur les risques doivent pouvoir fournir, au final, des outils d'aide à la décision pour les acteurs du territoire. Ces outils doivent être basés à la fois sur les données de terrain, l'expérimentation et la modélisation. Différentes échelles de temps et d'espace doivent être prises en compte.

3) LES COMPETENCES REUNIES DANS L'AXE (liste non arrêtée)

Unités	Problématiques de recherche (compétences)	Effectifs permanents
CEA Cadarache	Aléa sismique	1
Cemagref/OHAX	Prévention des crues et des étiages (hydrologie, statistiques, sciences de l'information géographique) Sécurité et performance des ouvrages hydrauliques et de protection contre les inondations (géomécanique et érosion, génie civil, sûreté de fonctionnement, analyse de risques)	23
Cemagref/EMAX	Analyse du risque incendie Dynamique et gestion de la végétation méditerranéenne	18
Collège de France de (Chaire de Géodynamique) /CEREGE	Géodynamique, imagerie sismique et modélisation	3
CEREGE 1	Géomorphologie et tectonique, et Nucléides cosmogéniques – quantification et observation des processus de surface	22
CEREGE 2	Variabilité climatique à long terme (modèles et données), modélisation de la végétation et des lacs, climat et incendies	17
IMEP	Paléoécologie, variabilité climatique, reconstitution paléoclimatique et paléoenvironnementale, variations spatio-temporelles des incendies, biogéoprospective	54
IRSN	Flux de masse associés aux événements météo climatiques	21
IRSN	BERSSIN – Risque sismique	3
UP Centre de Sédimentologie – Paléontologie	Géologie des Systèmes Carbonatés et modélisation 3D	17
UPC - Institut des d'Administration des Entreprises (IAE) Faculté d'Economie	Economie - Finances	
UMR « Espace »	Sciences sociales et humaines	
INERIS Méditerranée	Evaluation du risque gravitaire « Mouvements de terrain »	10
CERIC	Centre d'études et de recherches internationales et communautaires	10

4) LES SOUS-AXES STRUCTURANTS

4.1 Risques hydrologiques – de la crue à l'étiage :

Phénoménologie et aménagements

Participants : Cemagref OHAX, CEREGE 1 et 2, Géologie des Systèmes Carbonatés (UP), IRSN/LERCM (Station Observatoire du Rhône).

Les crues catastrophiques qu'ont engendrées de grands ou petits cours d'eau de notre pays – particulièrement dans sa frange méditerranéenne – ces quinze dernières années sont venues cruellement rappeler que le risque d'inondation est celui qui coûte le plus cher à la collectivité nationale que ce soit en termes d'atteintes corporelles aux personnes ou de dommages aux biens et aux activités. D'un autre côté, les étiages sévères que subissent nos rivières posent de sérieuses questions sur la pérennité de la ressource en eau pour certains usages aux besoins croissants.

Dans ce contexte pour le moins inquiétant, que la perspective du changement climatique ne peut qu'aggraver, les recherches en hydrologie et en hydraulique et géomorphologie fluviales revêtent une importance toute particulière.

a) Sur le bas Rhône, l'un de nos grands cours d'eau régionaux, la crue de décembre 2003 a présenté un caractère exceptionnel par son débit de pointe (débit centennal, 11 500 m³/s), après une décennie caractérisée par des crues fortes et fréquentes, qui a remis au premier plan la question du risque d'inondation, d'autant que les plaines des grands fleuves européens connaissent des situations comparables (Elbe, Vistule, Danube). La problématique scientifique repose sur 3 questions : la recrudescence des crues s'inscrit-elle dans une tendance climatique ? quel est le rôle des transformations récentes des lits dans l'amplification de la hauteur des lames d'eau ? quelle gestion proposer pour réduire l'alea ?

La réponse à ces questions passe par (1) l'analyse des crues anciennes, en collaboration avec les historiens de l'environnement, et l'étude des traces laissées par les événements historiques, (2) l'analyse de la métamorphose récente des lits fluviaux, et leur mise en relation avec les aménagements qui les ont transformés depuis une centaine d'années (et notamment les extractions de granulats et les endiguements). Les recherches antérieures ont montré que le chenal tend à réduire sa largeur totale et à s'inciser, déstabilisant les ouvrages (piles de ponts, quais, digues). Les digues et les ouvrages hydrauliques ont contribué à une évolution importante de la topographie et des sols, de l'écoulement des eaux, de la biodiversité et de l'occupation des terres dans la plaine. La fragilité chronique de ces ouvrages de protection a été clairement démontrée et justifie les nombreuses recherches en cours, tant au Cemagref (URs OHAX à Aix et HHLY à Lyon) et au CEREGE que dans d'autres laboratoires régionaux, sur leur comportement en crue (résistance à l'érosion interne ou externe : cf 4.6 ci-après), l'impact de leur rupture, l'amélioration des méthodes de diagnostic (rendement et efficacité) et de confortement, la gestion des informations les concernant (outil SIRS Dignes), etc. Aujourd'hui, les options de protection du XIX^e sont remises en question et des solutions nouvelles pour une gestion des crues et des risques pour les populations et la biodiversité sont

recherchées pour faire face aux nouveaux enjeux économiques, sociaux et environnementaux. Plusieurs programmes sont en cours sur ces thèmes.

L'étude du transfert des flux solides sur le Rhône est importante pour mieux connaître les apports sédimentaires aux plages du delta, évaluer les stockages/déstockages sédimentaires dans les lits, préciser les interactions entre le dépôt des sédiments et la diversité des milieux d'intérêt écologique. Plusieurs thèses ont été réalisées sur ce thème.

L'étude de la réduction de l'hydraulicité et du comportement des ouvrages hydrauliques de protection repose sur le traitement d'images à partir des documents d'archives en 2D et 3D. L'acquisition d'images aériennes laser THR sur les digues de bras du Rhône et de la Durance, au titre d'un projet soutenu par la Région PACA et trois gestionnaires de digues (projet FLIMAP-Digues), oblige à une importante recherche en termes de développements technologiques du traitement qualitatif et quantitatif des données laser, photo et vidéo, en collaboration avec l'UR OHAX du Cemagref-Aix.

Le CEREGE a acquis une instrumentation (ADCP, DGPS, sondeurs THR, Bouteille Delft) permettant de renouveler la recherche sur les flux solides et valider les formules usuelles du transport : projet MEFLUSE (Métrologie des flux sédimentaires en milieu fluvial) en collaboration avec la CNR (Compagnie Nationale du Rhône), le Cemagref-Lyon (Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique), l'IRSN/LERCM responsable de la station Observatoire du Rhône implantée à Arles (réseau OPERA²) et le COM, soumis au pôle de compétitivité PACA *Risques Naturels*. Cette recherche sera intégrée dans l'Observatoire sédimentaire du Rhône, en cours d'élaboration par la CNR, les zones-ateliers CNRS ORME et ZABR). Ces projets servent de base à l'intégration du CEREGE dans un GDR en cours de labellisation (GDR STRAS, axé sur la quantification des transports solides en rivière). L'UR OHAX du Cemagref Aix-en-Provence est également impliquée dans ce projet de GDR pour ce qui concerne les thématiques liées à la compréhension de l'érosion des sols (lois d'érosion), en vue d'initier des approches nouvelles issues d'un rapprochement entre la communauté des hydrauliciens et celle des géomécanciens (cf 4.6 ci-après).

Le programme MUTARISQ, dirigé par la Fondation Sansouire, labellisé en 2006 dans le cadre du pôle de compétitivité régional « Risques naturels » permettra de modéliser les écoulements de crue et les hauteurs de submersion sur la base de l'utilisation du modèle SUBIEF 2D, couplé à TELEMAC 2D, pour quantifier l'impact des modifications des conditions d'écoulement sur la sédimentation des particules fines transportées en suspension.

b) Sur les rivières à régime très irrégulier (crues rapides, étiages sévères), généralement non jaugées et qui constituent l'essentiel du réseau hydrographique du sud du pays, et de la Région PACA en particulier, les efforts de recherche – notamment de l'UR « Ouvrages hydrauliques et hydrologie » du Cemagref Aix-en-Provence – portent sur :

² OPERA : Observatoire PErmanent de la RAdioactivité de l'environnement - <http://www.irsnn.fr/opera/>

- la connaissance régionale de la ressource en eau ;
- la prédétermination des débits de crues, à différentes périodes de retour : point d'entrée incontournable pour l'élaboration des documents d'aléas des PPR inondations ;
- la prévision des débits de crues, visant à anticiper, avec un délai aussi grand que possible, les fluctuations à la hausse du débit d'un cours d'eau, en vue de fournir aux autorités les moyens de prendre les mesures appropriées pour la sécurité des personnes et des biens.

A côté d'outils au stade opérationnel (LOIEAU, SHYREG) ou pré-opérationnel (AIGA développé en collaboration avec Météo-France Sud-Est), mis au point avec le soutien du Ministère de l'Ecologie, le Cemagref mènera à terme en 2007 avec comme partenaires français : le CNRS, une société privée (NOVIMET) et Météo-France, et un partenaire italien (ARPA), et avec l'aide de la Région PACA et du Conseil Général des Alpes Maritimes, un important projet visant à la mise au point d'une nouvelle technologie d'imagerie radar pour la quantification en temps réel des pluies dans les bassins versants de montagne ou accidentés : projet InterReg III A FRAMEA (Flood forecasting using Radar in Alpine and Mediterranean Areas). Ce projet s'appuie sur une expérimentation, en cours, du radar bande X, à l'intérieur du bassin versant de recherche expérimentale (BVRE) du Réal Collobrier (Var) – précieux site régional d'observation des phénomènes hydrologiques, équipé par le Cemagref et suivi depuis plus de 30 ans par l'équipe hydrologie de l'UR OHAX.

Pour les années à venir et au vu des résultats prometteurs de FRAMEA, un projet ambitieux de recherche et développement a été construit et est proposé au titre du prochain CPER Etat-PACA pour la création d'une « Plateforme de services d'information sur le risque hydroclimatique », basée sur une complémentarité entre le réseau des radars bande S existant (réseau ARAMIS de Météo-France) et un réseau à créer de radars bande X. Le partenariat de ce projet est sensiblement élargi par rapport à FRAMEA et les produits opérationnels auxquels il devrait aboutir sont résolument dédiés aux communes qui sont responsables localement de la gestion des risques d'inondations ou climatiques.

Le BVRE de Draix (géré par l'unité de recherche ETNA, Cemagref Grenoble), situé comme celui du Réal Collobrier en région (Alpes de Haute Provence), est aussi un excellent support pour la connaissance des crues éclairs et les processus d'érosion associés (ablation sur les versants et transport solide dans les cours d'eau). Les marnes noires sur lesquelles est installé le bassin de Draix couvrent une superficie importante du piémont Alpin (environ 5000 km²) et l'impact économique du transport solide des cours d'eau de cette zone est loin d'être négligeable. Un GIS a été constitué pour animer les recherches autour de ce BVRE. Le laboratoire d'hydro-géologie de l'Université d'Avignon est partenaire de ce GIS et mène des recherches sur l'origine des eaux de surface par marquage chimique et isotopique des eaux. L'Unité de Recherche OHAX du Cemagref Aix a aussi des relations privilégiées avec ce laboratoire (enseignement LMD et membre du conseil pédagogique du master).

4.2 Les Risques sismiques

Participants : CEA, IRSN – BERSIN, Collège de France (Chaire de Géodynamique), CEREGE 1, Cemagref, Géologie des Systèmes Carbonatés (UP), INERIS.

Contexte

La région Provençale peut être considérée comme un secteur emblématique pour les zones actives complexes à faible taux de déformation mais à aléa potentiellement élevé.

La sismicité historique y est une des plus importantes du territoire métropolitain, avec depuis le XV^{ème} siècle plusieurs séismes d'intensité égale ou supérieure à VIII (Lambesc en 1909, région de Manosque en 1509 et 1708), impliquant l'existence d'objets géologiques actifs (failles, mais peut-être également diapirs) ayant un fort potentiel sismogénique. La densité de population y est localement très élevée (métropoles aixoise et marseillaise). Si l'intensité des séismes historiques est assez élevée en Provence (intensité maximale de VII à IX et périodicité séculaire), elle ne subit qu'une microsismicité très faible. L'origine et les caractéristiques de cette sismicité restent mal connues : Pourquoi et comment des séismes d'intensités importantes se produisent-ils dans cette zone alors que la déformation aux limites est très faible ? Quelles sont les sources principales des futurs séismes ? Le rôle du sel dans la déformation actuelle et dans le comportement sismogénique régional ?

La réponse à ces questions n'est pas simple. En fait, l'étude des failles en contexte de déformation lente, comme c'est le cas de la France métropolitaine, se heurte à de sérieuses difficultés. En effet, dans un tel contexte, l'identification (localisation, géométrie) et la caractérisation (cinématique, vitesse, comportement sismogénique : taille des ruptures, chronologie des événements sismiques) des failles actives sont rendues plus difficiles en raison d'une oblitération rapide des traces en surface par les processus érosifs et les modifications anthropiques du paysage (e.g., Peulvast et al., 1999). Cette difficulté constitue un défi scientifique à relever et l'attente de la société à ce sujet mérite un effort particulier de la part des chercheurs.

Amélioration du modèle sismotectonique de la Provence occidentale (intégration de l'échelle de la faille sismogénique, à l'échelle de la croûte) – projet SITEC_PROV

Parmi les programmes fédérateurs récents en Sciences de la terre, certains d'entre eux ont pour vocation d'établir un protocole pour évaluer l'aléa sismique des régions où les taux de déformation sont faibles et la sismicité modérée (cf., programme SAFE coordonné par M. Sébrier (UPMC); ACI « Lambesc » coordonnée par D. Chardon (CEREGE-UPCAM), ACI « IRIS 2 », en cours, coordonnée par O. Bellier).

Dans le cas d'une région soumise à des déformations modérées comme la Provence, ces programmes de recherche ont contribué à une meilleure compréhension du comportement sismogénique des failles et du cycle sismique, et ont permis de valider certaines démarches consistant notamment à croiser les approches géologiques et géophysiques (e.g. Cushing et Bellier, 2003 ; Guignard et al., 2005 ; Chardon et al., 2005).

Le projet SITEC_PROV vise à améliorer le modèle sismotectonique de la région PACA et plus particulièrement de la Provence.

Il vient compléter les résultats déjà acquis concernant la caractérisation et la quantification des déformations actives et plus particulièrement de l'activité de la Faille de la Moyenne Durance, mais également de la Faille de Salon-Cavaillon et des plis-failles associés aux chaînons d'orientation plus ou moins E-W délimités par ces 2 failles (Le Lubéron, Les Costes, La Trevarresse, La Farre). Ces structures géologiques étant potentiellement sources d'aléa sismique, elles pourraient aggraver les installations à risque (Seveso, nucléaires, barrages) et le bâti « conventionnel » à risque normal.

Ce projet s'inscrit donc dans une démarche d'amélioration de l'évaluation de l'aléa sismique et par extension, du risque sismique.

Les axes d'études que nous présentons concernent plusieurs approches, chacune requérant une étroite collaboration interdisciplinaire qui devrait : 1-aboutir au développement de méthodes et au déploiement de techniques complémentaires d'observation, permettant d'appréhender les aléas sismiques à terre dans la région PACA et en mer, principalement à l'embouchure du delta du Rhône ; et 2- contribuer à l'étude des « interférences » entre les déformations, les séismes, les effets de sites, les glissements gravitaires (en mer).

Le projet SITEC_PROV devra également être le fédérateur de plusieurs actions de collaboration ou de recherches déjà engagées (collaboration CEREGE-IRSN, collaboration CEREGE-CEA, thèse CEREGE - Région PACA – CEA, collaboration Université de Provence (Laboratoire de Géologie des Systèmes Carbonatés) – CEA et la Chaire de Géodynamique du Collège de France.

Objectifs du projet « SITEC_PROV »

Le projet de recherche proposé s'inscrit dans le prolongement de ces travaux précédents. Son objectif est double : 1/ caractériser l'évolution géodynamique régionale qui permettra d'appréhender, de localiser et de quantifier la déformation récente, et 2/ améliorer le tracé et l'identification des zones actives (essentiellement : accidents tectoniques de la Moyenne Durance et de Salon-Cavaillon, et des chaînons E-W associés).

L'approche proposée met l'accent sur l'aspect pluridisciplinaire et intégré des travaux à réaliser. L'aspect novateur du programme passe 1/ par l'introduction de nouveaux paradigmes, tant méthodologiques (utilisation et développement de nouvelles méthodes d'acquisition de l'information géologique « de base ») que phénoménologiques (étude plus approfondie du rôle des couches salifères triasiques et oligocènes, des mécanismes sédimentaires), 2/ par une reprise et une analyse des observations géologiques disponibles (au sens large : sismicité historique et instrumentale, observation de surface, imagerie...) à la lumière de ces nouveaux paradigmes, 3/ par une hiérarchisation et une confrontation de ces données entre elles pour aboutir finalement à une intégration validée de ces éléments (SIG, modélisation géologique 3D).

Outils innovants d'évaluation et d'information sur l'aléa sismique régional et local en région PACA. Projet PAC_AS.

Les partenaires : Partenaires R&D : GEOTER SAS (Laboratoire régional des ponts et chaussées de Nice), INERIS, CEREGE 1. Partenaires utilisateurs : Région

PACA, DIREN PACA, Directions Départementales de l'Équipement et Direction régionale de l'Équipement, Collectivités, Industriels.

Le projet PAC_AS vise le développement de modèles d'évaluation de l'aléa sismique de la région PACA, fondés sur des méthodes conformes à l'état de l'art international, permettant notamment de prendre en compte toutes les incertitudes sur les connaissances actuelles et de les propager dans la quantification des mouvements utilisables dans différents cadres réglementaires, de l'échelle régionale, à l'échelle locale.

Basé sur une des méthodes probabilistes déclinées à ces différentes échelles, il répond aux besoins suscités par les évolutions réglementaires récentes (entrée en vigueur prochaine de l'Eurocode 8) et permettra, par l'intermédiaire de tableaux de bord géographiques, un accès à l'information, pour une large gamme d'utilisateurs.

Il s'inscrit dans la continuité de recherches menées à l'échelle régionale, dans le cadre d'une thèse cofinancée par la région PACA et GEOTER. Pour disposer de méthodes opérationnelles à l'échelle de sites particuliers où s'appliquent différentes réglementations (ouvrages courants, sites industriels, échelle communale des Plans de Prévention des Risques), il convient de procéder à un changement d'échelle, en développant des méthodes probabilistes intégrant la réponse dynamique des diverses configurations de site.

Le projet s'appuie sur les compétences transverses des partenaires et comprendra le développement des modules suivants :

1. Identification des incertitudes sur les propriétés mécaniques et géométriques du sous-sol. Développement de méthodes d'évaluation probabiliste de la réponse dynamique de différents contextes locaux intégrant la réponse du sous-sol et celle des reliefs en fonction de critères simples tels que la géologie de surface et la topographie;
2. Modélisation visant le calibrage et la validation des méthodes pour différents types de contextes, par la réalisation de γ -tests sur des sites type, et une confrontation aux méthodes d'évaluation plus classiques, à caractère déterministe. Les γ -tests sont destinés à mettre en œuvre de manière opérationnelle les méthodes en des sites présentant un intérêt particulier, soit en raison d'un contexte d'aléa particulier, soit en raison des données existantes disponibles sur le sous-sol. 4 sites sont actuellement projetés : le secteur de la Moyenne-Durance compris entre les communes de Manosque et Sainte-Tulle, la commune de Rognes pour la considération des effets topographiques, un secteur industriel de la région de l'étang de Berre ou de Fos sur Mer, la zone minière de Gardanne.
3. Le couplage des méthodes d'évaluation probabilistes de l'aléa sismique à l'échelle régionale, résultant des travaux déjà engagés, aux méthodes probabilistes développées dans le cadre du projet à l'échelle locale, pour développer une cartographie probabiliste régionale, servant de base et de référence aux déclinaisons des réglementations parasismiques. Il s'agira à ce stade d'exploiter les données existantes sur le sol, sous-sol et topographie à l'échelle régionale (cartes géologiques, bases de données du sous-sol, modèles numériques de terrain), et à mettre en œuvre sur la région, les méthodes développées dans le module « modélisation ».
4. Le développement d'un outil de diffusion des connaissances, de type tableau de bord géographique, accessible depuis l'Internet, et hébergé sur le site de la région

PACA, permettant à tout utilisateur d'obtenir des informations sur l'aléa sismique, à partir de requêtes prédéfinies.

Aléa/vulnérabilité

Le projet concerne la composante amont de la chaîne d'évaluation des risques. Il vise la quantification de l'aléa sous la forme de probabilités d'atteinte ou de dépassement de sollicitations sismiques, par le biais de méthodes probabilistes portant tant sur la contribution de l'environnement sismotectonique à l'échelle régionale, que sur la réponse locale liée à des contextes géologiques et topographiques.

Le caractère scientifique du projet ne doit pas occulter les applications opérationnelles qu'il vise. En effet, les méthodes et documents cartographiques auxquels le projet aboutira serviront de supports aux applications réglementaires qui concernent tant les ouvrages courants que les installations industrielles classées pour la protection de l'environnement. Cette réglementation est en pleine évolution, du fait de l'entrée en vigueur de l'Eurocode 8, à l'horizon 2007, et de la mise à jour, en cours, des arrêtés ministériels la régissant.

Celle-ci comportera un volet relatif à la construction des ouvrages nouveaux et un volet relatif à la vulnérabilité et mise aux normes des ouvrages existants. Les méthodes et cartographies découlant du projet, trouveront donc des applications directes, tant pour ce qui concerne les contraintes naturelles d'origine sismique, à prendre en compte dans la conception de projets nouveaux, que la pertinence de renforcements sous l'effet de mouvements sismiques correspondant à différentes probabilités annuelles d'atteinte ou de dépassement, qui pourront désormais être quantifiées.

4.3 Risques gravitaires et mouvement de terrains

(glissements de terrain, effondrements liés à des cavités souterraines naturelles (karsts) ou anthropiques (anciennes carrières ou mines), chutes de blocs, avalanches)

Participants : CEREGE 1, Cemagref, Géologie des Systèmes Carbonatés (UP), INERIS.

Mouvement de terrain et effondrements liés de cavités (naturelles (karsts) ou anthropiques (anciennes carrières ou mines)

De très nombreux secteurs urbanisés ou potentiellement urbanisables sont soumis à des risques de mouvements de terrain dont les origines et les conséquences peuvent être très variées. La protection des populations menacées ainsi que des aménagements (voies de circulation) est l'une des préoccupations majeures des services de l'Etat et des autorités locales dans leur devoir d'information publique et de garantie de la sécurité des populations exposées.

Dans la région PACA, le risque de mouvements de terrain prend une acuité toute particulière ; il est lié :

- à l'extension notable des zones alpines, dans lesquelles l'instabilité « naturelle » des versants rocheux escarpés est aggravée par une tectonisation importante des terrains, les sollicitations de nombreux microséismes régionaux et la très grande variabilité de paramètres climatiques tels l'hygrométrie et la température ;

- à la présence de cavités souterraines naturelles (dissolution) ou anthropiques (carrières ou mines), souvent évolutives comme dans le gypse, dont l'effondrement, brutal la plupart du temps, se répercute pratiquement instantanément en surface dès qu'elles sont situées à faible profondeur.

Outre l'affichage du risque, deux problématiques essentielles se posent vis-à-vis des risques de mouvements de terrain en général (miniers, carrières, glissements, falaises, séismes) : (1) comment analyser le danger effectif encouru par les biens et les activités existant dans ces zones à risques ? (2) comment maîtriser l'urbanisation dans ces zones sensibles sans condamner systématiquement tout projet d'aménagement sur des secteurs parfois très étendus et faisant l'objet d'une pression foncière importante ?

Pour gérer au mieux ces questions fondamentales ayant trait à la sécurité publique et à l'aménagement du territoire, il est indispensable de développer de nouveaux savoir-faire concernant les différentes thématiques intervenant dans une analyse de risques géotechniques. Les différents thèmes de recherche nécessaires à l'acquisition de ces nouveaux savoirs et savoir-faire couvrent l'ensemble de ces principales thématiques : (1) localisation, reconnaissance et qualification des anciens vides souterrains inaccessibles ; (2) auscultation des structures garantissant la stabilité des ouvrages ; (3) prise en compte de la climatologie, de l'hydrogéologie et de la présence de gaz (remnante de nappe, localisation des émergences, migration de gaz...) ; (4) prévision de la nature des instabilités (mécanismes, conséquences en surface, effets de l'eau, du temps et des aménagements futurs...) ; (5) recherche et validation de techniques d'analyse de risque adaptées aux différents objectifs à atteindre (analyse déterministe, probabiliste...) ; (6) développement et validation de principes de surveillance de cavités souterraines (écoute microsismique...) ; (7) détection de signaux précurseurs au déclenchement d'instabilités géologiques en grande masse (mouvements gravitaires, risques sismiques...) ; (8) interaction sol-structure (conséquences sur le bâti ou les activités) de mouvements de terrain ; (9) évaluation et validation de principes de traitement ou de protection permettant de mettre en sécurité les personnes et/ou les infrastructures de surface existantes ou futures.

L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), organisme placé sous la tutelle du MEDD, possède une expérience et une capacité d'expertise affirmées dans le domaine de la prévention des risques, probablement l'organisme le mieux armé en France dans le domaine de l'évaluation des risques liés à la présence de cavités souterraines, de carrières et de mines, en activité ou abandonnées, et de falaises sous-minées.

Plusieurs projets de recherche le plus souvent coordonnées par l'INERIS, mais en partenariat avec des partenaires de la fédération (CEA, IRSN...) peuvent être mentionnés : Projet STABROCK (ANR 2005 - Impact des changements climatiques sur la stabilisation des fronts rocheux (2006 – 2008) – Coord. : INERIS – Part. : Université de Nice, LAEGO (Nancy), L3S (Grenoble), Université de Besançon, LCPC, Sté SITES ; Projet RISEFFA (ANR 2006 – Risques d'effondrement de falaises crayeuses – Etude des facteurs de dégradation et de déclenchement (2007 – 2009) – Coord. : INERIS – Part. : ENPC, Université de Grenoble, CDGA (Bordeaux), IPG (Paris), BRGM, Fondation MAIF, LAFARGE (en attente) ; ANR 2006 – Projet FRACAS : Analyse de la stabilité d'un déblai rocheux (2007 – 2010) – Coord. : LRPC (Toulouse) – Part. : INERIS, EM (Alès), CDGA (Bordeaux), CEA,

LAEGO (Nancy) (en attente) ; ANR 2006 – Projet [CatT@CRL](#) : Analyse de la sismicité naturelle et de ses effets sur la tenue de versants rocheux (2007 – 2009) – Coord. : IPG (Paris) – Part. : INERIS, IRSN, Géosciences Azur, ENS Ulm (en attente) ; ANR 2006 – Projet MOUVTERRE : Intraction sol-structure et aléas mouvements de terrains associés à la présence de cavités souterraines (2007 – 2009) – Coord. : LAEGO (Nancy) – Part. : INERIS, INPL, INSA (Lyon), LCPC, CSTB, IGC, GEODERIS, BIDIM, DOREAN (en attente)).

Apport des nucléides cosmogéniques à l'étude des mouvements de terrain

La plupart des modèles récents de morphogenèse faisant le lien entre dynamique interne et évolution de surface tiennent compte de l'érosion linéaire et par diffusion. Or, sur le long terme les glissements gravitaires peuvent jouer un rôle majeur dans la morphogenèse en amplifiant fortement la vitesse d'érosion des versants. Leur prise en compte dans le bilan d'érosion nécessite de connaître les volumes concernés, les vitesses pour les mouvements lents et les fréquences pour les mouvements rapides. La contribution au forçage externe de ce type de dénudation doit donc être précisée et évaluée afin de déterminer ses relations avec le climat et quantifier son rôle sur la morphogenèse.

L'enchaînement des mécanismes qui conduisent à l'enlèvement de volumes rocheux à des vitesses supérieures à celle de l'érosion linéaire et le rôle du climat sur ce type de dénudation, et en particulier des climats quaternaires caractérisés par une forte cyclicité à haute fréquence temporelle, restent à être déterminés. Plus particulièrement, la distribution spatio-temporelle des phénomènes et le cycle global qui regroupe les phases pré-déclenchement – déclenchement - propagation et évacuation (s'il s'agit d'un cycle) ne sont pas contraints. De plus, la contribution de la dénudation gravitaire (ou dénudation catastrophique) dans l'évolution du relief peut être différente (amplitude et forme du signal) à chaque étape du cycle précédemment décrit.

La décompression des versants et la pente laissée par l'érosion mécanique des glaciers sont en partie à l'origine de nombreux glissements de terrain et écroulements qui jalonnent les vallées alpines. Toutefois, dans la plupart des vallées, aucune information d'ordre chronologique quant à l'âge de l'initiation des glissements et des premières manifestations gravitaires à l'échelle du versant n'est disponible. Les versants actuels ont-ils été modélés immédiatement après le retrait des derniers glaciers ? Les premières déstabilisations gravitaires du versant ont-elles commencé dès cette époque ou ont-elles été initiées beaucoup plus tard (donc récemment) après que les rivières de fond de vallées eurent suffisamment incisé les paléo-vallées glaciaires pour générer des versants parfois encore plus fortement pentés, donc instables ? Ou aussi, cette instabilité a-t-elle été initiée et/ou amplifiée par des variations climatiques au cours des 8 à 15 derniers mille ans ? Enfin, quelle est la part de l'activité tectonique dans les mécanismes de la déstabilisation et/ou dans son évolution ?

Pour chacun des trois grands types de phénomènes gravitaires qui peuvent être distingués, à savoir : (1) les mouvements rapides (éboulements, écroulements, avalanches rocheuses), qui sont les plus destructeurs du fait des vitesses importantes qu'ils peuvent avoir (quelques dizaines à plus de 100 km/h) ; (2) les glissements lents (quelques cm à plus d'un m/an) qui peuvent se dérouler sur plusieurs siècles ou millénaires ; (3) les "sackungs", qui affectent des versants

entiers de montagne et pourraient conduire à des glissements ou écroulements de grande ampleur, la possibilité de contraindre temporellement par la méthode de datation par la détermination de durées d'exposition aux rayonnements cosmiques utilisant les nucléides cosmogéniques produits in-situ l'apparition des différentes formes et structures caractéristiques des mouvements gravitaires étudiés permet d'envisager de déterminer les mécanismes ayant participé à leur genèse et à leur évolution passée et ainsi de prévoir leur évolution future.

4.4 Variabilité climatique et incendies

1) Climat et paléoclimat

La connaissance des environnements actuels passe par une amélioration de la connaissance des processus évolutifs qui ont conduit à la situation actuelle. L'histoire de ces processus commence il y a près de deux millions d'années alors que, sous l'effet d'une variabilité climatique de plus en plus contrastée et destructrice, le monde vivant se modifie et s'appauvrit, en particulier dans les régions de hautes et de moyennes latitudes. C'est dans ces régions que, de nos jours, se situent les centres de pouvoirs économiques, financiers, culturels et intellectuels et c'est dans ces centres de décision que des mesures en faveur de la protection des environnements sont en cours d'élaboration.

On sait maintenant qu'on est dans une période de réchauffement climatique, mais d'autres périodes chaudes ont existé dans le passé : durant le Moyen-Age, la période romaine et le milieu de l'Holocène il y a 6000 ans approximativement pour ne citer que les derniers. Mais contrairement au réchauffement actuel, ils étaient sans doute moins globaux. En plus de ce réchauffement, on constate presque chaque année des événements extrêmes et la question se pose de savoir si leur fréquence et leur amplitude ont changé depuis que le début de la période industrielle. La région Méditerranéenne est coutumière de sécheresses, d'inondations qui ont modelé son paysage, mais les changements que nous prédisent les modèles climatiques semblent être beaucoup plus rapides que les précédents et le problème se pose de la vulnérabilité de cette région à de tels changements.

Il est donc important de reconnaître dans les séries ayant enregistré les changements climatiques passés et présents les forçages prépondérants : variations de l'orbite terrestre, activité solaire, éruptions volcaniques, gaz à effet de serre. Cela ne peut se faire qu'en se servant à la fois de données climatiques (pour les périodes récentes) et de données indirectes ou « proxy » pour les périodes anciennes. Grâce à ce recul dans le temps, nous sommes en mesure de proposer, en étroite collaboration avec les modélisateurs des climats, des scénarios évolutifs des environnements à court, moyen et long terme.

Les archives sédimentaires étudiées à l'IMEP ont permis de montrer (projets européens FOSSILVA, ECOFOR, EVOLTREE, EUROMAAR) 1) le rôle déterminant des activités humaines sur l'organisation actuelle des structures de végétation et de leur support géomorphologique (dynamiques glaciaires et fluviales, crues aggravées par l'agriculture ou les incendies); 2) le poids des changements climatiques sur la diversité du monde vivant et sur sa distribution géographique au cours des 430 000 dernières années. Les études récentes ont permis d'accroître fortement la résolution et le nombre de proxies sur les mêmes enregistrements. La résolution annuelle est obtenue également à l'IMEP grâce aux données dendrochronologiques mais sur des périodes plus récentes (dernier millénaire).

L'IMEP dispose aussi d'archives paléoclimatiques dont les plus anciennes permettent un recul continu dans le temps de 400 000 ans. Ces archives françaises sont situées aux portes de l'Atlantique Nord qui fut, par le passé, le moteur principal des changements climatiques et des modifications du Vivant au sein du monde paléarctique occidental. Dans le futur, les variations de la circulation thermohaline de l'Atlantique Nord pourront avoir un impact majeur sur nos régions (refroidissement dû à un affaiblissement du gulfstream). Par ailleurs, l'étude des périodes chaudes antérieures (interglaciaires) dépourvues d'action anthropique permettent de mieux appréhender les effets des forçages naturels sur un réchauffement climatique : cela se fait par confrontation des données paléoenvironnementales et modélisation du climat. Nous ne disposons pas au sein

La transformation de données paléoécologiques en séries climatiques et leur confrontation avec les modèles climatiques est une spécialité du CEREGE. Cela s'est fait grâce à divers projets européens (MOTIF, SOAP) qui ont largement montré la synergie que pouvait avoir la collaboration des modélisateurs et de paléoenvironnementalistes. Pour le futur, un projet comme ESCARSEL a été soumis à l'ANR « vulnérabilité, climat et milieux ». Par ailleurs, nos objectifs s'inscrivent également dans le projet HYMEX de l'INSU qui vise à mieux comprendre les changements globaux en région méditerranéenne et leurs impacts sur l'hydrologie et les écosystèmes continentaux et marins.

2) Les incendies : point de vue physique

Une des conséquences du changement climatique est l'augmentation du risque d'incendie. Pour comprendre les incendies, leur dynamique et leurs conséquences à court et plus long terme, il faut dans un premier temps mieux comprendre comment les différentes composantes du milieu (écosystèmes, climat, pratiques humaines et sociales, et incendies) interagissent créant ainsi un risque, défini en termes *d'aléa*, de *vulnérabilité* et *d'enjeux*. L'*aléa* est le résultat de la combinaison des facteurs favorables au départ du feu. La *vulnérabilité* représente la sensibilité des écosystèmes selon leurs pertes potentielles (temporaires ou irréversibles) occasionnées par le passage du feu, alors que les *enjeux* se définissent d'après les pertes effectives ou quantifiées. L'axe 1 va se préoccuper essentiellement de l'aléa (inflammabilité, propagation des incendies) et des enjeux pour la société dans le cadre d'une prévention, alors que la vulnérabilité des écosystèmes forestiers et anthropisés est plus du ressort de l'axe 2. La quantification du risque d'incendie et son suivi dans le temps et l'espace nécessitent la mise au point d'un système d'information prenant en compte les incertitudes des composantes et leurs interactions. La sélection de seuils aboutira à un système d'alerte opérationnel qui aidera à prévenir la disparition d'écosystèmes menacés ainsi qu'à lutter contre les incendies proprement dits en permettant aux autorités et institutions locales d'optimiser les moyens de lutte disponibles. Le système d'information/d'alerte ne vise pas à éradiquer les incendies puisqu'ils existaient bien avant l'arrivée massive des hommes. On peut même dire qu'ils sont un élément majeur de la dynamique des écosystèmes forestiers. Par contre, il vise à réduire le nombre et de la fréquence des incendies dans les écosystèmes étudiés afin que ceux-ci retrouvent une dynamique proche de leur dynamique naturelle (maintien et fonctionnement), enravant ainsi la perte de biodiversité qui ne manquerait pas de survenir si les sécheresses devenaient de plus en plus fréquentes. Ici également l'appréciation du changement

dans le risque d'incendies ne peut se faire sans une remise dans son contexte historique via l'étude des charbons de bois dans les sédiments lacustres.

Implications juridiques des changements climatiques

Les changements climatiques figurent indiscutablement au rang des problèmes environnementaux qui ne peuvent être résolus sans une coopération internationale active. La menace est en effet « globale » : l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans un État ou une région du globe est susceptible de produire des conséquences en des points très éloignés de la planète. En outre, les pays en développement, qui n'assument pourtant pas la responsabilité historique des changements actuels, y sont les plus vulnérables.

Ainsi, peu de temps après l'émergence du questionnement scientifique, les changements climatiques ont été inscrits à l'ordre du jour de la diplomatie internationale. Dès le milieu des années 80, ils ont fait naître de vives discussions entre les scientifiques, s'interrogeant tant sur la part anthropique dans les changements que sur leur ampleur ou leurs conséquences. Dans un contexte incertain d'« *univers controversé* » (O. Godard), le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé conjointement par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'environnement, en 1988, avec une mission claire d'aide à la décision.

En 1992, à Rio, à l'occasion du Sommet de la Terre, plus de 160 pays signent la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Largement ratifié, l'instrument entre en vigueur rapidement, en mars 1994. Mais il ne s'agit que d'une convention-cadre, comme son nom l'indique, et la formulation est fort peu contraignante. Dans le but de mettre en place peu à peu les outils nationaux d'inventaire des émissions de GES, les parties se réunissent annuellement, pour tenir la Conférence des parties (COP). Deux organes subsidiaires – l'Organe subsidiaire de mise en application et l'Organe subsidiaire chargé de fournir des avis scientifiques et technologiques se réunissent également deux fois par an. Les progrès sont d'autant plus lents que les bénéfices d'une réduction importante des émissions sont à la fois variables dans le temps – certaines régions du globe pourraient même bénéficier des changements et en tout état de cause les régions seront diversement touchées – et diffus dans le temps – le bénéfice est attendu pour les générations futures, alors que les mesures délicates doivent être prises aujourd'hui³.

Lors de la 3^{ème} COP, en décembre 1997, le protocole de Kyoto est adopté. Cela marque une étape importante dans la consolidation du régime juridique du climat. Le nouvel instrument contient en effet des obligations plus précises et plus contraignantes que la convention. Soumise à des conditions exigeantes, l'entrée en vigueur du protocole a été retardée par divers facteurs et notamment par le retrait des Etats-Unis annoncé en mars 2001. Ce retrait n'a finalement pas empêché la COP d'adopter la même année les accords dits de « Bonn-Marrakech » qui, en précisant les modalités de mise en œuvre du protocole, en ont permis la ratification par les pays industrialisés et ont finalement autorisé son entrée en vigueur le 16 février 2005.

³ R. GUESNERIE, *Kyoto et l'économie de l'effet de serre*, Rapport CAE n°39, La DF, Paris, 2003, p. 23.

Nous savons que l'augmentation des besoins et de la consommation d'énergies fossiles, ainsi que d'autres activités humaines, contribuent en grande partie à l'accroissement des GES liés au réchauffement de la surface de la Terre. Si des incertitudes subsistent dans notre compréhension de la science du climat, nous en savons assez pour agir maintenant afin de commencer à ralentir et, pour autant que la science le justifie, à freiner et à inverser l'augmentation des GES »⁴. La question de l'avenir est d'autant plus importante que, pour s'engager dans les mécanismes économiques que met en place le protocole, les acteurs économiques ont besoin de signaux clairs quant à la pérennité du régime.

L'adoption des accords de Bonn-Marrakech sont venus préciser les modalités pratiques de mise en œuvre du protocole et également instaurer un système de contrôle et sanction du non-respect, mais aussi d'autres projets de décisions adoptés par les COP ultérieures. Différentes questions méthodologiques, institutionnelles, administratives et financières ont ainsi été passées en revue et ont donné lieu à une quarantaine de décisions. Cependant, la pérennité du régime international de lutte contre les changements climatiques n'est pas garantie.

La transposition à l'échelle internationale des expériences nationales de permis d'émission représente un énorme défi, à la mesure de l'enjeu environnemental des changements climatiques. Le protocole de Kyoto, dont l'originalité n'a d'égal que la complexité, n'apparaît-il pas comme le test d'une communauté internationale en construction forcée ? Est-il le laboratoire du droit international de demain ? Ou bien plutôt une « rêverie d'inventeur songe-creux, une utopie » selon le mot de Hugo ? Le suivi des négociations internationales, et l'analyse de la transposition des mécanismes et obligations internationales sur le plan européen s'avère particulièrement important.

3) Equipes impliquées

L'étude de la variabilité climatique dans son contexte historique se fait principalement au CEREGE et à l'IMEP. Les observations liées aux risques d'incendies est une spécialité de l'IMEP et du CEMAGREF/EMAX. La modélisation de la végétation (impliquant des systèmes d'information géographique) et donc du combustible nécessaire au déclenchement des incendies se fait au CEREGE et au CEMAGREF/EMAX. Nous ne disposons pas au sein d'ECCOREV de modèles climatiques qui sont des outils tellement lourds que seuls deux équipes les développent en France (IPSL, Météo-France). Mais nous avons suffisamment de coopération avec ces équipes pour disposer à la fois de « runs » sur le passé et de scénarios pour le futur. Le CERIC spécialisé en droit international travaille sur les implications à l'échelle nationale et régionales des accords internationaux liés à la réduction des GES.

4.5. Erosion(s), flux et morphogenèse

Participants : IMEP, CEREGE 1 & 2, IRSN/LERCM, Cemagref/OHAX, INRA, INERIS

Dans ce volet nous envisageons d'aborder la phénoménologie des processus « altération – érosion » en tant que : (1) cause de « déséquilibre » (de surface) et

4

[
<http://www.g8.gov.uk/servlet/Front?pagename=OpenMarket/Xcelerate/ShowPage&c=Page&cid=1119518698846>], consulté le 11 janvier 2006.

d'aléas naturels (crues torrentielles, érosions dans les marnes noires, glissements de terrain, chutes de blocs, ...) ; (2) facteurs d'édification du paysage et des reliefs ; (3) mécanismes de dégradation des sols naturels, cultivés ou constitutifs d'ouvrages en remblai ; (4) étude de l'impact des activités humaines sur l'évolution des sols et des reliefs ; (5) reconstitution des régimes passés d'érosion torrentielle.

D'autre part si on évoque l'érosion comme paramètre mécanique primordial dans les processus de morphogenèse, il faut également tenir compte du « flux » et de l'apport de matière dans la prise en compte des bilans. C'est pourquoi nous avons associé flux et érosion dans ce volet en mettant l'accent sur quelques programmes fédérateurs pouvant être développés.

Erosion, Flux et Transferts : du bassin versant au littoral

Dénudation long terme intégrée à l'échelle des bassins versants : Les nucléides cosmogéniques permettent de quantifier les taux de dénudation à différentes échelles spatiales et temporelles. Lorsqu'ils sont déterminés à partir de roches en place, ces taux, intégrés sur plusieurs centaines à plusieurs milliers d'années, ne permettent toutefois pas de mettre en évidence des variations de régime érosif. Lorsqu'ils sont déterminés à partir de la mesure des concentrations en nucléides cosmogéniques dans des sédiments transportés par les rivières, bien qu'intégrant également plusieurs centaines à plusieurs milliers d'années, ils peuvent néanmoins être directement comparés aux taux de dénudation obtenus par bilan géochimique (dissous-particulaire). Le couplage bilan géochimique - nucléides cosmogéniques permet dès lors de couvrir une très large gamme temporelle (de l'actuel à plusieurs milliers d'années). La comparaison des taux de dénudation déduits des bilans géochimiques, de la mesure de la concentration en nucléides cosmogéniques des roches en place et de la mesure de la concentration en nucléides cosmogéniques dans les sédiments de rivière devrait dès lors permettre de mettre en évidence d'éventuels changements de régime érosif (activité anthropique, tectonique....). Ce couplage de méthodes initié dans le Minas Gerais (Brésil ; thèse d'André Salgado) sera poursuivi et étendu à d'autres environnements, notamment l'île de Taiwan à travers la mise en place du LIA-ADEPT. La modélisation des bassins versants par MNT ouvre la possibilité de déterminer rigoureusement le taux de production des nucléides cosmogéniques sur l'ensemble du bassin versant étudié. Les méthodologies nécessaires à cette avancée essentielle seront développées afin de rendre cette approche applicable à un maximum de configurations topographiques et lithologiques.

Erosion et Risques littoraux

Les Risques littoraux (tempêtes, recul du trait de côte, disparition des plages, menaces sur les deltas) sont typiquement en relation avec des processus morphogénétiques font l'objet de plusieurs programmes de recherches, axés sur (1) la relation fleuve-mer (fonctionnement des embouchures), (2) la morpho-dynamique sédimentaire des plages sableuses, (3) les flux événementiels de matière et leur impact sur la redistribution de polluants.

Le projet CARMA étudie l'accent (1) sur les conséquences des crues et des tempêtes sur la mobilité du littoral et (2) sur le devenir des particules fines qui piègent la matière organique et les contaminants issus des diverses activités humaines. Il s'agit de comprendre et quantifier la dynamique spatio-temporelle du devenir des apports du Rhône en sables et particules fines, en déterminant les voies

de passage de la matière au sortir du fleuve, les zones de dépôt, les temps de résidence de ces dépôts, les flux érosifs et leur redistribution. Cette recherche associe mesures de terrain et modélisation hydrodynamique (thèse en cours : financement région PACA en partenariat avec le Port Autonome de Marseille) : suivi des apports du fleuve, courants, turbidité, niveau sédimentaire, variations granulométriques et bathymétriques. La modélisation des flux sera réalisée en temps réel pendant la période d'observation, qui permettra de sélectionner les zones à explorer. La modélisation numérique pourra être intégrée dans une approche de gestion du littoral (protection des installations conchylicoles, portuaires et industrielles de Fos sur Mer, gestion de la qualité des eaux).

Le projet PIBAL (Processus et interactions à l'interface bassin versant-littoral. Gapeau-Golfe d'Hyères (Var)-, soumissionné auprès du programme EC2CO associe 3 équipes régionales (dont des économistes) et une Université italienne. Il s'appuiera sur le démarrage d'une thèse, à financement régional. Il répond à la demande publique d'une gestion intégrée des bassins versants et des zones littorales, dans le cadre de la réglementation des SDAGE-SAGE et des contrats de baie.

Le projet se donne pour but de mettre en place un chantier-observatoire pluridisciplinaire sur un système bassin-versant – baie maritime, entre la basse vallée du Gapeau et la baie d'Hyères (83). Ce site est soumis à des enjeux économiques, écologiques et patrimoniaux importants. La recherche devra (1) caractériser et quantifier les différentes réponses des écosystèmes aux forçages naturels et anthropiques, pour comprendre les interactions complexes entre les différents compartiments du système côtier, (2) produire les outils et les méthodes permettant d'évaluer ces impact sur la dynamique et la stabilité des écosystèmes côtiers, (3) fournir les outils d'aide à la gestion des espaces littoraux. Une attention particulière sera apportée aux bilans des flux et aux processus biogéochimiques aux interfaces et à l'analyse des réponses du vivant. La démarche reposera sur un couplage entre observation, expérimentation et modélisation. L'intégration des Sciences humaines dans la proposition de recherche permettra de prendre en compte la gouvernance des zones côtières, à travers les processus de décisions publiques et privées, liés à la conservation et la valorisation des zones côtières.

Le programme IMPLIT (Impact des événements extrêmes (tempêtes et surcotes) liés au Changement Climatique sur les hydro-systèmes du littoral méditerranéen français), financé par le MEDD dans le cadre du GICC (Groupement pour l'étude du changement climatique) propose d'analyser, à l'échelle régionale du Golfe du Lion, l'évolution des caractéristiques des événements extrêmes (tempêtes = fortes houles + surcotes), leurs impacts géomorphologiques et hydrologiques sur les littoraux et l'application des politiques publiques à ce problème.

En termes de gestion environnementale, ce programme permettra : (1) D'établir des prévisions sur les récurrences probables et l'intensité des tempêtes et surcotes, sur l'érosion et les risques de submersions marines liées au changement climatique. (2) D'analyser les contraintes de situations extrêmes météo-marine en conjonction avec d'autres paramètres hydro-climatiques et d'établir des scénarii possibles de gestion de crise pour l'hydro-système lagunaire deltaïque de Camargue. (3) De comprendre et éventuellement de réorienter les politiques publiques sur la gestion des risques littoraux (4) De préconiser des recommandations pour l'utilisation des modèles de houle, d'érosion du cordon dunaire (SBEACH et modèle 3D développé par le CETMEF dans ce projet) et d'hydrologie des lagunes (VENSIM et SMS)

Enfin, le projet EXTREMA (Episodes météo-climatiques extrêmes et redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier) a été soumis à l'AAP de l'ANR « Vulnérabilité : milieu et climat » le 23 Août dernier. EXTREMA propose d'étudier, à court et moyen terme, les processus naturels générateurs de flux événementiels de matière et leur impact sur la redistribution de polluants au sein des différents compartiments de la géosphère : atmosphère, sols, rivières et fleuves, milieu marin côtier, milieu marin profond. Ce travail repose principalement sur la quantification et la modélisation des flux de matière solide et liquide, vecteurs de polluants. Les enjeux de cette recherche s'inscrivent dans un contexte de changement global et d'amplification avérée des événements météo-climatiques de grande ampleur générateurs de transferts de masses importants. Ils nécessitent de préciser la variabilité des flux et des concentrations de polluants, une étape indispensable dans l'évaluation de la vulnérabilité de l'environnement soumis aux aléas climatiques au cours des 20 à 30 prochaines années. Par l'analyse combinée des données historiques et de celles générées dans le cadre du projet au sein des zones ateliers ainsi que par la mise en synergie des compétences des différentes équipes partenaires (physique de l'atmosphère, chimie, géochimie, morphologie, sédimentologie, océanographie, modélisation), EXTREMA permettra d'apporter des connaissances sur :

- L'évolution de la fréquence des épisodes météo climatiques extrêmes sur la zone côtière du Golfe du Lion en s'appuyant sur les chroniques historiques du siècle dernier (précipitation, poussières atmosphériques, crues, inondations, tempêtes, cascading).
- La quantification des flux événementiels générés par les épisodes météo-climatiques intenses par rapport aux flux moyens annuels (flux liquides/flux solides – radionucléides artificiels et métaux traces associés).
- La nature/typologie des flux extrêmes en identifiant les vecteurs préférentiels de transfert (suspension/charriage, dispersion/translocation, chenaux, ...).
- Les relations empiriques forçage/flux au sein des différentes zones ateliers (grand bassin versant/bassin de taille restreinte) utiles à la fois aux extrapolations et aux approches prédictives.
- L'intensité de la redistribution des contaminants au sein des différents compartiments de la géosphère.
- L'identification des points de concentration/focalisation et des compartiments puits.
- La durée des déséquilibres engendrés par les aléas (réversibilité/irréversibilité, phénomènes de seuil et changements abrupts).
- La vulnérabilité des environnements côtiers au changement global pour les 20 à 30 prochaines années.

EXTREMA cible ses travaux sur deux grandes familles de contaminants : les radionucléides artificiels (^{137}Cs et transuraniens) et les métaux traces (notamment Pb, Zn, Cd et Cu). La vulnérabilité des milieux aux conséquences des aléas climatiques pour les prochaines décennies est abordée par la modélisation des transferts de masses en réponse à différents scénarii de changement climatique.

Ce projet porté par l'IRSN/LERCM sera réalisé en partenariat avec le CEREGE, le CEFREM, l'IFREMER et le Laboratoire d'aérodologie de Toulouse.

Erosion des sols des ouvrages hydrauliques

Les études et recherches sur l'érosion des sols répondent traditionnellement aux besoins de :

- la préservation des sols agricoles ou forestiers ;
- la protection contre les risques torrentiels ;
- la compréhension de l'évolution en profil ou en plan des cours d'eau.

Or, les sols sont aussi des constituants internes de nombreux ouvrages hydrauliques - anciens (barrages d'étang, digues de protection contre les inondations) comme récents (barrages en remblai à vocation d'irrigation, d'AEP ou de loisirs, etc.). Ainsi mis en œuvre dans des ouvrages qui, par définition, subissent des écoulements, ils sont potentiellement exposés, comme les sols « naturels », à des phénomènes d'érosion :

- externe : agression d'un cours d'eau (surverse ou érosion de talus) ou du ravinement météorique sur le(s) parement(s) du remblai ;
- interne : arrachage puis entraînement de grains du sol à l'intérieur du remblai sous l'effet d'écoulements internes.

Ces phénomènes peuvent conduire à la ruine de tels ouvrages en quelques minutes, avec des conséquences catastrophiques pour les populations et biens situés à leur aval (barrages) ou à leur abri relatif (digue). Aussi, dans le cadre de ses recherches sur les mécanismes portant atteinte à la sécurité des ouvrages hydrauliques, l'UR OHAX du Cemagref Aix s'intéresse de façon prioritaire à celui relevant des érosions externe et interne. L'objectif est d'élaborer les lois d'érosion permettant d'identifier les sols ou configurations à risques et d'y remédier. A ce titre, le Cemagref est moteur de deux projets de recherche sur l'érosion interne : ERINOH (accepté au titre de l'ANR-RGCU 2005, labellisé par le Pôle Risques et démarré en début 2006), dont le CEREGE est aussi partenaire, et MEISOH (labellisé Pôle Risques et venant d'être accepté par la Région PACA, dans le cadre de l'appel à projets de recherche finalisée 2006). Par ailleurs, l'Unité est membre actif du réseau régional PPF « Erosion, Sédimentation, Glissements » soutenu par la Région PACA et associant des laboratoires mécanistes de Marseille.

Pour les développements futurs autour de la connaissance et la compréhension des phénomènes d'érosion, notre conviction est qu'un rapprochement de diverses communautés scientifiques (mécaniciens des fluides, mécaniciens des matériaux, hydrauliciens, géochimistes, pédologues, géomorphologues) permettrait des avancées considérables : d'où l'implication du Cemagref-UR OHAX dans le projet de GDR STRAS (cf. 4.1) et son adhésion au projet de FR ECCOREV sur le présent sous-axe de l'axe 1.

PUBLICATIONS REPRESENTATIVES

ALLEAUME, S., HÉLY, C., LE ROUX, J., KORONTZI, S., SWAP, R.J., SHUGART, H.H. AND JUSTICE, C.O. 2005 - Using MODIS to evaluate heterogeneity of biomass burning and emissions in Southern African savannas:

Etosha National Park Case Study. *International Journal of Remote Sensing*. 26 (19) : 4219-4237

ANTONELLI, C., PROVANSAL, M., VELLA, C. 2004 - Recent morphological channel in a deltaic environment. The case of the Rhône River, France. - *Geomorphology*, 57: 385-402.

AOCHI, H., M. CUSHING, O. SCOTTI, C. BERGE-THIERRY. 2006 - Estimating rupture scenario likelihood based on dynamic rupture simulations: the example of the segmented Middle Durance fault, southeastern France. *Geophys. J. Int.*, 165, 436-446

ARNAUD P., LAVABRE J. 2002 - Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. *Water Resources Research*, vol 38, n°6.

ARNAUD P., LAVABRE J. 1999 - Using a stochastic model for generating hourly hyetographs to study extreme rainfalls. *Hydrological Sciences Journal*, 44 (3) 433-446.

BAROUX, E., BÉTHOUX, N., BELLIER, O., 2001 - Analyses of the stress field in southeastern France from earthquake focal mechanisms. *Geophysical Journal International*. 145, 336-348.

BAROUX, E., N.A. PINO, G. VALENSISE, O. SCOTTI, M.E. CUSHING. 2003 - Source parameters of the 11 June 1909, Lambesc (Provence, southeastern France) earthquake: A reappraisal based on macroseismic, seismological, and geodetic observations. 2003 - *Journal Geophysical Research*, Vol.108, N°B9, 2454, doi:10.1029/2002JB002348.

CHARDON C., O. BELLIER. 2003 - Geological boundary conditions of the 1909 Lambesc (Provence, France) earthquake: Structure and evolution of the Trévaresse ridge anticline. *Bull. Soc. Géol. France*, 174, n°5, 497-510.

CHARDON D., HERMITTE D., NGUYEN F., O. BELLIER, 2005 - First paleoseismological constraints on the strongest earthquake in France (Provence) in the twentieth century, *Geology*, vol. 33, no.11, p 901-904.

CHARMASSON S. 2003 - ¹³⁷Cs inventory in sediment near the Rhône mouth: role played by different sources. *Oceanologica Acta*, 26:435-441.

EYROLLE F, DUFFA C., ROLLAND B., ANTONELLI C., LEPRIEUR F., 2006 - Radiological consequences of the extreme flooding of the Rhône valley area (south east France, December 2003). *The Science of the Total Environment*, 366:427-438.

EYROLLE F., CHARMASSON S., LOUVAT D. 2004 - Plutonium isotopes in the lower reaches of the Rhône river over the period 1945-2000: Fluxes towards the Mediterranean Sea and sedimentary inventories. *Journal of Environmental Radioactivity*, 74:127-138.

EYROLLE F., ROLLAND B. and ANTONELLI C., 2006 - Artificial radioactivity within the Rhône river waters - Consequences of floods on activity level and fluxes toward the Sea, *Environnement Risques et santé*, 5, 2, 83-92.

GUIOT, J., NICAULT, A., RATHGEBER, C., EDOUARD, J.L., GUIBAL, F., PICHARD, G., TILL C., 2005 - Last-millennium summer-temperature variations in western Europe based on proxy data. *The Holocene*, 15, 489-500

GUITER, F., TRIGANON, A., ANDRIEU-PONEL, V., PONEL, P., HÉBRARD, J.-P., NICOUD, G., BEAULIEU, J.-L. (DE), BREWER, S. & GUIBAL, F., 2005 - First evidence of « in situ » Eemian sediments on the high plateau of Evian (Northern Alps, France) : implications for the chronology of the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews*, 24, 35-47.

HÉLY, C., ALLEAUME, S., SWAP, R.J., JUSTICE, C., AND H.H. SHUGART. 2003b. SAFARI-2000 characterization of fuels, fire behavior, combustion completeness, and emissions from experimental burns in infertile grass savannas in western Zambia, *Journal of Arid Environments*. 54 (2): 381-394.

HIPPOLYTE, J.C., BROCARD, G., TARDY, M., NICOUD, G., BOURLES, D., BRAUCHER, R., MENARD, G., SOUFFACHE, B. 2006 - The recent fault scarps of the Western Alps (France): Tectonic surface ruptures or gravitational sacking scarps? A combined mapping, geomorphic, levelling, and ¹⁰Be dating approach. - *Tectonophysics*, 418: 255-276.

MAILLET G., VELLA C., BERNE S., FRIEND P. L., AMOS C. L., FLEURY T. J., NORMAND A., - Morphological changes and sedimentary processes induced by December 2003 flood event at the present mouth of the Grand Rhône river (southern France). *Marine Geology* - accepted.

MAZABRAUD, Y., BÉTHOUX, N. GUILBERT J., BELLIER, O., 2005. Evidence for short-scale stress field variations within intraplate central-western France, *Geophys. J.Int.* 160, 161-178.

ROLLAND B., EYROLLE F., BOURLES D., 2006, Transfert des Radionucléides artificiels par voie fluviale : Conséquences sur les stocks sédimentaires et les exports vers la Méditerranée, *Radioprotection*, 41, 2, 6-8.

SABATIER F., PROVANSAL M., FLEURY T. (2005). Potential Implications of Sea-Level Rise for France. *Journal of Coastal Research*, 21, 4, 860-864.

SIAME L., O. BELLIER, R. BRAUCHER, M. SÉBRIER, M. CUSHING, D. BOURLÈS, B. HAMELIN, E. BAROUX, B. DE VOOG, G. RAISBECK, F. YIOU. 2004. High denudation rate as diagnostic criterion for identifying active deformation? Cosmic Ray Exposure in Provence (South-East France). *Earth Planet. Sc. Lett.*, 220, 345-364.

AXE 2. VULNERABILITE DES ECOSYSTEMES TERRESTRES ET AQUATIQUES

2.1. Enjeux sociétaux

Les écosystèmes terrestres et aquatiques subissent des pressions liées au climat et à l'activité anthropique caractérisée par l'usage des surfaces et les modalités de gestion de celles-ci. Ces pressions peuvent avoir un impact sur l'état du milieu et ses fonctions dont l'altération peut porter un préjudice environnemental, sociétal et économique. Il existe donc un enjeu important à pouvoir maîtriser l'évolution et la dynamique des écosystèmes et minimiser l'impact d'événements extrêmes. Ceci suppose que l'on puisse i) définir des critères sur l'état du milieu qui doivent tenir compte du double point de vue du fonctionnement des écosystèmes et de leurs usages actuels et futurs ii) donner les bases de compréhension du fonctionnement des écosystèmes en relation avec les pressions qu'ils subissent et iii) imaginer des outils d'action collective socialement acceptables. Ces travaux doivent contribuer à définir des mesures techniques, juridiques et réglementaires permettant de répondre aux objectifs fixés. Parmi ceux-ci la préservation, voire la restauration, des ressources telles que l'eau, le sol et la biodiversité constitue une préoccupation importante. Celle-ci est amplifiée par le contexte du changement global qu'il conviendra d'accompagner dans le futur afin d'adapter les modes de gestion des écosystèmes aux nouvelles données climatiques, économiques et sociales. Enfin, les écosystèmes sont soumis à des aléas dont l'intensité et la fréquence peuvent évoluer dans les prochaines années. Il y a donc un enjeu important à caractériser les risques et développer des stratégies dans la gestion des écosystèmes afin de les minimiser.

2.1.1. Maîtriser de manière durable les ressources

L'eau

Une question récurrente posée actuellement aux hydrogéologues et hydrologues concerne le devenir probable des stocks, des flux et de la qualité des eaux dans les nappes et les eaux superficielles, compte tenu des scénarii possibles de modification des conditions aux limites. Les changements d'usage imposés par des pressions variées (économique, sociale, climatique, perte de fertilité) et les changements climatiques ont un impact direct sur le débit des rivières, sur la recharge des aquifères et leur évolution qualitative.

Cette problématique rejoint les préoccupations environnementales du moment exprimées, par exemple :

- par la directive cadre sur l'eau qui impose aux états membres de l'UE d'établir un inventaire des ressources en eau de surface et souterraine et de leur qualité. Cet inventaire doit être suivi par la mise en place de procédures de conservation et de restauration des milieux aquatiques afin d'assurer le bon fonctionnement écologique de ces milieux et par voie de conséquence la qualité de la ressource. Les éléments biotiques seront utilisés comme indicateurs d'état.

- par les thématiques retenues pour le 7^{ème} PCRD qui proposent, entre autre, de s'intéresser à l'impact anthropique et des changements climatiques sur l'évolution des bilans hydriques à différentes échelles et la gestion des systèmes d'eau souterraines, en particulier dans les zones à vocation agricole. En zone méditerranéenne on peut, par exemple se poser la question de l'évolution des techniques agricoles pour favoriser la recharge des nappes et assurer un rendement minimum en période de disponibilité hydrique limitante, tout en maintenant des conditions d'étiage acceptable dans les cours d'eau.
- par les conclusions de l'expertise pesticide qui a montré que l'ampleur de la présence de pesticides dans les eaux de nappe (rapport IFEN : μ des eaux de nappe suivies sont contaminées en 2004 et impropres à la consommation humaine sans traitement spécifique). Comment prévoir à moyen terme la dynamique de ces polluants vers et dans les eaux souterraines (transport / évolution dans le sol et dans la nappe) ?

La pression sur la ressource et la demande sociétale sur la préservation des ressources hydriques risquent de conduire à une augmentation de l'épandage d'eau de mauvaise qualité riche en métaux, matière organique et organismes pathogènes. Ces pratiques sont déjà courantes en zone semi aride. Au niveau mondial on compte que 10% des sols irrigués reçoivent de l'eau usée plus ou moins diluée. En zone méditerranéenne, la raréfaction des ressources hydriques dans nombre de sites oblige à réutiliser les eaux usées après traitement, dans certains pays comme la Jordanie, 85% des eaux usées sont réutilisées, à Chypre c'est 100% (source FAO). Une telle situation pourrait s'étendre en Europe, en particulier sur le pourtour méditerranéen. De plus, une mesure interdisant le rejet des effluents de stations d'épuration dans le réseau hydrographique est attendue à moyen terme. Il convient donc de pouvoir spécifier les capacités de filtration du sol afin de bien maîtriser les flux d'épandage.

Les aquifères lagunaires sont fragilisés par l'arrivée irrégulière et massive d'eau douce, provoquant un choc halin susceptible de détruire certaines espèces (étang de Berre) ou d'engendrer la prolifération de cyanobactéries. Une gestion durable de ces écosystèmes passe donc une maîtrise de la salinité des eaux en gérant les échanges d'eau avec la mer.

Le sol

Le sol joue un rôle important comme ressource pour les écosystèmes et comme régulateur dans les flux de masse. Cependant, la déréglementation des marchés agricoles, la pression urbaine et/ou touristique, des conditions climatiques parfois défavorables et le surpeuplement de certaines régions ne vont pas en faveur d'une gestion raisonnée des sols. Ainsi dans les rapports préparatoires à la directive européenne sur les sols⁵ les problèmes d'érosion accélérée, de lessivage, d'acidification et la salinisation des sols, ainsi que la pollution par des métaux et des xénobiotiques persistants sont mis en avant. La dégradation physique et chimique

⁵ Van-Camp. L., Bujarrabal, B., Gentile, A-R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazabal, C. and Selvaradjou, S-K. (2004). Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 21319 EN/1, 872 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

des sols, voire leur destruction finale, progressent plus rapidement que leur régénération par l'altération naturelle. Il en résulte que l'aboutissement de la revendication légitime d'une planification environnementale fondée sur la durabilité des systèmes rencontre aujourd'hui de très nombreuses difficultés.

Biodiversité

L'exceptionnelle diversité biologique et la vulnérabilité des écosystèmes de la région méditerranéenne ont encore été soulignées récemment, car la crise actuelle d'extinction des espèces et la rapidité des changements environnementaux menacent cet héritage biologique unique. Du fait d'un impact anthropique exponentiel, ne subsisterait en effet que 5% de végétation méditerranéenne qualifiée de *naturelle*. Les destructions et modifications d'écosystèmes conduisent ainsi à de très sérieux problèmes d'érosion de la biodiversité dont les conséquences écologiques et socio-économiques restent sous-estimées. De même, l'essentiel de la diversité piscicole européenne s'exprime dans le biome méditerranéen (endémiques) et est menacé par les introductions, la fragmentation des habitats et la dégradation des milieux.

Cette forte biodiversité méditerranéenne terrestre a été modelée par divers épisodes paléogéographiques (ex. crise de salinité du Messinien) et climatiques (cycles glaciaires-interglaciaires). Hérités d'une longue histoire, les espèces méditerranéennes représentent ainsi des modèles évolutifs complexes et variés, ce qui se répercute sur la structure et le fonctionnement des systèmes écologiques et sur leurs capacités de résilience. De plus, l'ancienneté de l'impact humain en Méditerranée a eu de profondes conséquences sur l'organisation des paysages et la diversité des écosystèmes. Ainsi, même s'il a plus ou moins traversé le crible de grandes crises environnementales comme les glaciations du Pléistocène, cet héritage biologique s'avère très fragile face à la rapidité et l'ampleur des changements environnementaux prévus ou en cours sur le pourtour méditerranéen.

La place de l'Homme est aujourd'hui déterminante. L'urbanisation, l'aménagement du territoire et les choix de gestion (pratiques agricoles, sylvicoles, piscicoles...) déterminent les dynamiques des écosystèmes et des agroécosystèmes, permettant d'accompagner les changements environnementaux à venir. Les activités anthropiques ont aussi un impact indirect sur la magnitude des phénomènes de raréfaction ou d'extinction des espèces animales et végétales.

La conservation de la biodiversité constitue désormais une préoccupation scientifique, économique et sociale de premier plan. C'est le cas tout particulièrement de la région méditerranéenne qui apparaît comme l'un des 34 points-chauds de biodiversité (hotspot) identifié au niveau mondial, sur la base de la forte richesse en espèces végétales et animales et de la présence d'un contingent très important d'espèces endémiques. Il s'agit aussi d'une région clé pour la conservation des ressources génétiques du fait de la grande originalité et diversité des pools géniques locaux. Cependant, ce hotspot méditerranéen est aussi l'un des plus menacé par les impacts anthropiques et le réchauffement climatique, ce qui a conduit à l'identifier récemment en tant que « biome en crise ».

Toutefois, l'impact des changements globaux en cours et prévus reste encore difficile à cerner car ils dépendent aussi des conditions environnementales locales, de la structure et de la composition spécifique des écosystèmes, des régimes de perturbation et de l'ampleur des diverses pressions anthropiques. Ainsi, intégrer ces changements environnementaux dans une gestion durable de l'espace biologique

méditerranéen et de ses ressources représente un défi majeur, à la fois pour les écologues et les chercheurs en sciences sociales. Les régions soumises au bioclimat méditerranéen constituent d'ailleurs des territoires d'exception pour analyser les interactions complexes nouées entre les sociétés humaines et la biodiversité, puisque l'héritage de cette action anthropique pluriséculaire se reflète différemment selon les terroirs, les habitats et les types d'espèces structurantes. Cette hétérogénéité des actions humaines et des réponses biologiques nécessite la mise en œuvre de recherches pluridisciplinaires multi-niveaux, coordonnées sur de longues durées et au sein de territoires choisis comme représentatifs des trajectoires écologiques et socio-économiques en cours.

2.1.2. Anticiper et accompagner les effets du changement global

Nous nous intéresserons en particulier au contexte du changement global. Celui-ci est le résultat de pressions diverses induites par le changement climatiques et l'activité humaine. Celle-ci interfère avec les écosystèmes continentaux et aquatiques par l'usage qui est fait des milieux et les modalités de gestion suivies. Les flux de personnes, les contraintes économiques induites en particulier par la mondialisation engendrent des mutations rapides et profondes de ces usages et pratiques qu'il convient d'anticiper afin de proposer des mesures d'accompagnement d'ordre technique, économique ou réglementaires. Les effets du changement global sont particulièrement importants dans la zone méditerranéenne qui est un milieu d'étude privilégié des laboratoires de la fédération de recherche du fait de leur implantation géographique. Dans cette région les traits spécifiques du changement global sont :

- Des modifications du climat allant vers une modification des régimes hydriques avec des ressources globalement en baisse, une accentuation des événements extrêmes et des périodes de sécheresse plus marquées. Un tel contexte doit conduire à affiner la gestion future des ressources hydriques pour l'irrigation en cherchant le meilleur compromis pour un maintien de la production, des ressources hydriques et de la biodiversité aquatique et terrestre
- Une mutation rapide des activités agricoles caractérisée par
 - une emprise forte des marchés et de la concurrence dans les domaines du maraîchage et de l'arboriculture;
 - une déprise agricole dans les zones les moins favorisées
 - une pression foncière forte conduisant à une urbanisation rapide dans les zones péri-urbaines
- un impact des activités anthropiques qui s'accroît et s'étend dans les zones périurbaines
- un risque incendies qui évolue du fait de l'extension des zones habitées et l'amplification des périodes sèches.

L'un des fruits du Sommet de Rio, en 1992 est la Convention internationale sur la diversité biologique, ratifiée par 186 Parties. Mais en dépit d'une activité diplomatique relativement soutenue la Convention sur la diversité biologique n'a pour l'instant pas produit les résultats escomptés. Le cadre que constitue la Convention sur la diversité biologique, pour ambitieux qu'il soit, n'est pas sans présenter certaines ambiguïtés. Les objectifs sont multiples et à certains égards contradictoires. En outre, le texte, très général, contenant des obligations très atténuées, appelait de nombreuses concrétisations. Mais si la Convention fournit un

utile cadre de débats, et participe peu à peu à la création de référentiels mondiaux sur la biodiversité et sa gestion, elle peine à aboutir à des résultats concrets. L'examen des moyens, après plus de dix ans de fonctionnement, en révèle par ailleurs les faiblesses.

Récemment entré en vigueur, son premier Protocole, et peut-être son résultat le plus significatif, vise à sécuriser les échanges internationaux d'organismes génétiquement modifiés. L'absence de certains gros exportateurs d'OGM – comme les Etats-Unis – en fragilise l'avenir. En témoigne le litige opposant ces derniers à l'Union européenne qui vient d'être tranché dans le cadre de l'Organisation Mondiale du Commerce.

Dans ces conditions, la Convention constitue-t-elle un outil opérant pour atteindre l'objectif « 2010 » proclamé en son sein, celui d'une inversion de l'appauvrissement de la diversité biologique ? Comment la Convention est-elle transcrite dans le droit européen et dans le droit français ? Il serait opportun d'analyser le contenu, les méthodes préconisées et la mise en oeuvre à la fois de la Convention et des différents outils du droit européen et français (stratégies, Natura 2000, conditionnalité, etc.), et plus généralement de réfléchir aux formes et modalités de l'action publique en la matière. Plus spécifiquement, une réflexion pluridisciplinaire sur la gouvernance internationale des OGM pourrait être menée.

2.1.3. Prévenir les risques

Erosion de la biodiversité

Les enjeux sociétaux liés à l'érosion de la biodiversité portent sur l'estimation des conséquences écologiques de plusieurs impacts majeurs : (i) destruction et fragmentation des écosystèmes et des populations animales ou végétales, (ii) impacts écologiques des incendies, (iii) impact des espèces exotiques introduites et à caractère envahissant.

Les destructions directes des écosystèmes par l'urbanisation et les aménagements divers se manifestent en particulier en zone littorale, conduisant à des extinctions d'espèces ou de populations. Les phénomènes liés aux fragmentations des milieux naturels s'avèrent plus complexes, avec des changements dans les flux physico-chimiques, les interactions biotiques et des modifications des autres régimes de perturbation. Etudier le devenir des écosystèmes et des populations animales ou végétales isolés artificiellement par l'action humaine constitue un enjeu sociétal fort du fait des phénomènes de péri-urbanisation qui affectent une frange importante de la Provence méridionale.

Les conséquences écologiques des incendies sur les écosystèmes sont désormais plus robustes, mais il reste à les transcrire dans les politiques de gestion globale des territoires. En effet, les capacités d'auto-restauration (résilience) des écosystèmes méditerranéens sont dans l'ensemble importantes et les impacts des incendies sur l'érosion de la biodiversité s'avèrent souvent sur-estimés. De fait, les opérations de restauration post-incendies ou de protection des massifs forestiers peuvent conduire à des dysfonctionnements écologiques plus importants que les incendies eux-mêmes. Il faut donc s'interroger sur les conséquences des stratégies de minimisation des risques d'incendies sur les massifs forestiers provençaux. Cependant, les changements probables des régimes d'incendie liés à l'accroissement des températures et des épisodes de sécheresse font peser de

nouvelles menaces sur les écosystèmes, et les espèces vont réagir différemment selon leurs exigences écologiques et leurs caractéristiques biologiques intrinsèques.

Invasion biologique

L'impact des espèces envahissantes représente actuellement une composante significative des changements globaux, sans oublier les problèmes sous-jacents de santé publique (ex. cas de l'invasion actuelle des agrosystèmes de la vallée du Rhône par l'ambroisie). Les conséquences des invasions biologiques sont le plus souvent appréhendées au niveau des communautés indigènes grâce aux études sur la richesse spécifique, les régimes de perturbation, la dynamique des nutriments et les modifications des cycles hydrologiques. Une facette peu étudiée de l'impact des espèces envahissantes concerne les interactions de facilitation nouées entre différentes espèces introduites, processus nommé « mélange envahissant ». En effet, l'introduction de différentes espèces allochtones au sein d'un nouvel écosystème peut se traduire par l'établissement d'un réseau complexe d'interactions biotiques nouvelles, dans lequel les espèces expansionnistes et/ou envahissantes agissent en synergie. Les impacts des invasions biologiques sur les écosystèmes indigènes s'avèrent alors amplifiés, ce qui augmente leur vulnérabilité. Une autre facette qui pose des problèmes écologiques en devenir concerne l'hybridation entre les espèces introduites et les espèces autochtones. Ce processus d'« envahissement génétique » peut conduire à des modifications des espèces locales, avec apparition de nouveautés évolutives dont l'adaptabilité et la résilience doivent être sérieusement questionnées.

Incendies

L'incendie est une réalité forte des territoires méditerranéens. Le risque d'incendie est en grande partie lié à la composition et la structure des couverts végétaux ainsi que leur organisation spatiale dans le paysage. On peut quantifier l'aléa de départ de feu pour un milieu donné qui dépend fortement du climat et c'est du ressort de l'axe 1. Cet axe 2 va plus se préoccuper de la vulnérabilité de l'écosystème à ces incendies. L'enjeu est donc de pouvoir caractériser ce risque afin de délimiter les zones vulnérables et proposer des modalités de gestion des couverts qui permettent de le minimiser.

2.1.4 S'appuyer sur l'action publique

La question environnementale peut-être un facteur important de la mise en œuvre progressive de la conditionnalité des aides agricoles. Dans un pays où la moitié du territoire est dédiée à l'agriculture, et où les paysages, voire les modalités d'occupation du territoire par l'homme sont en partie issues des pratiques agricoles, cette question interroge l'aménageur. Des liens étroits lient, pour le meilleur et pour le pire, la biodiversité et les activités agricoles. A partir du milieu de la décennie 80, les réformes de la PAC ont progressivement institué des mesures incitatives et contractuelles en vue d'une meilleure prise en compte des enjeux environnementaux (les mesures agri-environnementales ou MAE). Mais ces mesures, aujourd'hui bien étudiées, se sont révélées limitées dans leurs effets. Ce constat a conduit à la révision radicale, à mi-parcours de la nouvelle PAC, en juin 2003, afin notamment de « promouvoir une agriculture durable et orientée vers le marché », de rendre obligatoire la conditionnalité des aides et de « renforcer le développement rural ». Le suivi de cette réforme et de ses enjeux est aujourd'hui au cœur de nos interrogations.

Un autre point est la protection des espaces naturels sensibles à travers les procédures contractualisées d'aménagement du territoire, essentiellement les contrats de projets Etat région et les modalités d'utilisation des fonds structurels européens. Les régions du sud de la France sont caractérisées par la multiplication des réflexions à une échelle plus large qui dépasse la simple échelle des communes ou des regroupements de communes. La banalisation et l'urbanisation de la côte littorale, les politiques de développement et de désenclavement des vallées alpines, les réflexions sur la constitution de vastes coupures vertes ou la sauvegarde des activités agricoles mobilisent des financements croisés et des politiques partenariales qui visent à assurer un développement territorial pérenne. Il s'agit ainsi de suivre les politiques de développement rural, fondées sur un développement endogène doux, notamment à travers la politique des pays ou des programmes européens Leader ou Interreg, ou les politiques de protection et de mise en valeur de l'environnement, à travers les parcs naturels régionaux, qui contribuent à façonner le territoire. Au moment même où sont négociées les modalités de financement des grands programmes publics pour la période 2007-2013 c'est la question de la capacité de l'action publique, par ces dispositifs contractuels, à répondre aux défis de l'aménagement durable du territoire qui se trouve posée.

En conclusion, nous voyons que les modalités techniques de gestion des écosystèmes ne peuvent être dissociées des usages qui en sont fait et des contraintes inhérentes à ceux-ci. Un des enjeux de la fédération de recherche sera donc de faire converger les points de vue du fonctionnement des écosystèmes avec celui des sciences humaines et sociales.

2.2. Fronts de recherche

Pour répondre aux différents enjeux, les connaissances sont nécessaires sur la compréhension, la caractérisation et la modélisation des processus de transfert et de la structure et la dynamique de la biodiversité et des écosystèmes. Il convient également de s'appuyer sur une compréhension des interactions entre les activités humaines et les écosystèmes ce qui nécessite de prendre en compte les connaissances développées dans le domaine des sciences économiques, humaines et sociales. Dans chacun de ces domaines des verrous scientifiques subsistent et sur lesquels les équipes de la fédération de recherche sont mobilisés.

2.2.1. Les transferts de masses et d'énergie

Les transferts de masses et d'énergie vont déterminer le niveau des ressources dans les écosystèmes et les échanges entre les différents compartiments du milieu pouvant conduire à des accumulations de substances plus ou moins désirables. Par transferts de masse, nous considérons l'eau, les solides et les différentes molécules ayant un impact sur la qualité du milieu (métaux, pesticides, molécules organiques...). Il y a ici une complémentarité forte avec l'axe 3 plus centré sur la compréhension des processus à l'échelle fine. Dans l'axe 2, ils convient d'appréhender différentes échelles spatiales et temporelles permettant de pouvoir couvrir les échelles locales et les échelles plus vastes des paysages ou écosystèmes, des écosystèmes, d'un aquifère ou d'un réseau hydrographique.

Les principaux verrous actuels concernent :

Les mécanismes d'échange dans les hydrosystèmes (lagune, nappes ...)

- Sans être exhaustif, il existe bon nombre de risques environnementaux liés par exemple au mélange d'eau de composition différente, de densité différente, de température différente du milieu récepteur, qui pourraient être limités, de manière préventive, en ayant recours à une approche hydrodynamique suffisamment performante pour déterminer les paramètres de fonctionnement adéquat (débit des rejets, positionnement des émissaires, design de diffuseurs multi-ports/multi-risers, etc..). Par exemple, les écosystèmes lagunaires saumâtres sont le siège de risques environnementaux spécifiques qui sont précisément liés à la variation plus ou moins rapide de la salinité. Dans certains cas au moins, il doit être possible après une analyse fine des mécanismes et en s'appuyant sur des moyens performants tant sur le plan de la modélisation que des mesures d'envisager des remédiations par contrôle hydrodynamique. Actuellement il est encore très difficile de trouver des codes réellement tridimensionnels tenant compte correctement :

- des interfaces eau : fond : effets de couche limite de fond (avec effet de rugosité, de marée), effet de remise en suspension et de dépôt,
- des mécanismes fins à l'interface eau/air dans le cas de vent ; échanges dynamiques, bilan énergétique,
- des mécanismes d'interaction vagues / rivages
- des forces de flottaison lorsque le gradient de densité est important, surtout dans le cas de double diffusion : salinité / température.
- des mécanismes de transport de suspensions avec interaction mutuelle (agrégation / désagrégation)
- du couplage réactions et transport des espèces par diffusion et convection

Bon nombre des développements qui sont encore nécessaires au niveau de la modélisation, et de la mise au point de codes efficaces, nécessitent des approches multidisciplinaires.

Les mécanismes de transports dans le sol

Le sol est un milieu difficilement accessible à la mesure et très hétérogène. C'est également un milieu dans lequel différents modes d'écoulement coexistent. Les difficultés rencontrées sont de plusieurs ordres. D'une part on manque toujours d'outils efficaces de caractérisation permettant de quantifier les propriétés de transferts de manière fiable sur des domaines d'espace importants. La distribution des systèmes racinaires dans l'espace et le temps et leurs interactions avec les facteurs du milieu restent difficiles à caractériser et prévoir. D'autre part, la compréhension et la représentation de certains modes d'écoulement tels que les écoulements préférentiels et le ruissellement restent insuffisantes. Il est important de pouvoir identifier ces voies d'écoulement et leur localisation dans l'espace. Cette double difficulté, méthodologique et conceptuelle, ne permet pas de pouvoir prédire de manière robuste les flux d'eau dans le sol et à sa surface.

Les cycles biogéochimiques

La mobilisation et la biodisponibilité des éléments et molécules (organiques ou minérales) sont fortement tributaires des interactions entre les équilibres géochimiques et l'activité des organismes vivants dans le sol. Il y a de fort

recouvrement avec l'axe 3 sur un grand nombre de processus clé. Outre les complémentarités sur les échelles spatiales, l'axe 2 se caractérise par une approche systémique de ces cycles où l'on s'intéressera au continuum "plante-surface-sol-sous sol-nappe" en intégrant les interventions techniques réalisés pour la gestion de l'écosystème. Les verrous scientifiques traités au sein de la fédération de recherche sont de plusieurs ordres :

- la spéciation chimique, la caractérisation de la réactivité et de la labilité des fractions solides minérales, organiques et organo-minérales des sols. Au delà des connaissances établies à l'échelle locale (en lien avec l'axe 3), il convient de pouvoir caractériser les flux sur des échelles de temps long et à des échelles spatiales allant du profil de sol au territoire avec un niveau intermédiaire privilégié qui est celui de la parcelle vue comme unité de gestion ;
- l'acquisition in situ de données géochimiques dans des écosystèmes contrastés ; la modélisation et l'acquisition de références; le traitement des signaux chimiques à haute répétitivité temporelle et l'interfaçage avec des modèles de transfert. L'objectif est de pouvoir développer des indicateurs pertinents de l'état du milieu ;
- la caractérisation et la modélisation du transport des matières organiques dissoutes, qui est un point clé si l'on veut prédire les activités microbiennes (intensité et nature) en profondeur (avec tout ce que cela implique sur le devenir des polluants), et le déplacement des métaux complexés. Il convient en particulier dans le cadre du changement global de s'intéresser aux alternances dessiccation/humectation qui peuvent avoir un impact sur les dynamiques des populations de micro-organismes et les activités associées ;
- le déplacement des particules minérales et des bactéries dans les sols et la zone non saturée profonde en fonction du régime d'écoulement d'eau qui est un point essentiel pour estimer les flux rapides de polluants habituellement peu mobiles. En particulier, il est nécessaire d'étudier la modification des phénomènes de production et de transports des particules dans le sol en lien avec la remobilisation de polluants dans le cas de pluies extrêmes ;
- les couplages et les rétroactions entre transferts et cycles biogéochimiques dans le continuum sol, zone non saturée profonde, nappe. Un accent particulier doit être mis dans la zone non saturée profonde qui peut jouer un rôle important dans le transfert des éléments provenant de la zone de sol occupée par le système racinaire et le toit de la nappe.

L'interface sol végétation

La végétation joue un rôle très important dans les échanges entre le sol et l'atmosphère. Dans un contexte de changement, il est important de bien appréhender la dynamique de la végétation qui va, entre autres, être dépendante des ressources hydrominérales. Leur exploitation est en grande partie liée au développement du système racinaire et au fonctionnement de la rhizosphère pour la mobilisation des éléments minéraux. Des travaux sont menés dans différentes équipes sur la caractérisation de l'architecture racinaire (modélisation, mesure de la biomasse racinaire par des techniques non invasives, impact des stress sur le développement des racines et la colonisation du milieu) et le fonctionnement de la rhizosphère à l'aide du marquage isotopique. Ce dernier permet de mieux comprendre les interactions existantes entre les racines et les bactéries.

Spatialisation et impact de l'organisation spatiale

Nous devons pouvoir caractériser sur des territoires, dont la taille peut aller jusqu'à plusieurs centaines de km², l'ensemble des composantes de l'espace ayant un rôle fonctionnel. Un des enjeux scientifiques est de pouvoir modéliser le fonctionnement de tels territoires. Pour y arriver de nombreuses questions de recherche demeurent ouvertes. Il faut simplifier la représentation conceptuelle des processus pour réduire la taille du champ des variables et des paramètres, mettre en place des méthodologies pour les caractériser sur l'ensemble de l'espace étudiée, décrire le fonctionnement de certaines structures paysagères encore mal connues (relations rivière/nappe, haie, réseaux, bâtiments ...).

2.2.2. Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes

La réponse des populations et des écosystèmes aux changements environnementaux fera intervenir divers processus dans une dynamique complexe: acclimatation/résilience, évolution/maturation, migrations... La prédiction de scénarios d'évolution de la biodiversité demande une connaissance de ces processus et de leur dynamique d'évolution, ainsi qu'une modélisation de leurs interactions.

Le rôle de la diversité spécifique ou fonctionnelle dans la dynamique des écosystèmes et leurs capacités de résilience représente un front scientifique très actif depuis quelques années. Cependant, on ne sait toujours pas exactement dans quelle mesure la biodiversité qui compose un système écologique conditionne son fonctionnement. En fait, deux conceptions, basées surtout sur des résultats expérimentaux effectués en conditions contrôlées, s'opposent :

- l'hypothèse diversité-stabilité considère que toutes les espèces ont des traits de vie propres et que les écosystèmes les plus diversifiés sont susceptibles d'une part, de contenir plus d'espèces qui peuvent compenser la réduction ou la disparition des autres espèces du fait des perturbations et d'autre part de résister davantage aux invasions biologiques;
- l'hypothèse de la redondance des espèces soutient que de nombreuses espèces présentent des attributs vitaux si semblables (espèces redondantes) qu'elles ont un effet identique sur les processus fonctionnels. Dans ce cas, le fonctionnement du système est indépendant de la diversité, dès que les principaux groupes fonctionnels sont présents.

Les résultats des expérimentations effectuées sur des « écosystèmes » artificiels en situation contrôlées ou sur des communautés végétales herbacées *in vivo* suggèrent un effet positif de la diversité spécifique sur le fonctionnement des systèmes étudiés, en particulier une augmentation de la résilience et de la productivité végétale parallèlement à l'accroissement de la richesse en espèces ou en groupes fonctionnels. D'autres travaux indiquent que le lien entre le fonctionnement et le gradient de biodiversité est variable selon les sites, les espèces et les processus pris en compte. Il apparaît de plus en plus que les processus écologiques (productivité et cycles biogéochimiques) sont déterminés principalement par les caractéristiques fonctionnelles et biologiques des organismes considérés plutôt que par leur nombre. Toutefois, il existe vraisemblablement un seuil en deçà duquel une perte supplémentaire en espèces entraînera des modifications profondes du fonctionnement des écosystèmes. Ainsi, les problèmes principaux consistent : (i) à identifier les espèces et les groupes fonctionnels irremplaçables au bon

fonctionnement de l'écosystème, (ii) à examiner s'il existe des situations où ce fonctionnement dépend d'une biodiversité inhabituellement élevée.

Cette recherche de groupes fonctionnels est également un objectif important pour la faune aquatique. Dans ce cas, on s'intéresse à l'ensemble des traits biologiques et écologiques rendant compte des principales caractéristiques et adaptations des espèces. Dans les hydrosystèmes méditerranéens caractérisés par la présence de nombreuses espèces de poissons endémiques, l'utilisation de traits et de guildes fonctionnels permet de fournir une image plus généralisable du fonctionnement des communautés aquatiques (à l'échelle du bassin méditerranéen occidental par exemple) et de tester, par une approche comparative avec les faunes et hydrosystèmes de l'Europe du Nord et de l'Ouest, l'hypothèse d'une plus grande tolérance des espèces méditerranéennes à la variabilité environnementale, d'un plus grand impact des introductions sur les faunes autochtones et de leur forte sensibilité aux ruptures de connectivité (importance des processus de recolonisation). Ce travail débouche également sur la mise au point d'outils d'évaluation de la qualité écologique des hydrosystèmes fluviaux et lenticques basés sur des métriques fonctionnelles et recourant aux techniques les plus récentes de modélisation. La mise en place de base de données géoréférencées couvrant plus de 15 pays et plus de 10000 sites autorise un tel objectif.

Identifier les zones vulnérables pour la biodiversité.

Le littoral méditerranéen et les îles sont soumis depuis plusieurs décennies à une forte pression d'urbanisation. L'étroite concordance géographique des pressions anthropiques et des points chauds de biodiversité conduit à une situation de crise pour cette biodiversité unique. Dans le cadre d'une urbanisation croissante, les milieux naturels et agraires sont exposés à une altération et une fragmentation dont l'intensité entraîne une bio-homogénéisation des paysages et des compositions spécifiques. Cette régression des espaces naturels et agraires au profit des espaces urbains, interroge les acteurs institutionnels en charge des politiques de préventions et de conservation du patrimoine.

Parallèlement, les moyennes montagnes méditerranéennes constituent des zones où la biodiversité se modifie, à la fois par les changements d'usage des terres (conduisant notamment à la mise en friche) et par le changement climatique. A terme, sans possibilité de migrer en altitude ou en latitude (fragmentation), nombre d'écosystèmes et d'espèces sont amenés à disparaître. Mais là encore, les gestionnaires d'espaces naturels disposent de peu d'éléments concrets pour intervenir.

Pour proposer des moyens de réponse nous devons disposer d'un outil intégrant les processus écologiques (observations, expérimentation, modélisation), conditionnant la persistance des espèces, et les phénomènes socio-économiques et politiques, conduisant à la transformation radicale des territoires. L'outil synthétique proposé est désigné sous le terme de vulnérabilité écologique. Il traduit un risque environnemental sous une représentation spatiale, conditionnant la biodiversité et les paysages d'un territoire et qui devrait être utilisé comme critère d'aide à la décision en matière de d'actions d'aménagement. La méthodologie s'organise selon deux échelles d'investigation : (i) globale, associant l'écologie du paysage aux sciences humaines et (ii) locale, visant à évaluer les processus de persistance et de dynamique des espèces et des écosystèmes caractérisant les paysages méditerranéens. Par ailleurs, dans les zones fortement urbanisées tel que le littoral,

l'avenir se joue pour l'urbanisation dans l'optimisation des petits espaces constructibles, pour la protection, dans la sauvegarde des espaces interstitiels, coupures d'urbanisation ou autres. Les documents d'urbanisme doivent « prévoir » des espaces naturels présentant le caractère de coupure d'urbanisation. Il s'agit là d'étudier la compétition entre les composantes du développement durable dans l'application de la loi littorale.

Identifier les zones vulnérables aux incendies

Un premier thème porte sur la connaissance du facteur « végétation » dans le risque d'incendie qui intervient dans l'éclosion et la propagation. En effet, si la caractérisation de l'inflammabilité des végétaux pris isolément a été bien entamée, il n'existe par contre que très peu de travaux sur les végétations en place qui sont souvent plurispécifiques et multi stratifiées. Etablir les liens entre structure, composition, dynamique des végétations et leur inflammabilité et combustibilité reste un enjeu fort pour alimenter efficacement les modèles de propagation de feu et par la suite adapter la gestion des territoires.

2.2.3. Interactions écosystèmes/activités humaines

Les relations homme/nature

Pour appréhender les questions de gestion des écosystèmes et de l'eau, il est nécessaire de se placer dans le cadre plus général de la question des relations que les sociétés humaines entretiennent avec l'environnement physique et naturel au sein duquel elles vivent, dont elles subissent les influences mais aussi qu'elles modèlent en fonction des images qu'elles s'en forment et des usages qu'elles en font.

La notion d'*adaptation* joue donc un rôle clef, tant pour expliquer des évolutions qui se sont produites au fil du temps que pour rendre compte de la diversité des sociétés humaines et de leurs cultures. Dans un cas comme dans l'autre, ces êtres humains, ces groupes sociaux, ont dû et su s'adapter aux potentialités et aux contraintes des milieux dans lesquels se déroule leur existence.

Même si ces réflexions peuvent paraître aujourd'hui quelque peu banales, elles n'en continuent pas moins à poser des questions essentielles, et non résolues, pour la recherche. Si les relations Hommes/Nature doivent être analysées en termes d'interactions, comment produire une connaissance qui puisse rendre compte, fût-ce partiellement, de cette complexité ? Au-delà des nécessaires élaborations théoriques, cela ne peut se faire qu'à travers l'exploration de problèmes concrets et l'étude de terrains clairement délimités. Cela exige également une démarche interdisciplinaire qui associe, sur un pied d'égalité, les sciences de l'homme, les sciences de la vie et de la nature, les disciplines techniques.

Effet de la Réglementation et des politiques publiques

La réglementation et les politiques publiques constituent en soi des objets de recherche, notamment par les chercheurs qui se préoccupent de gouvernance territoriale et de gestion publique. La perception par les décideurs publics des risques étudiés dans cet axe, ainsi que les voies de formation de ces politiques demeurent encore mal connues.

La réglementation et les politiques publiques constituent ensuite des mécanismes de contrainte et d'incitation, qui vont influencer les comportements

économiques et sociaux des entreprises et des particuliers. Les mécanismes d'incitation feront donc l'objet de recherche.

La part croissante des questions liées à l'environnement dans les politiques publiques constitue également un objet de recherche. A travers les exemples étudiés seront analysés les dispositifs et des outils destinés à favoriser la prise en compte de l'environnement. Selon les politiques et les enjeux, on assiste à la multiplication des dispositifs réglementaires, financiers ou contractuels. Entre politique de l'interdit, incitations financières "contractualisées" ou "conditionnalisées" et recours aux mécanismes de marché, il existe actuellement un panel important d'expérimentations aujourd'hui en cours.

Plusieurs pistes de recherche peuvent être ici esquissées :

- la première concerne le poids croissant du droit international et communautaire dans les politiques de protection de la nature. Seront étudiées tant les formes localisées d'application de ces règles que la multiplication des formes d'arbitrage qu'elles impliquent entre échelles de décision.

- La seconde s'intéresse au poids croissant de la conditionnalité environnementale, en particulier dans les politiques européennes (Pac, fonds structurels...) ou nationales (nouveaux Cper, contrats de rivières...).

- La troisième s'intéresse à la production et l'usage des indicateurs écologiques, environnementaux ou plus largement de développement durable dans les politiques publiques et dans les modalités concrètes de gestion des risques environnementaux. Comprendre pourquoi parmi les indicateurs produits par les sciences de l'environnement, certains ont plus de facilité à se transformer en normes et à rentrer concrètement dans le champs de l'action publique constitue un lieu d'échange propice entre disciplines.

- La dernière concerne la spécificité des politiques environnementales et la multiplication des procédures contractuelles. La définition de politiques de protection de l'environnement et de lutte contre les nuisances a induit une remise en cause des logiques administratives sectorielles. Parce que la protection de l'environnement concerne à la fois les grandes industries et le monde agricole, les collectivités locales et les citoyens, elle nécessite de trouver des arènes de négociations plus larges que les simples accords sectoriels, forcément ponctuels et limités quant au public visé.

Analyse de la transformation des politiques publiques

Les années 1990 marquent un tournant dans l'action publique et ses diverses modalités (réglementation, incitations) avec l'intégration de plus en plus poussée d'objectifs écologiques dans les politiques agricoles (écoconditionnalités des aides) et environnementales (normes de qualité et de sécurité). Ce processus « d'écologisation » des politiques nationale et européenne constitue à la fois un objet de recherche émergent dans le champ des sciences sociales dont il renouvelle les cadres théoriques et à la fois le cadre qui oriente les changements de pratiques des acteurs, les usages et les droits d'accès sur l'espace rural. L'articulation entre activités de production au sens large (agriculture, activités cynégétiques et tourisme) dans ces milieux plus ou moins anthropisés a été généralement traitée sous l'angle des *contraintes* que les dernières exercent sur les premières. Sans négliger ces aspects, les recherches privilégient les politiques et actions environnementales qui visent à *associer* les activités agricoles à la conservation, à la gestion, voire à la restauration de qualités, de biens ou de services environnementaux :

sylvopastoralisme et prévention des incendies de forêt, contribution du pastoralisme à la conservation de milieux complexes soumis à embroussaillage, préservation des ressources phytogénétiques 'domestiques'.

Comportements des acteurs vis des mesures environnementales:

Les comportements sont étudiés à la fois dans les sciences économiques, les sciences humaines et les sciences de gestion. Chacune de ces branches des SHS dispose de ses propres modèles de comportement et des méthodes de traitement théorique, empirique et clinique. Les projets entrant dans cet axe permettront de les croiser en même temps que s'effectue le couplage des aspects bio-techniques et sociaux économiques.

Comportement des individus

Trois questions sont posées dans ce domaine : quelles sont la nature et l'étendue de l'information retenue par les individus sur les risques étudiés dans cet axe ? Comment se forment les croyances ? Quels comportements résultent de ces croyances ?

Les sociologues ont classiquement étudiés les attitudes face aux risques et en particulier aux risques environnementaux. Mais on peut aussi faire référence aux travaux de spécialistes de marketing qui concerne les attitudes des consommateurs face aux produits et aux services à partir des perceptions que ceux-ci forment des attitudes des producteurs à l'égard des risques environnementaux.

Comportement des entreprises.

De manière générale le comportement des décideurs d'entreprises face à ces risques est encore moins exploré, bien que de nombreux travaux spécialisés dans les stratégies environnementales des firmes aient été publiés ces dernières années. Lorsqu'on examine ces stratégies, plusieurs questions surgissent :

- Quel degré de conscience et de connaissance les managers ont-ils des effets pervers des activités de l'entreprise ? Quels déterminants expliquent ce degré de conscience selon les entreprises ou les secteurs ?
- Quelles sont les incitations existantes qui poussent à minimiser ou à contrôler ces effets ?
- Quelles stratégies sont mises en œuvre par les entreprises dans ce domaine ?
- L'existence de telles stratégies valorisent-elles ou dévalorisent-elles l'entreprise auprès des marchés financiers ?
- Quels conflits et tensions internes aux entreprises sont générés par la définition et la mise en œuvre de ces stratégies ?

Comportement des agriculteurs

Les justifications environnementales des aides publiques et des contrats appellent un contrôle des performances écologiques des pratiques des acteurs. Ce contrôle ne peut se cantonner à des obligations de moyens : des obligations de résultats appellent l'exercice d'un suivi des processus ou des dynamiques sur lesquels les mesures et les instruments de politique publique visent à intervenir. C'est pourquoi il est nécessaire de mesurer la marge de manœuvre des acteurs et leur capacité à se saisir de ces alternatives ou de ces productions environnementales. Il s'agit plus particulièrement d'évaluer comment ces mesures

peuvent se caler dans les dispositifs de production des acteurs agricoles d'une part et, d'autre part, de mettre au point des outils d'accompagnement des transformations de l'agriculture et des territoires ruraux en favorisant la conception et l'évaluation des systèmes techniques par les acteurs eux-mêmes.

Mécanismes incitatifs et gestion des effets externes

Les économistes englobent sous le terme générique « d'effet externe » (*externality*) toute « transaction » involontaire ou forcée entre deux agents économiques (ce peut-être une nuisance autant qu'une bienfaisance). Ces effets ne sont pas spontanément « internalisés » par un « marché » sur lequel se fixe le prix de cette transaction. Les exemples sont multiples : les automobilistes qui empruntent l'autoroute qui traverse la ville n'achètent pas sur un marché le droit d'émettre du bruit auprès des habitants des cités qui jouxtent les voies. L'usine qui refroidit ses installations par l'eau d'une rivière n'achète pas auprès des pêcheurs le droit de modifier l'équilibre des populations piscicoles etc.

Certaines interactions sont suffisamment « mesurables pour qu'un marché voit le jour qui « internalise » ces effets externes. Le cas classique est le marché des droits à pollution qui fait l'objet d'un volume important de travaux théoriques et empiriques en finance et qui peut donner lieu à des recherches en PACA.

Mais d'autres interactions ne sont pas encore mesurables avec précision mais peuvent le devenir au fur et à mesure que se forment les théories de l'interaction entre une activité et une modification de l'environnement et que l'industrie des capteurs se perfectionne pour mettre en œuvre cette théorie, comme cela a été le cas pour les émissions de CO₂. On ne peut construire des mécanismes incitatifs que sur la base de modèles relatifs à la bio-diversité, aux écosystèmes et aux transferts. Il faut en effet aboutir à des mesures.

Couplage des aspects bio-techniques et socio-économiques

La gestion de l'eau, qui est une des questions clé de l'axe 2, ne peut se traiter que sur le plan technique. Les aspects de management et d'économie sont également importants: d'abord pour l'étude de la tarification et en particulier de ses effets incitatifs, ensuite pour l'étude des contrats d'utilisation de la ressource qui peuvent être très naturellement envisagés selon la riche théorie des contrats en économie. On verra de plus en plus émerger en matière de fourniture d'eau des contrats à terme et des contrats d'options et des marchés financiers pour les échanger.

On peut également s'interroger sur les modèles de production agricole. L'articulation entre action publique, actes techniques et dynamiques écologiques qui définit le processus d'écologisation nécessite de raisonner en terme de « modèles de production » pris au sens de « prototypes » d'agriculture ou de techniques alternatives. Un enjeu pour les années à venir sera d'investir la question de la gestion de la biodiversité – sauvage mais aussi domestique - dans des espaces de production plus ordinaires, davantage soumis à des impératifs de compétitivité et de rémunération par le marché. L'objectif est d'explorer et de tester des alternatives techniques dans un contexte d'instabilité des connaissances et de forte incertitude sur les dispositifs de politique publique. En particulier, il s'agit d'évaluer comment ces propositions biotechniques peuvent se caler dans des dispositifs institutionnels (normes, mesures) et trouver une valorisation économique passant ou non par le marché (labellisation, certification, bonne utilisation des aides).

Le management de la prévention incendie aussi bien que celui de l'intervention est depuis longtemps un objet d'étude de spécialistes des théories et pratiques des organisations (une thèse est en cours sur le sujet au CEROG-IAE).

Interdisciplinarité et synergies scientifiques

Au delà de ce type de contribution des SHS dans le domaine normatif, on peut imaginer des échanges interdisciplinaires dans la connaissance scientifique elle-même. Un exemple en est fourni par l'étude de la biodiversité. La coexistence des espèces est un phénomène de type concurrentiel que les économistes et les gestionnaires ont l'habitude de considérer : à cet effet, ils utilisent fréquemment le cadre de la théorie des jeux (on peut recenser au moins sept prix Nobel d'économie récents dont les travaux se rapportent à ce champ). Or depuis quelques années, la théorie des jeux est utilisée de façon intensive dans certaines recherches concernant l'évolution et la concurrence des espèces. La rationalité des acteurs introduite par les économistes est ici remplacée par des conduites d'espèces dictées par la sélection naturelle. Une collaboration des chercheurs en théorie des jeux (que l'on trouve principalement chez les économistes et gestionnaires) et des chercheurs en écologie peut être fructueuse.

2.3. Le dispositif de recherche

Pour répondre de manière pertinente aux questions soulevées par les enjeux sociétaux, la fédération de recherche peut s'appuyer sur des compétences d'une quinzaine de laboratoires dans les disciplines telles que les sciences du sol, la bioclimatologie, l'hydrologie, l'écologie, la chimie de l'environnement, l'agronomie, la sociologie, l'anthropologie ou l'économie. La plupart des laboratoires impliqués ont déjà collaborés dans le cadre de l'IFR PMSE qui a joué un rôle très positif dans la mise en place de nouveaux programmes transversaux. Enfin la fédération de recherche pourra bénéficier d'un certain nombre de plateaux techniques, incluant des plateformes analytiques et des dispositifs expérimentaux fortement instrumentés. Par ailleurs, les laboratoires gèrent un certain nombre de sites d'observation couvrant des échelles variées localisés pour la plupart dans la région PACA. La fédération de recherche devra jouer un rôle de coordination et de structuration afin de développer des synergies, mutualiser les données et faciliter l'accès aux données.

2.3.1. Les laboratoires et leur compétences

Unité de Recherche	Compétences	Taille *
CEMAGREF- EMAX	Risque incendie Restauration et gestion des écosystèmes dégradés	10
CEMAGREF – HYAX	État écologique des hydrosystèmes, Analyses des réponses biologiques aux altérations des milieux et de leur environnement ; Impacts potentiels du changement climatiques sur la distribution et les stratégies démographiques des espèces piscicoles ;	15
CEMAGREF –OHAX	Performance et sécurité des ouvrages hydrauliques Hydrologie des crues et des étiages	
CEMAGREF IRAX	Irrigation	
IMEP	Organisation et dynamique de la biodiversité Aspects évolutifs et fonctionnels de la biodiversité	80

	Impact des activités humaines sur les écosystèmes et les espèces (vulnérabilité, fragmentation, isolement, invasions biologiques) Conséquences des changements des modes d'usage des terres sur les écosystèmes terrestres et leur biodiversité État écologique et évolution des hydrosystèmes Conséquences écologiques des incendies impact sur les écosystèmes des polluants chimiques et des épandages de boues de stations d'épuration Restauration et gestion des écosystèmes dégradés	
<i>INRA- GSE</i>	Géochimie des sols et des eaux	5
<i>INRA URFM</i>	Modélisation du feu, effet sur les arbres, prévention Dynamique de la biodiversité des écosystèmes forestiers Fonctionnement écophysio-écologique des forêts mixtes (écologie, écophysio-écologie, génétique, physique, statistique)	37
<i>INRA/UAPV CSE et Laboratoire d'hydrogéologie</i>	Impact des pratiques agricoles sur les nappes Impact du changement global sur la production agricole Épandage de déchet sur les sols (science du sol, agronomie, bioclimatologie, télédétection, hydrogéologie, physique, modélisation)	30
<i>INRA -ECODEV</i>	Relations entre activités agricoles et actions environnementales (protection et production de biodiversité en particulier). - Intégration d'objectifs et de justifications environnementales (« écologisation ») des politiques publiques - Modèles de production pour l'écologisation de l'agriculture - Mise au point d'outils d'accompagnement des transformations de l'agriculture en situation d'écologisation) (écologie, agronomie, zootechnie, économie, sociologie, anthropologie)	13
<i>INRA BIOMETRIE</i>	géostatistique, statistique spatiale, modélisation stochastique.	4
<i>UMR 406 (INRA/UAPV) Ecologie des invertébrés</i>	- Impact des activités humaines et du contexte paysager sur la biodiversité des pollinisateurs et leur activité pollinisatrice Ecologie fonctionnelle des pollinisateurs. - Impacts des polluants agricoles sur les invertébrés. Effets délétères chroniques à très faibles niveaux d'exposition, interactions entre les toxiques, modes d'action des pesticides. - Interactions sociales chez les abeilles. Modifications et évolutions de ces interactions du niveau moléculaire au niveau populationnel. Invasions et pathologies de l'abeille. Conservation de la biodiversité.	11
<i>INRA AgroClim</i>	Gestion base de données; Etudes d'impact du changement climatique sur les agrosystèmes Modélisation des cultures et des systèmes de culture	11
<i>CEREGE - ECM</i>	Modélisation écophysio-écologique de la croissance des arbres et vulnérabilité aux changements climatiques	6
<i>DEVIM</i>	Traçage isotopique des échanges plantes-bactéries-sol dans la rhizosphère	3
LPED (Laboratoire Population-Environnement-Développement). UMR 151 (IRD/UP)	- Production de connaissances pour une meilleure compréhension des interactions entre dynamiques sociales et dynamiques écologiques. - Expériences comparées (France/PACA, Maghreb, Afrique subsaharienne, Cône sud de l'Amérique Latine) en matière de diagnostic de la biodiversité, d'usage, d'appropriation et de gestion des ressources naturelles. - Aide à la décision pour une co-viabilité sociétale et environnementale des modèles de développement. 75% des effectifs sont rattachés aux SHS (démographie, sociologie, géographie)	42

CEROG – CESMAP, EA 2188 (IAE et IMPGT)	Mécanismes d'incitation et de marchés et effets sur les risques Politiques environnementales publiques Comportement des individus devant les risques Stratégies environnementales des entreprises Théorie des jeux Econométrie	3
UMR ESPACE	Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes Maîtrise de l'eau	1
IAR (CIRTA)	Urbanisme, aménagement du territoire, PAC, biodiversité	12
CAE EA8098, Faculté d'Economie UIII	Droits de propriété et environnement ; littoral et ressources marines	
UMR 6181 + coopération internationale REC-04-Taganrog (Russie)	Hydrodynamique des plans d'eau avec fort gradient de température en milieu côtier (courant, salinité, température) ; Pollution secondaire due à la remise en suspension des sédiments de fond par les courants ; Développement de modèles bio-géo-chimiques couplés avec l'hydrodynamique 3D dans les écosystèmes côtiers (courant, salinité, température, oxygène dissous, advection-diffusion-réaction) ; prédiction de zones d'hypoxie ; prédiction de zones prolifération de planctons Modélisation, simulation et expérimentation in situ (Etang de Berre, plage du Jaï, Etang de Bolmon, Golfe de Fos),; similitude des risques environnementaux ; similitude des remédiations par voie hydrodynamique.	5 + 4 permanents Russes
LCE (FRE2704), Equipe Chimie de l'Environnement Terrestre	Réactivité, mécanismes de transfert et de transport de composés chimiques naturels ou d'origine anthropique dans différents milieux (eaux, sols, déchets) ; Modélisation spatialisée des transferts de masse ; Développement de procédures et d'outils analytiques adaptés aux études environnementales sur site.	7
CERIC	Droit international lié aux problèmes de biodiversité	10

2.3.2. Une structuration issue de l'IFR PMSE

L'IFR PMSE a permis la constitution et le renforcement de sites expérimentaux et de plateaux techniques. Ceux-ci font partie de la liste donnée dans le paragraphe suivant. L'IFR a également permis d'initier des projets nouveaux impliquant plusieurs Unités et s'inscrivant bien dans l'axe de l'IFR. Dans ce cadre il convient de citer le projet IRISE dont l'objectif est d'évaluer les conséquences écologiques d'un incendie de forêt et la dynamique de résilience des zones affectées. D'autres projets plus ciblés sont également à mettre à l'actif de l'IFR tels que :

- impact du changement climatique sur la forêt méditerranéenne 2002-2007 (IMEP-CEMAGREF);
- flux d'eau d'infiltration et de recharge de la nappe 2004 2005 (CEREGE, UMR CSE);
- réactivité des matières organiques 2004 2005 (UMR CSE, LCE);
- couplage microbiologie géochimie (UMR CSE, LCE).

Ces projets démontrent la capacité des laboratoires de la Fédération de recherche à se mobiliser sur des projets multidisciplinaires et devrait permettre la constitution de réseaux permettant d'initier d'autres actions.

2.3.3. Les plateaux techniques et les sites de mesure

Les plateaux techniques

- *Plateau flux Avignon* : Ce site est composé de deux installations expérimentales. La première est dédiée aux activités de télédétection en lien avec les flux dans le système sol plante atmosphère. Le site est composé d'une grue permettant de supporter des instruments télédétection et de les placer dans des configurations géométriques variées. Il contient un site pérenne de mesure des flux de surface (eau, énergie, CO₂) et de la teneur en eau des sols. Une des originalités de ce site est la continuité des mesures qui est rarement réalisée dans le cas des surfaces cultivées marquées par des interventions techniques régulières. Une seconde installation est dédiée aux flux vers la nappe. L'installation contient un lysimètre permettant de collecter les eaux de drainage sous un massif de sol de 2*3*3m. Ce site est également composé d'un réseau dense de piézomètre permettant de caractériser finement la variabilité spatiale de la nappe.
- *Stations de mesures en forêt Lamanon et Font-Blanche* : Ces deux stations mesurent en continu les paramètres écophysiologiques liés à la croissance des arbres, des variables micrométéorologiques, les flux de CO₂ (tour), la croissance en continu, fonctionnement hydraulique du complexe sol-arbre. Le site de Lamanon est représentatif d'une de la forêt mélangée taillis de chêne vert - futaie de pin d'Alep et fonctionne depuis 2002. Il est géré par l'INRA-URFM. Le site de Font-Blanche est en cours de construction. Il a été financé par l'IFR-PMSE. Il sera représentatif d'une forêt mélangée chêne vert pin d'Alep. Il devrait être opérationnel au printemps 2007. Il est le fruit d'une collaboration CEREGE, IMEP et INRA-URFM. D'autres mesures, comme celles des composés organiques volatiles pourront être ajoutées.
- *Laboratoire de caractérisation hydrodynamique (Avignon)* : Ce laboratoire permet de mesurer les paramètres hydrodynamiques de base.
- *Plateforme aéroportée*. Elle est composée d'une caméra 6 bandes spectrales dans le visible et le proche infra-rouge ainsi que d'une caméra infra-rouge thermique pour la mesure de la température de surface. La plateforme est conçue pour être installée sur un avion de tourisme de type CESSNA ou accroché à un ballon captif. Ce dernier est également équipé d'un dispositif de sondage permettant de recueillir les caractéristiques atmosphériques jusqu'à 300 mètres.

Les sites d'observation

- *Stations de mesures en forêt Lamanon et Font-Blanche* : Ces deux stations mesurent en continu les paramètres écophysiologiques liés à la croissance des arbres, des variables micrométéorologiques, les flux de CO₂ (tour), la croissance en continu, fonctionnement hydraulique du complexe sol-arbre. Le site de Lamanon est représentatif d'une de la forêt mélangée taillis de chêne vert - futaie de pin d'Alep et fonctionne depuis 2002. Il est géré par l'INRA-URFM. Le site de Font-Blanche est en cours de construction. Il a été financé par l'IFR-PMSE. Il sera représentatif d'une forêt mélangée chêne vert pin d'Alep. Il devrait être opérationnel au printemps 2007. Il est le fruit d'une collaboration CEREGE, IMEP et INRA-URFM. D'autres mesures, comme celles des composés organiques volatiles pourront être ajoutées.

- *Comtat Venaissin* : Ce site classé zone vulnérable est suivi pour caractériser les interactions entre activités agricoles et la qualité des eaux de nappes (nappes superficielles et nappes miocène)
- *Massif des Maures* : plusieurs placettes permanentes destinées au suivi de la végétation, de la régénération forestière suite à différents régimes de feu.
- *Ste Baume* : site de mesure composé de placettes de dendro-écologie disposées selon un gradient altitudinal et utilisées pour l'étude des épisodes climatiques secs sur la croissance du pin d'Alep et pin sylvestre.
- *Mont Ventoux* : Site pilote pour l'étude des conséquences écologiques liées aux changements globaux, en raison d'une grande diversité de situations écologiques et climatiques, de sa situation d'île biogéographique et de territoire pilote (Réserve de Biosphère MAB Unesco) ayant fait l'objet de nombreux suivis biologiques. En raison du gradient climatique présent sur une échelle relativement restreinte, ce site constitue un territoire majeur pour tester in situ les réponses des communautés et espèces aux changements globaux.
- *Luberon* : Ce site intégré à un Parc Naturel Régional et dans une Réserve de Biosphère MAB Unesco est suivi notamment dans le cadre de recherches liées à l'impact des pratiques agricoles sur la biodiversité (ex. cas des espèces messicoles et des pollinisateurs) et sur les conséquences écologiques des évolutions socio-économiques (fragmentation et péri-urbanisation, déprise agricole et abandon des pratiques sylvo-pastorales) dans les arrières-pays méditerranéens.
- *Iles de Provence* : ces îles, en particulier les archipels du Frioul et de Riou (Marseille) et l'archipel hyérois (dont le Parc National de Port-Cros), font l'objet depuis de nombreuses années, de recherches portant sur les dynamiques écologiques en situation insulaire et sur les conséquences de déséquilibres biotiques induits par la présence d'espèces introduites et à caractère envahissant ou d'espèces indigènes mais proliférantes (goélands), dans une optique de biologie de la conservation des écosystèmes et des espèces rares et endémiques.
- *Plaine de Crau* : cette pseudo-steppe unique en France est étudiée dans le cadre de recherches en biologie de la conservation et en paléoécologie concernant des communautés végétales dégradées par des pratiques agricoles anciennes ; elles se basent sur des approches expérimentales et fonctionnelles d'écologie de la restauration portant sur le rôle d'espèces structurantes de cet écosystème soumis à de très fortes contraintes environnementales et à des impacts anthropiques très anciens.
- *Massifs littoraux péri-marseillais* : ces massifs, notamment les Calanques de Marseille et Cassis, présentent l'intérêt d'une situation très nette d'interface entre « milieux naturels » et milieux anthropisés, ce qui permet d'étudier les multiples aspects liés à la vulnérabilité des écosystèmes et des populations animales ou végétales du littoral méditerranéen.
- *Haut bassin de l'Arc provençal* : Ce site est suivi sur un plan hydroécologique depuis l'hiver 2000-2003 au titre d'une action du SAGE ARC. Il mobilise trois équipes de l'IFR (Cemagref-HYAX, IMEP-E2M2 et Université de Provence-LCE). Les enjeux sont d'apporter des éléments de réflexion aux acteurs du SAGE en matière de définition des objectifs de gestion et de référence écologique (au sens DCE). La démarche est particulièrement attendue dans ce type de réseau

hydrographique où les assecs estivaux sont la norme, et où l'interaction des pressions agricoles et urbaines est permanente. Les soutiens financiers sont apportés par le CG13, l'AE RM&C et le CR PACA.

- *La Moyenne Durance de l'Escale jusqu'à Cadarache* : un suivi éco-géomorphologique est en cours pour la définition des débits réservés. Le but est de satisfaire davantage les besoins du milieu tout en préservant le mieux possible l'énergie renouvelable produite par les aménagements hydroélectriques, c'est un élément majeur du nouvel équilibre recherché pour la Durance par l'ensemble des acteurs qui se sont engagés dans cette démarche (EDF, CSP, DRIREN PACA, Agence de l'Eau, SMAVD, MRE,...). Un travail pluridisciplinaire est en cours avec notamment le Laboratoire EGEE de l'Université Aix Marseille I et deux équipes de l'IFR PMSE : Cemagref-HYAX et IMEP-E2M2.

- *les systèmes lagunaires : Etang de Berre, plage du Jai, Etang de Bolmon, Golfe de Fos et mer d'Azov* : Sur ces sites une caractérisation hydrodynamique, hydrochimique et biologique est réalisée dans le but de prévenir des risques environnementaux tels que l'hypoxie, la prolifération d'algues ou l'érosion. Ces sites présentent des similitudes et la collaboration avec les collègues Russes dans le domaine de la modélisation est particulièrement fructueuse. L'objectif sur ces sites est de développer des outils de compréhension qui permettront de proposer des moyens d'actions. Pour cela une base de données est mise en place pour étayer le développement d'un modèle numérique 3D précis permettant de prévoir l'hydrodynamique et la thermique des masses d'eau, la dynamique des vagues de vent ainsi que leur propagation et le déferlement et la remise en suspension et le transport des sédiments du fond en tenant compte de la bathymétrie spécifique. Par ailleurs, un modèle biogéochimique est développé pour appréhender les cycles biogéochimiques des substances polluantes (composés d'azote, de phosphore, etc.), ainsi que le développement des phyto- et zoo-planctons.

2.4. Les axes de recherches

Les axes qui sont définis ne couvrent pas de manière exhaustive l'activité des laboratoires. Ils ont pour vocation de focaliser les activités de la fédération de recherche sur quelques questions prioritaires qui permettent de répondre aux questions identifiées dans les enjeux sociétaux. Les actions données dans la suite correspondent aux préoccupations actuelles des membres des laboratoires. Certaines de ces actions s'inscrivent dans le cadre des projets mobilisateurs, mis œuvre au sein de la fédération de recherche, qui viseront à traiter des enjeux sociétaux pouvant mobiliser les compétences de plusieurs axes. Nous listons ici les projets ou composantes de projet qui relèvent plus spécifiquement de l'axe 2.

2.4.1. Gestion de la biodiversité

Conserver la biodiversité face aux changements environnementaux actuels représente l'un des principaux défis à l'échelle planétaire. Cette tâche semble encore exacerbée en région méditerranéenne, véritable écotone biogéographique et bioclimatique entre les régions européenne, saharienne et irano-touranienne. En effet, plusieurs scénarios d'évolution de la biodiversité mondiale indiquent que le bassin méditerranéen constitue l'une des écorégions devant subir les changements les plus drastiques de biodiversité à l'aube de l'an 2100, en raison de l'action synergique de divers paramètres-clés : changements des modes d'usage des terres,

modifications climatiques, augmentation des dépôts d'azote atmosphérique et de CO₂ atmosphérique.

Certes, les fluctuations environnementales drastiques sont plus la règle que l'exception sous bioclimat méditerranéen, et elles déterminent en grande partie l'organisation et la dynamique des systèmes écologiques, maintenus par des conditions de non-équilibre. On peut donc arguer que les écosystèmes et les espèces ont subi depuis la mise en place du climat méditerranéen de tels forçages climatiques et anthropiques que les composantes biotiques actuelles, héritées d'un long filtrage, seront finalement aptes à « faire face » aux changements environnementaux en cours. Pourtant, nous manquons de recul et de résultats tangibles pour prévoir et connaître l'adaptabilité des communautés et des espèces méditerranéennes face aux variations actuelles de l'environnement. Le point crucial réside surtout dans la rapidité de ces modifications, probablement sans commune mesure par rapport aux précédentes crises d'extinction qui ont jalonné l'histoire de la terre. Pour les cours d'eau, la généralisation de conditions d'étiages sévères allant jusqu'à l'assec va rendre encore plus cruciale la question de la recolonisation des milieux lors des remises en eaux automnales et de la connectivité entre les différents éléments du réseau hydrographique

Parmi les relations entre biodiversité et fonctionnement d'un ou des écosystèmes, la plus controversée reste l'effet de la biodiversité sur la productivité. Ainsi, certains auteurs montrent un impact positif de la diversité sur la productivité alors que d'autres réfutent ces résultats.

Quatre hypothèses sont émises pour expliquer l'influence de la diversité sur la productivité parmi lesquelles la « complémentarité » ou la différence entre espèces concernant la niche écologique occupée ou les ressources nécessaires à leur développement.

La relation entre la diversité et la productivité reste peut-être difficile à établir en utilisant, comme mesure de la diversité, des critères taxinomiques qui ne tiennent pas compte des caractéristiques des espèces et de leur complémentarité. La notion de diversité fonctionnelle a donc été introduite et un consensus croissant apparaît concernant l'influence de la diversité fonctionnelle sur le fonctionnement de l'écosystème.

C'est en intégrant les traits, les caractères et les fonctions des espèces constitutives de la faune pollinisatrice (programme intégré européen ALARM - Assessing Large-scale environmental Risks for biodiversity with tested Methods; <http://www.alarmproject.net>) et de l'ichtyofaune que leur complémentarité sera explorée. Une diversité fonctionnelle élevée devrait théoriquement être corrélée à une plus grande stabilité, résilience et productivité de l'écosystème. Si la notion de diversité fonctionnelle est bien intégrée en écologie végétale, peu de travaux en font état en écologie animale, surtout sur les poissons.

Dans cette analyse des relations entre diversité fonctionnelle et fonctionnement des systèmes, on s'interrogera sur le rôle des espèces introduites. Est-ce que ces espèces introduites partagent des niches avec les espèces autochtones ? Est-ce qu'elles occupent des niches laissées vacantes ou au contraire peuvent-elles être à l'origine d'une exclusion compétitive d'espèces autochtone ? Quels scénarios sont envisageables compte tenu de leur adaptabilité et de leurs exigences écologiques ?

Des axes fédérateurs de recherche doivent ainsi émerger entre les diverses équipes de la FR ECCOREV afin de mettre en commun leurs questionnements et

leurs approches sur des sites expérimentaux partagés qui permettront de mieux analyser les conséquences écologiques de ces changements, et leurs répercussions socio-économiques.

Organisation et évolution de la biodiversité.

L'origine de la forte biodiversité méditerranéenne et son évolution sont à rechercher (i) au niveau des processus adaptatifs locaux, en particulier le rôle des stress environnementaux et (ii) au niveau des processus macroécologiques s'inscrivant à des échelles spatiales et temporelles bien plus vastes. Si les divers épisodes paléoclimatiques ont fortement influencé les patrons actuels de diversité génétique et de répartition des espèces rares ou endémiques, ce sont les processus locaux de dispersion et d'adaptation dans des environnements hétérogènes qui expliquent la structure et la dynamique des principaux écosystèmes dans un paysage. De plus, l'ancienneté de l'impact humain en Méditerranée a eu de profondes conséquences sur l'organisation des paysages et la diversité des écosystèmes.

Malgré de nombreuses études de modélisation fondées sur des approches écologiques (successions, communautés), écophysiologiques ou mixtes, comprendre la dynamique des écosystèmes reste un axe fort de recherche, notamment en ce qui concerne les interactions entre les processus démographiques (survie, croissance/compétition, fécondité, dispersion), les flux de gènes et l'impact des changements environnementaux, dans un contexte d'interventions humaines plus ou moins intenses.

A ce titre, les approches expérimentales et de modélisation qui couplent processus génétiques et processus démographiques sont particulièrement pertinentes pour analyser la dynamique et la vulnérabilité des écosystèmes et des espèces, ainsi que leurs capacités de maintien dans les écosystèmes hétérogènes et perturbés de la région méditerranéenne.

Enfin, les confrontations entre diversité génétique et diversité spécifique apparaissent aussi comme un axe scientifique émergeant et à étudier, car la connaissance des patrons et processus à l'origine de la structuration de ces diversités reste largement méconnue en régions tempérée et méditerranéenne.

Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes.

Dans l'optique de mieux cerner les liens entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes, différentes approches seront conduites, notamment au niveau des communautés végétales, animales (faune pollinisatrice) et des communautés microbiennes des sols.

Afin de dégager plus clairement, les relations entre régimes de perturbations et biodiversité, il importe de s'intéresser de plus en plus aux espèces clés d'un écosystème donné. Les principaux objectifs de ces recherches seront donc d'appréhender la dynamique de la biodiversité des écosystèmes « naturels » et « semi-naturels » face aux régimes de perturbations (feux et gestion en ce qui concerne la forêt, par exemple) en s'attachant particulièrement aux rôles des espèces clés de voûte ou espèces structurantes de l'écosystème. Les méthodes basées sur l'expérimentation et la modélisation faisant appel aux approches démographiques et génétiques propres à l'écologie évolutive tiendront là une place déterminante. Les processus clefs pour la dynamique des écosystèmes, allant de la production de gamètes, à la dispersion des diaspores et à l'installation des jeunes

(pollen, pollinisation, fécondation, dispersion des graines et recrutement des semis chez les plantes) seront particulièrement étudiés. Après identification des perturbations majeures, de leurs impacts sur la biodiversité et sur les caractéristiques de l'habitat (climat, sol), les résultats seront ensuite appliqués à la restauration écologique des écosystèmes dégradés avec la manipulation (semis, transplants) des espèces responsables de la structuration des communautés. Ces travaux sont déjà initiés sur l'écosystème de pelouses sèches semi-naturelles de la plaine de Crau (Bouches-du-Rhône) où les impacts des cultures ont clairement été identifiés sur la végétation actuelle. La réussite des opérations de semis et transplantations des espèces structurantes devrait permettre de mieux cerner les seuils d'irréversibilité qui empêchent l'auto-restauration de l'écosystème dégradé.

Pour l'étude du rôle de la diversité microbienne des sols, l'objectif principal est de préciser les facteurs biotiques et abiotiques qui modulent cette biodiversité et d'estimer les implications de cette diversité dans le contrôle de la stabilité des écosystèmes terrestres. Les travaux menés sur cette thématique consisteront à :

- (i) évaluer les relations fonctionnelles qui s'établissent entre la formation de communautés microbiennes diversifiées, la structuration physico-chimique du milieu, et la dynamique de la végétation.
- (ii) étudier le rôle de la diversité microbienne (taxinomique et fonctionnelle) et de l'hétérogénéité des écosystèmes terrestres dans la récupération fonctionnelle des sols soumis à des perturbations (résistance et résilience).
- (iii) établir l'importance de la plasticité métabolique dans la capacité des micro-organismes à recoloniser des milieux appauvris après perturbation et dans la récupération des fonctions des milieux.
- (iv) analyser les cibles microbiologiques et les niveaux d'action (cellules, populations, communautés, diversité, fonctions) des composés métaboliques secondaires végétaux dans le contrôle de la diversité microbienne et la dynamique des cycles du carbone et de l'azote.

La connaissance des interactions activités anthropique/biodiversité/fonction peut permettre de mieux cerner certains impacts sur la production ou être exploité pour la définition d'indicateurs. Par exemple avec les écosystèmes cultivés, la compréhension de l'impact des polluants agricoles à la fois sur l'environnement et l'agro-écosystème peut être abordée en choisissant des espèces modèles d'intérêt agro-environnemental. Deux espèces, appartenant respectivement au compartiment sol et terrestre/aérien paraissent particulièrement pertinentes, le ver de terre et l'abeille. Ces espèces représentent des organismes modèles dans les procédures européennes d'enregistrement des pesticides (91/414/CEE et 96/12/CE). Le ver de terre intervient dans les phénomènes de décompactage des sols, d'activation de la biomasse tellurique, dans la mobilisation de la matière organique ainsi que dans les phénomènes de transfert de fluides, de gaz et de substances dans les sols. L'abeille constitue le pilier d'une branche de l'agriculture, l'apiculture, et permet l'apport de revenus substantiels aux agriculteurs par la production de produits à haute valeur ajoutée tels que le miel, la gelée royale, la cire, le pollen et la propolis. Par son activité pollinisatrice, elle permet une amélioration des rendements quantitatifs et qualitatifs des productions végétales. Enfin, au niveau environnemental, l'abeille représente un indicateur de haute sensibilité de la qualité de l'environnement. L'atteinte des populations d'abeilles (les apidés, incluant l'abeille domestique), a des répercussions dramatiques sur la biodiversité et la production végétales. Le maintien

de plus de 80% des espèces végétales dépend directement de l'activité pollinisatrice des 20.000 espèces d'abeilles sauvages dont 2500 sont recensés en Europe et 1000 en France. Il est donc légitime de s'interroger sur la possibilité d'un point critique à partir duquel le déclin des populations d'abeilles s'auto-entretiendrait simplement par les impacts qu'il a sur la biodiversité végétale.

Préservation et restauration de la biodiversité.

Cette biodiversité méditerranéenne unique se concentre dans certains secteurs privilégiés (îles, massifs montagneux) et en particulier dans les zones refuges, territoires où des populations végétales ou animales ont pu persister durant les épisodes glaciaires-interglaciaires du Pléistocène. Les fortes hétérogénéités topographiques et climatiques de la région méditerranéenne ont ainsi permis à bon nombre d'espèces de trouver un habitat favorable lors des changements climatiques. Les travaux récents montrent toute l'importance de ces zones refuges pour expliquer l'organisation et l'originalité de la biodiversité méditerranéenne actuelle.

Deux principales hypothèses, issues de la confrontation des données moléculaires et paléoécologiques, peuvent expliquer la recolonisation post-glaciaire des régions englacées par les espèces et la végétation tempérées : (i) l'hypothèse des nunataks, zones refuges localisées in situ dans les espaces englacés, et (ii) l'hypothèse de la tabula rasa selon laquelle les espèces végétales auraient migré dans des régions chaudes en périphérie des lieux recouverts de glace, le plus souvent situées en position méridionale. Une meilleure compréhension des capacités de maintien in situ ou de migration des espèces et des écosystèmes lors des divers épisodes climatiques, et tout particulièrement durant le réchauffement climatique majeur post-glaciaire, permettrait d'envisager plus finement les scénarios de « réorganisation biotique » et d'évolution des écosystèmes actuels face au changement global. La mise en place d'approches confrontant les données paléoécologiques et génétiques (phylogéographie) et les caractéristiques écologiques et biologiques des espèces clés de voûte devrait aboutir à une connaissance plus approfondie de la réactivité future des espèces et des communautés face à ces changements, en allant au-delà de la simple réaction des espèces en fonction de leur « enveloppe bioclimatique globale ».

Par ailleurs, les confrontations effectuées entre la localisation des zones refuges du bassin méditerranéen et les niveaux d'anthropisation ont montré de grandes similitudes : ces refuges, hauts lieux de biodiversité, font partie des territoires les plus menacés par l'anthropisation, car ils sont soumis dans l'ensemble à des pressions démographiques supérieures à la moyenne. Les correspondances entre la répartition humaine et celle des zones refuges pourraient s'expliquer en partie par la co-variation de divers facteurs : hétérogénéité et complexité des paysages, productivité des habitats et stabilité climatique.

Face à l'ampleur et à la croissance des menaces anthropiques, une politique intégrative de gestion de la biodiversité s'impose donc avec urgence, car les distorsions entre les pertes d'habitats et leur niveau de protection sont, en région méditerranéenne, parmi les plus fortes au monde. Une confrontation régionale plus fine entre, d'une part les *hotspots* de biodiversité (génétique et spécifique) et les zones refuges, et d'autre part les niveaux d'anthropisation-fragmentation et le réseau actuel des aires protégées, devrait permettre : (i) d'identifier plus finement les secteurs de haute biodiversité méditerranéenne à conserver prioritairement. En parallèle, les études portant sur le fonctionnement des écosystèmes et leur

biodiversité conduiront à cerner avec plus d'acuité les réponses des communautés vivantes aux différentes perturbations exogènes, et les réactions des espèces en fonction de leurs traits d'histoire de vie propres et de leur réseau d'interactions biotiques.

De même, la maîtrise des interactions entre les faunes des cours d'eau et des plans d'eau artificiels seront des éléments majeurs de la gestion future des milieux aquatiques méditerranéens. Le bassin de la Durance apparaît comme un site de premier ordre pour le développement d'un tel projet.

2.4.2. Gestion des ressources en eau

Pour aborder la gestion des ressources en eau, nous souhaitons faire émerger des projets transversaux permettant de considérer les transferts de masse et d'énergie dans le milieu, les interactions entre écosystèmes et ressources en eau, les actes techniques associés à la gestion du milieu et les aspects sociaux/économiques. Pour cela nous devons mettre en place des projets transversaux autour de questions concrètes et ciblées. Celles-ci pourraient être les suivantes.

Préservation les eaux souterraines dans le cas des cultures méditerranéennes irriguées

Il s'agit de prendre cette question dans son ensemble en considérant à la fois les aspects biotechniques (itinéraires techniques, leur impact sur les flux de recharge des aquifères), économiques (définition de systèmes de culture économiquement viables), sociaux (adhésion des acteurs aux évolutions proposées) et réglementaires. De tels travaux pourraient conduire à des opérations pilotes et à la mise en place d'outils d'aide à la décision.

Préservation de la qualité des systèmes lagunaires

Le but est d'étudier par des modèles 3D hydrodynamiques et hydro-physiques (salinité, température, suspensions), couplés avec les cycles bio-géo-chimiques des substances polluantes, quelques-uns des risques environnementaux déjà bien identifiés dans cet écosystème (hypoxie, choc halin, prolifération d'algues, érosion), dont la complexité vient en grande partie de son état saumâtre, et pour lequel des solutions de remédiation pourraient être envisagées par voie hydrodynamique. Un travail pluridisciplinaire est en cours avec les spécialistes du REC-04 qui travaillent depuis plusieurs années sur l'écosystème de la mer d'Azov qui présente les mêmes types de risques environnementaux (hypoxie, prolifération d'algues, érosion), et dont la configuration environnementale présente de nombreuses similitudes. Le REC-04 dispose de modèles 3D très performants, notamment pour le transport de suspensions solides et leur interaction (agrégation, désagrégation), et d'une grande expérience des mesures hydrodynamiques (ADCP), des mesures physiques (salinité, température, pression, turbidité) et des mesures chimiques (phosphates, silicates, nitrites, ammonium, hydrogène sulphide) avec des systèmes multi-sondes. La déposition et la remise en suspension des sédiments au fond des étangs ou des mers peu profondes sont une source de pollution secondaire importante, sous l'action des courants de fond et/ou sous l'action du vent et des vagues de vent (en eau peu profonde). L'étude des mécanismes physiques responsables de ce type de pollution revêt est d'une importance capitale tant au niveau de la physico-chimie que de l'hydrologie des bassins étudiés et notamment en présence de vent. Les études envisagées comporteront un volet expérimental en milieu naturel qui nécessite

l'acquisition de quelques équipements complémentaires, et un volet modélisation 3D en eau peu profonde, qui nécessite le recours aux méthodes numériques performantes, et aux algorithmes de parallélisation sur clusters.

Définition d'indicateurs multicritères pour caractériser la qualité des ressources hydriques

Il s'agit ici de définir des indicateurs qui ne soient pas uniformes (un seuil de concentration par exemple) mais qui tiennent compte des usages souhaités des ressources. On cherchera également à définir des méthodes de suivi en définissant les observations à réaliser et les stratégies d'échantillonnage.

Caractérisation des ressources hydriques en zone naturelles et impact sur la dynamique des couverts végétaux

Les zones naturelles se développent en région méditerranéenne en zone de relief sur des sols souvent peu développés et fortement hétérogènes. Il est nécessaire de caractériser la variabilité spatiale de la réserve hydrique du sol en lien avec les peuplements végétaux afin de quantifier l'impact de la ressource hydrique sur la structure des peuplements et la biodiversité (abordé dans le projet DRYADE soumis à l'ANR).

Gestion des effluents et conséquence des épandages sur la qualité des eaux

La maîtrise de l'épandage de ces eaux conditionne leur impact sur les milieux (sels, métaux, pathogènes) et sur la durabilité de cette solution. La compréhension des phénomènes en jeu impose une approche couplée mode de traitement/apport/transfert pour éviter la dégradation des sols utilisés. Pour faire admettre de telles pratiques les aspects sociaux et institutionnels doivent être abordés, ainsi que les impacts économiques en jeu (IWMI, 2006)⁶.

Ces projets doivent être également s'appuyer sur des développements spécifiques dans les différents domaines scientifiques impliquant pour la plupart plusieurs unités de recherches de la fédération de recherche. Il y a un enjeu fort à progresser sur les points suivants :

- *Estimation des flux d'eau entre les différents compartiments hydrologiques* : Nous devons pouvoir caractériser et modéliser ces flux. Compte-tenu des compétences au sein de la fédération, nous nous intéresserons plus particulièrement aux flux de drainage vers les aquifères souterrains, la partition des flux de surface entre infiltration, ruissellement et évapotranspiration à la surface et les échanges nappe rivières. Nous envisagerons ces flux à différentes échelles spatiales couvrant les échelles locales pour comprendre le fonctionnement des hotspots d'infiltration, l'échelle de l'unité de gestion (la parcelle) pour décrire les interactions avec les actes techniques et à l'échelle de l'hydrosystème pour appréhender le rôle de l'organisation spatiale de l'occupation des surfaces. Ces travaux pourront s'appuyer sur le développement de la plateforme de modélisation SEVE⁷ qui a pour objectif de représenter le fonctionnement du paysage. Ces travaux sur la compréhension et la modélisation des processus doit être accompagné de développement méthodologiques sur le

⁶ IWMI-GWP, Recycling reality : managing health risks to make wastewater an asset, Water policy briefing issue, Vol 17, Feb. 2006

⁷ Plateforme développée au niveau national par un consortium multiorganismes à laquelle contribue l'UMR INRA/UAPV-CSE

caractérisation des propriétés physiques nécessitant la mise au point d'outils de mesure non invasifs permettant de caractériser de grande surface (télédétection, géophysique) ou de systèmes expert permettant d'exploiter au mieux les informations facilement disponibles et les bases de données (règle de pédotransferts par exemple).

- *Impact des modalités de gestion sur les cycles biogéochimiques*: la fertilisation, les techniques de lutttes phytosanitaires, l'irrigation ou la gestion des matières organiques ont un impact fort sur les cycles biogéochimiques déterminant la mobilité et la biodisponibilité des éléments dans le milieu. Nous devons caractériser l'impact de ces actes techniques sur les flux d'éléments polluants à la surface, dans le sol et vers la nappe, à l'échelle de l'unité de gestion. Il conviendra également d'étudier la manière de décrire la succession de forçages physiques, physicochimiques et biologiques associés aux différents systèmes de cultures afin de pouvoir appréhender les impacts sur des territoires plus vastes tels que ceux couverts par les hydrosystèmes.

- *le développement de capteurs physiques et chimiques et de sondes biogéochimiques* : ceux-ci permettront d'acquérir des données, si possibles directement in-situ (bougies poreuses instrumentées dans les sols, détection spectrale par fibres optiques dans les eaux) afin d'alimenter les modèles hydrodynamiques et d'étudier les cycles biogéochimiques de substances polluantes. L'automatisation mesures et un débit accru permettront de déterminer des cinétiques de réaction, encore largement méconnues. Ces développements se feront en lien étroit avec les équipes présentes dans l'axe 4.

2.4.3. Conséquences du changement climatique

On se focalisera plus particulièrement sur les évolutions attendues en climat méditerranéen en étudiant l'impact que cette évolution pourra avoir sur la ressource hydrique, la productivité végétale, la biodiversité et la qualité des milieux aquatiques. Nous nous attacherons à décrire les impacts, à définir des modalités techniques permettant d'en atténuer les impacts et à proposer les mesures d'accompagnement permettant de rendre possible leur mise en application. Parmi les évolutions attendues liée aux changements climatiques en milieu méditerranéen nous considérerons tout particulièrement les évolutions suivantes :

- Augmentation de la durée des périodes sèches
- Augmentation de l'occurrence de pluies torrentielles
- Augmentation du stress hydrique des plantes
- Diminution des ressources hydriques provenant des zones alpines
- Pertes et fragmentation des habitats favorables pour les espèces piscicoles et les insectes aquatiques. Modification des stratégies démographiques

Plus concrètement des actions seront menées sur les points suivants :

- *Vulnérabilité des écosystèmes méditerranéens aux changements climatiques*: Un projet est en cours sur les arbres méditerranéens. Il faut étudier comment les changements climatiques et l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique vont affecter la productivité d'espèces forestières méditerranéennes (pin d'Alep, chêne ...) et la structure des paysages méditerranéens. La stratégie mise en place allie le développement de modèles de simulation, et la mesure de variables

micrométéorologiques et écophysiologiques permettant de calibrer et tester ces modèles à petite échelle spatiale et temporelle. Etant donné que les changements attendus dépassent largement les limites imposées par les mesures fines que l'on pourra obtenir sur quelques années, les séries dendrochronologiques sont d'un intérêt particulier pour la validation des modèles à l'échelle du siècle sur une plus large région (région PACA). Ce programme s'appuie sur des mesures réalisées sur les sites de Lamanon et Font-Blanche (soutenu par l'IFR PMSE) qui font parties du réseau CARBOEUROFLUX (collaboration entre l'URFM, IMEP et le CEREGE)

- *Evolution des systèmes de cultures, des potentiels de production associés.* Le changement climatique a produit des effets significatifs sur certaines cultures. Par exemple la base de données PHENOCLIM montre très clairement un avancement des dates de floraison qui peut engendrer une augmentation du risque de gelée. Les dates de vendanges sont également très révélatrices d'une augmentation des températures. Toutes ces modifications doivent être reprises dans une analyse des systèmes de culture afin de proposer des solutions qui minimisent les risques de perte de production et l'impact de l'agriculture à l'effet de serre (production de N₂O, stockage de carbone dans les sols...).

- *Evolution des ressources hydriques dans un contexte de baisse de la pluviométrie :* l'eau est très certainement le premier facteur limitant en milieu méditerranéen. Il conviendra de revisiter l'approvisionnement en eau nécessaires pour les différents usages (agriculture, urbains, industrie) et proposer des modes de régulation.

2.4.4. Vulnérabilité des écosystèmes aux incendies et de leurs impacts sur les territoires

La prévention des risques d'incendie nécessite la création et l'organisation dans l'espace d'équipements préventifs en particulier des coupures de combustibles ou des zones dans les quelles les masses combustibles sont maîtrisées. Cela implique la mise au point et la validation des modalités de conception de ces ouvrages eux-mêmes ainsi que de leur entretien par des itinéraires techniques comprenant l'emploi souvent combiné du débroussaillage, du pâturage, des coupes de bois et du brûlage dirigé. Mieux connaître ces différentes techniques et permettre ainsi le développement de systèmes experts d'aide à la gestion et à la décision constitue également un axe de travail.

Enfin les incendies de part leur intensité et leur fréquence peuvent modifier durablement les écosystèmes qui sont parcourus. Dans ce cadre il importe de connaître quels sont les impacts du feu sur les végétations en particulier forestières : conséquences sur le feuillage, le système racinaire et le devenir des arbres. Des approches expérimentales et de modélisation sont actuellement engagées pour évaluer ces impacts (projet IRISE financé par UE dans le cadre du programme FOREST FOCUS). Des études de l'influence du régime des incendies sur les écosystèmes sont également nécessaires afin d'évaluer les modifications des structures des peuplements, d'estimer la dynamique d'accumulation de biomasse et d'en déduire l'impact sur le niveau de risque à moyen terme. Des recherches multidisciplinaires sont aussi développées pour déterminer les conséquences d'un ou de plusieurs incendies sur les différentes composantes de la biodiversité (flore, faune en particulier du sol, champignon) et sur le fonctionnement des écosystèmes : impact sur la structure des sols, leur activité biologique, apparition de polluants, dynamique de la végétation.

PUBLICATIONS REPRESENTATIVES

- Bessonov O., Fougere D., Roux B., Development of Efficient Computational Kernels and Linear Algebra Routines for Out-of-Order Superscalar Processors. J. Future Generation Computing, V.21, No.5, pp.743-748, 2005.
- Bourgeois K., Suehs C.M., Vidal E. & Médail F. 2005. Invasional meltdown potential: facilitation between introduced plants and mammals on French Mediterranean islands. *Ecosciences*, 12 : 248-256.
- Bourrié G., Trolard F., Refait P., Feder F. (2004) A solid-solution model for Fe(II) - Fe(III) - Mg(II) green rusts and fougérite and estimation of their Gibbs free energies of formation. *Clays and Clay Minerals*, 52, 3, 382-394.
- Brach-Papa C., Coulomb B., Branger C., Margaillan A., Théraulaz F., Vanloot P., Boudenne J.-L., 2004. Fluorimetric determination of aluminium in water by sequential injection through column extraction. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 378 (6), 1652-1658.
- Buisson E., Dutoit T., Torre F., Römermann C. & Poschlod P. 2006. The roles of edge effects in the resilience of abandoned fields: Implications for conservation in semi-arid fragmented open-landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 115: 6-14.
- Cannavo P., Dudal Y., Boudenne J.-L., Lafolie F., 2004. Potential for fluorescence spectroscopy to assess the quality of soil water-extracted organic matter. *Soil Science*, 169 (10), 688-696.
- Cannavo P., Lafolie F., Nicolardot B., Renault P. 2006 Modelling seasonal variations in CO₂ and N₂O concentrations with a model describing C and N behaviour in the vadose zone. *Vadose Zone Journal*. sous presse:
- Cesaro A.C., Barrett S.C.H., Maurice S., Vaissière B.E., Thompson J.D. 2004. An experimental evaluation of self-interference in *Narcissus assoanus*: functional and evolutionary implications. *J. Evol. Biol.* 17 :1367-1376.
- Claeys-Mekdade C., 2003 « Le lien politique à l'épreuve de l'environnement. Expériences camarguaises. Bruxelles, P.I.E PIETER-LANG, 245p.
- Coppin, F, C. Chabroulet, A. Martin-Garin, J. Balesdent, J. P. Gaudet, Methodological approach to assess the effect of soil ageing on selenium behaviour: first results concerning mobility and solid fractionation of selenium, *Biology and Fertility of Soils*, Volume 42, Issue 5, Jun 2006, Pages 379 - 386, DOI 10.1007/s00374-006-0080-y, URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00374-006-0080-y>
- Coulomb B., Richardson Y., Brach-Papa C., Boudenne J.-L., Théraulaz F., 2006. Rapid estimation of TOC in a marine urban sewage area by UV Spectral Deconvolution. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 86 (14), 1079-1093.
- Debol'skaya E. I., E.V.Yakushev, A.I. Sukhinov. Formation of Fish Kills and Anaerobic Conditions in the Sea of Azov // *Water resources*, Vol. 32, No.2, 2005, pp 151-162.
- Doussan I. et Dubois J. dirs, Conservation de la biodiversité et politique agricole commune de l'Union Européenne. Des mesures agri-environnementales à la conditionnalité environnementale, Bruylant, Bruxelles, décembre 2006, 270p.
- Dubois J. et Maljean-Dubois S. dirs, *Natura 2000, de l'injonction européenne aux négociations locales*, La Documentation Française, Paris, Décembre 2005, 366p.
- Dupuy J-L; Morvan D. 2005. Numerical simulation of a crown fire spreading toward a fuel break using a multiphase formulation. *International Journal of Wildland Fire*, 14:141-151.
- Feder F., Trolard F., Klingelhöfer G., Bourrié G. (2005) In situ Mössbauer spectroscopy : evidence for green rust (fougérite) in a gleysol and its mineralogical transformations with time and depth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 18, 4463-4483.
- Froux F., Ducrey M., Dreyer E., Huc R., 2005. Vulnerability to embolism differs in roots and shoots and among three Mediterranean conifers: consequences for stomatal regulation of water loss? *Trees* 19, 137-144

- Gritti, E.S., Gachet, S., Sykes, M.T., Guiot, J., 2004. An extended probabilistic approach of plant vital attributes: an application to European pollen records at 0 and 6KA. *Global Ecology and Biogeography*, 13, 519-533
- Jacob F., Olioso A. 2005 Derivation of diurnal courses of albedo and reflected solar irradiance from airborne POLDER data acquired near solar noon. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 110 (D10): doi: 10.1029/2004JD004888.
- Klein A.M., Vaissière B.E., Cane J.H., Steffan-Dewenter I., Cunningham S.A., Kremen C., Tscharntke T. 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proc. R. Soc. B. Sous presse* (doi:10.1098/rspb.2006.3721)
- Le Conte Y., Bécard J.M., Costagliola G., De Vaublanc G., El Maâtaoui M., Crauser D., Plettner E., Slessor K. N., 2006 - Source of primer and releaser pheromone in honey bee larvae (*Apis mellifera* L.). *Natuwissenschaften*, 93:237-241.
- Léoncini I., Le Conte Y., Costagliola G., Plettner E., Toth A. L., Wang M., Huang Z., Bécard J.M., Crauser D., Slessor K. N., Robinson G. E., 2004 - Regulation of Behavioral Maturation in Honey Bees by a New Primer Pheromone. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 101:17559-17564.
- Misson, L., Nicault, A., Guiot, J. 2003. Effects of different thinning intensities on drought response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Forest Ecology and Management*, 6267, 1-14.
- Picon B, Allard P, Claeys-Mekdade C, Killian S., 2006 "Gestion du risqué inondation et changement social dans le delta du Rhône. Les « catastrophes » de 1856 et 1993-94. », Ed QUAE, CEMAGREF .. 122 p.
- Picon B., « De 1856 à 2003, les évolutions des rapports au risque inondation dans le delta du Rhône. ». in : *Evaluation et prise en compte des risques naturels et technologiques*. Ed CEMAGREF, pp 39-52.
- Picon B., 2003 « Problématique environnementale et représentations de la Nature, pour une construction de l'environnement comme objet scientifique. » In : *Quelles natures voulons-nous ? Pour une approche socio-écologique du champ de l'environnement*. Paris, ELSEVIER. Pp75-85.
- Pont D, B. Hugueny, U. Beier, D. Goffaux, A. Melcher, R. Noble , C. Rogers, N. Roset and S. Schmutz (2006). Assessing river biotic condition at the continental scale: a European approach using functional metrics and fish assemblages. *Journal of Applied Ecology*. 43: 70-80.
- Rathgeber, CBK, Misson, L., Nicault, A & Guiot, J., 2005. Bioclimatic model of tree radial growth: application to the French Mediterranean Aleppo pine forests, *Trees*, 19, 162-176.
- Reyjol Y., B. Hugueny, D. Pont, P.G. Bianco, U. Beier, N. Caiola, F. Casals, I. Cowx, A. Economou, T. Ferreira, G. Haidvogel, R. Noble, A. de Sostoa, T. Vigneron & T. Virbickas (in press). Patterns in species richness and endemism of European freshwater fish. *Global Ecology and Biogeography*.
- Rouault G., Candau J.N., Lieutier F., Nageleisen L.M., Martin J.C., Warzé N. 2006. Effects of drought and heat on insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Annals of Forest Science* (in press).
- Ruy S., Findeling A., Chadoeuf J., 2006 Effect of mulching techniques on plot scale runoff: FDTF modeling and sensitivity analysis. *Journal of Hydrology*. 326 (1-4): 277-294.
- Saffih-Hdadi K., Bruckler L., Amichot M. and Belzunces L.P. .2005. Modeling impact of parathion and its metabolite paraoxon in soil on nematodes. *Environ. Toxicol. Chem.* 24, 1387-1394.
- Suchail S., Guez D. and Belzunces L.P. 2001. Discrepancy between toxicity induced by low and high doses of imidacloprid in *Apis mellifera*. *Environ. Toxicol. Chem.* 20, 2482-2486.
- Sukhinov A.I.. 3D Model of Diffusion-Advection-Aggregation Suspensions in Water Basins and Its Parallel Realization // *Parallel Computational Fluid Dynamics, Multidisciplinary Applications*, Proc. Parallel CFD 2004 Conf., Las Palmas de Gran
- Tatoni T., Roche P., Médail F. & Barbero M. 2004. The impact of changes in land use on ecological patterns in Provence (Mediterranean France). In : Mazzoleni S., Di Pascale G.,

- Di Martino P., Rego F. & Mulligan M. (eds.). Recent dynamics of Mediterranean vegetation and landscape. John Wiley & Sons, London, pp. 107-120.
- Whitfield CH.W., Ben-Shahar Y., Brillet CH., Leoncini I., Crauser D., Le Conte Y., Rodriguez-Zas S., Robinson G.E.. Genomic dissection of behavioral maturation in the honey bee.
_____ Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 103:16068-16075.

AXE 3. ECODYNAMIQUE ET TOXICOLOGIE ENVIRONNEMENTALE

Les travaux relevant de l'axe Écodynamique et Toxicologie Environnementale visent à étudier le **transfert et l'impact des éléments toxiques**, afin de mieux appréhender les notions de **risque** (chronique ou accidentel) liés aux **activités anthropiques**. Les actions de recherche permettront d'améliorer à terme la détection, les procédés de dépollution (bioremédiation, phytoremédiation des sols) (c.f. Axe 4 : écotechnologies), la prévention de la contamination de sites et par conséquent **la prévention de la contamination vis-à-vis de l'homme**. Cet axe englobe, non seulement les éléments chimiquement toxiques et objets finement divisés (cadmium, plomb, zinc, cuivre, uranium, nickel, arsenic, nanoparticules manufacturées) utilisés dans l'industrie, mais également les radionucléides (certains isotopes radioactifs des cobalt, strontium, sélénium, technétium ou actinides).

Si l'on aborde la notion de risque, deux aspects doivent être développés : les modes d'exposition et la toxicité. Ainsi les équipes de la future Fédération ECCOREV étudieront de manière complémentaire :

- la description de la **biodisponibilité**, la **transformation** et le **transfert** dans différents **écosystèmes, en prenant en compte les relations trophiques**, c'est-à-dire l'écodynamique des contaminants (l'exposition),
- la description des réponses des organismes vivants à cette exposition avec, pour les niveaux « population » et « communauté », un accent sur les effets induits sur les traits d'histoire de vie (survie, reproduction, comportement) et pour les niveaux cellulaire à individuel une analyse approfondie des phénomènes de **transport**, de **concentration** et de **métabolisation** de ces toxiques, afin d'estimer les mécanismes de toxicité.

L'enjeu majeur de ces études est de fournir les bases d'une évaluation scientifique des risques liés aux éléments toxiques utilisés dans la recherche et l'industrie, que ces stressors soient seuls ou en mélange

Les recherches conduites dans le cadre de cet axe ont pour objectif :

- de décrire le comportement biogéochimique de ces toxiques qui sera déterminant dans leur biodisponibilité et leur transfert entre le milieu externe et l'organisme vivant ;
- de proposer des outils de modélisation opérationnels permettant d'évaluer l'évolution temporelle et spatiale des concentrations en toxiques dans les écosystèmes étudiés ;
- de décrire les mécanismes de transformation de ces toxiques essentiellement par les organismes qui les tolèrent ;
- d'établir des relations de type dose-effets pour les grandes fonctions métaboliques des organismes ;
- de comprendre les modes d'action des toxiques aux différents niveaux d'organisation du vivant (organismes entiers, cellulaire, moléculaire) ;
- de caractériser les cibles de l'intoxication et d'identifier des biomarqueurs.

Les équipes impliquées dans cet axe de recherche ont différents domaines de compétence et savoir-faire, et elles couvrent les différents champs thématiques des problématiques de l'écodynamique des polluants et de la toxicologie (chimie, physique, agronomie, biologie, médecine, écologie...).

Thèmes relevant de cet axe de recherche

- **1) Sensibilité des écosystèmes vis-à-vis des toxiques : éco dynamique des polluants**
 - **1a. Comportement biogéochimique des contaminants dans les écosystèmes** : CEREGE ; UMR 6191, IRSN/LRE, UMR 1114 /INRA
 - **1b. Évaluation du risque**: IRSN (LME, LRE, SENSIB)
- **2) Sensibilité du vivant vis-à-vis de la toxicité du polluant**
 - **2a. Mécanismes d'adaptation et de transformation des toxiques** : IMEP, CEREGE, UMR 6191/LEMIRE
 - **2b. Impact et mode d'action des toxiques sur le vivant** : CEA-SBTN, LBME (Timone), UMR 6191
 - **2c. Identification des molécules cibles qui marquent spécifiquement l'intoxication** : CEA-SBTN ; UMR 6191

3.1. Enjeux sociétaux

L'impact de l'environnement sur la santé constitue une préoccupation majeure dans le monde contemporain. Diverses formes de pollution sont susceptibles d'avoir des retentissements sur la santé de l'homme et l'avenir de notre environnement. Cependant, il est aussi grave de sous-estimer l'importance d'un risque, puisque l'on ne met pas en oeuvre les mesures nécessaires, que de le surestimer, ce qui peut provoquer des craintes injustifiées.

Évaluation et prédiction des risques

Nos travaux sur la dynamique, la biodisponibilité des toxiques et leur transfert nous permettront de contribuer à déterminer la probabilité de leur dissémination dans différents écosystèmes. Des équipes de la future fédération de recherche étudient la sensibilité écologique d'un territoire à une pollution en s'appuyant entre autres sur les études du comportement biogéochimique et biodisponibilité de polluants et la modélisation de leur transfert, entreprise initialement pour l'étude de radionucléides, nous souhaitons étendre ce type d'études à d'autres toxiques.

Ces études ont pour objectif d'évaluer les risques avec rigueur et objectivité, et à les hiérarchiser.

Evaluation des risques liés à de nouvelles technologies

A l'heure où une politique de gestion des risques se met en place de manière presque concomitante avec le développement d'une nouvelle technologie, en l'occurrence les **nanotechnologies**, il s'avère capital de comprendre les mécanismes de toxicité observés au niveau cellulaire pour bien appréhender le potentiel toxique de ces matériaux sur la santé des organismes dont l'homme.

Nous nous attacherons à mettre en oeuvre des tests de toxicologie génétique pour les toxiques dérivés des nanotechnologies.

Détermination de l'impact réel des toxiques sur les organismes vivants

Pour déterminer l'impact des toxiques à différents niveaux d'organisation du vivant, nous avons recours à des approches globales soit au niveau de l'individu (relation dose effet sur les grandes fonctions métaboliques), soit au niveau moléculaire (transcriptome et protéome) qui permettent d'étudier l'ensemble de l'expression des gènes et des protéines et à la génotoxicologie par l'analyse du risque d'apparition d'altération ou de mutations du patrimoine génétique et l'évaluation du risque de réduction de la fertilité.

L'ensemble de ces travaux permettra d'identifier des marqueurs de toxicité en relation avec les différents toxiques.

3.2. Ressources humaines et compétences

Unités de Recherche	Compétence	Taille *
CEREGE UMR 6635 CNRS - Université Paul Cézanne	- Écodynamique et biodisponibilité des toxiques - Transfert et transformation de toxiques - Écotoxicité des nanoparticules de synthèse - Spéciation des métaux	10 C ; 3 ITA
IRSN	- Comportement biogéochimique et biodisponibilité des radionucléides/ Effets biologiques induits - Modélisation du transfert de radionucléides - Sensibilité radioécologique d'un territoire	14 C ; 8 T (LRE) 1C (LME) 1C SENSIB
IMEP - CNRS, UMR 6116	Impact de toxiques sur le fonctionnement d'écosystèmes et de microorganismes	7
UMR 1114 INRA-UAPV	Écodynamique et transfert d'éléments métalliques	4 C
CEA Cadarache DSV UMR 6191	- Rôle des bactéries dans le transfert sol-plante de métaux - Transformation de toxiques par les microorganismes - Impact et mode d'action des toxiques sur le vivant - <i>Arabidopsis thaliana</i> - <i>Pseudomonas brassicacearum</i> - Mécanisme de radiotolérance chez <i>Deinococcus deserti</i> - Identification des cibles des toxiques et interaction protéines-métaux - Imagerie du stress oxydant	1 C (LEMIRE) 1C 1 T (LEMIRE) 2 C (LBC) 2C, 1T (LEMS) 2C-E 1 T (LGBP) 1C 1T (LEMIRE) 2C 2 ITA (LEMIRE) 3C, 1T (LIPM) 1 C LEMP
CEA Marcoule DSV SBTN	- Impact et mode d'action des toxiques sur des cellules humaines - Identification et caractérisation des cibles des toxiques	10C ; 15 ITA
LBME	- Impact et mode d'action des toxiques sur des cellules humaines - Génotoxicologie	7 C-E, 2 ITA

9 Chercheurs enseignants

59 chercheurs, 37 ITA

Animation

- *Inventaire et mutualisation des outils (Microscopie, ICP-MS, méthodes spectroscopiques...)*
- *Mise en place d'une plate-forme analytique*
- *Contribuer et favoriser le transfert de technologies entre laboratoires*
- *Organisation de journées scientifiques*
- *Identifier les partenaires adéquats pour réponse à appels d'offre (ANR, PCRD...)*
- *Évolution vers une interdisciplinarité*

3.3. Les plateaux techniques :

Plate-formes disponibles au SBTN à Marcoule :

- Transcriptomique : analyseur Axxon ; Bioanalyzer Agilent ; Genespring ; Plate-forme siRNA
- Protéomique : 2D-PAGE et analyse Melanie ; MALDI-TOF ; LC-ESI-IT-MSMS ; Séquenceur EDMAN
- Technologies recombinantes en cellules procaryotes et eucaryotes (baculovirus/Sf9 ; CHO ; COS ; HEK) et purification associée jusqu'à l'échelle 100 mg de protéines purifiée (15 systèmes HPLC)
- Immunochimie : production anticorps mono et polyclonaux ; marquage de protéines ; montage d'essais immuno-enzymatiques ou en technologie homogène (technologie HTRF)
- Biophysique et mesures d'affinité cible-toxique : microcalorimétrie DSC et ITC ; Biacore ; Kryptor ; spectroscopie de fluorescence à résolution temporelle
- Analyse topographique et énergétique : microscopies AFM et SPM
- Bio-informatique pour la transcriptomique et la protéomique, modélisation moléculaire

Plateau technique disponible à l'UMR 6191 à Cadarache

- 2 phytotrons habilités pour l'utilisation de matière radioactive et de plantes génétiquement modifiées
- 2 compteurs : bêta et gamma
- 1 Phosphorimager
- 1 laboratoire « chaud » équipé pour la biologie moléculaire.
- Microscopie confocale
- ICP-AES
- Fingerprinting par DGGE ; hybridation ADN-ADN
- GC-IR-MS
- Transcriptomique : analyseur Axxon ; Bioanalyzer Agilent ; Genespring

- Plateau technique disponible à l'IRSN
- Techniques de mesures de radionucléides par spectrométries γ , β , et α
- Radiochimie, banc d'auscultation gamma-métrique;
- Techniques de préparation de coupes histologiques (cryostat pour l'observation en microscopie photonique, coupe pour microscopie électronique) ;
- Techniques de microlocalisation de radionucléides dans des tissus biologiques (autoradiographies et sonde X couplée à un microscope électronique à transmission) ;
- Techniques de dosages biochimiques divers (dosage de méthallothionéines, séparation de protéines cytosoliques par chromatographie basse pression, par HPLC, dosages de biomarqueurs sur micro-plaques, électrophorèse sur gel, tests Comet);
- Techniques de dosages de divers éléments stables (ICP-AES, HPLC, chromatographie ionique et électrophorèse capillaire pour cations et anions majeurs, absorptions atomiques flamme, four, vapeur froide-Hg, analyseur de carbone, spectrophotomètres UV-visible, fluorimètre,...).
- 3 ICPEs dont 1 soumise à autorisation, avec utilisation de sources radioactives

3.4. Axes structurants

1) Sensibilité des écosystèmes vis-à-vis des toxiques : éco - dynamique des polluants

1a Comportement biogéochimique des contaminants dans les écosystèmes :

CEREGE ; CEA-DEV-M-LEMIRE

Objectif :

• Étude des mécanismes bio-physico-chimiques de transfert des contaminants du sol vers les organismes vivants

La migration d'un élément (ou d'une particule) dans les écosystèmes dépend de grandeurs physiques (taille, densité, état liquide ou solide...) mais aussi, voire surtout, de sa forme chimique (la spéciation) et donc de sa réactivité avec le milieu environnant (réactions d'agrégation, dispersion, dissolution, précipitation, complexation, adsorption, modifications redox...). Les réactions impliquant la modification de la spéciation des contaminants ont lieu à l'échelle moléculaire et se traduisent par une grande complexité et une non moins grande difficulté d'étude (exemple de réactions ayant lieu entre les minéraux des sols et des rivières et les contaminants, Fig. 1).

Bien évidemment le transfert des contaminants n'est pas seulement influencé par des substances minérales, le fonctionnement des organismes vivants dans la biosphère va avoir un impact déterminant. Ainsi, à l'échelle d'un écosystème ou même de l'interaction sol-organisme vivant, une approche pluridisciplinaire est

nécessaire afin de comprendre les mécanismes biophysico-chimiques responsables du transfert des contaminants. Les recherches autour de cet axe évoluent vers de **nouveaux défis scientifiques** qui prennent en compte: (1) les **nanoparticules** qui présentent une chimie et réactivité particulières dues à leurs propriétés de surface (2) l'influence de **l'activité biologique sur la spéciation** (chélation, processus redox, immobilisation par séquestration par les végétaux...).

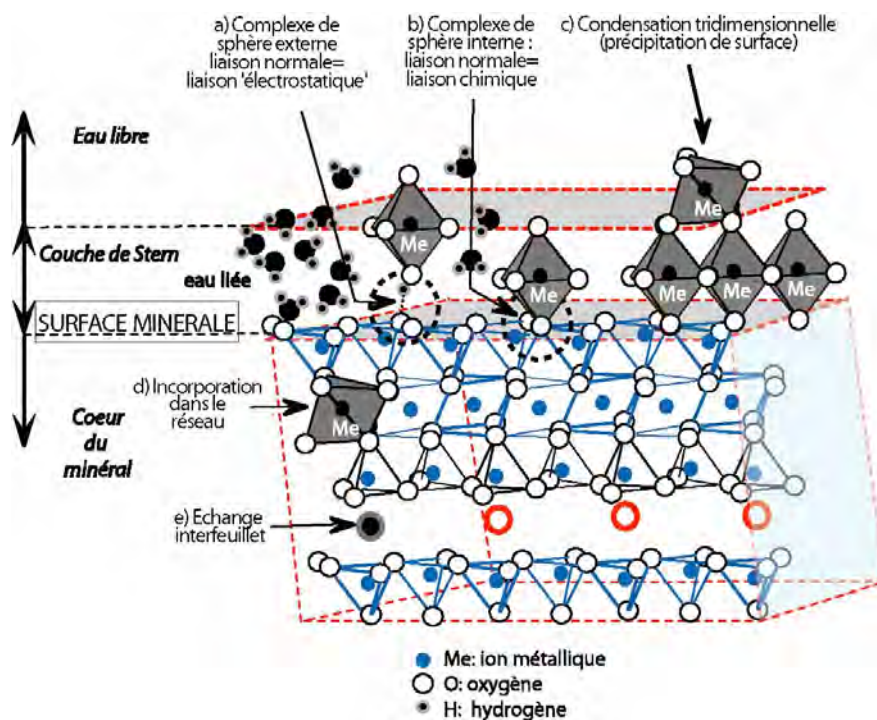


Figure 1 : Mécanismes moléculaires de sorption/rétention de métaux à la surface de minéraux

i) Importance relative des réactions biotiques et abiotiques sur la mobilité des radionucléides dans un sol : IRSN/LRE

L'objectif du LRE est de quantifier et modéliser l'importance de l'activité microbienne d'un sol sur l'évolution spatiale et temporelle de la mobilité (et de la biodisponibilité) des radionucléides dans la zone non saturée.

Les cycles biogéochimiques naturels des éléments majeurs (e.g. C, H, O, N, S, P) combinés avec les processus biologiques tels les réactions d'origine microbienne, l'influence racinaire des plantes supérieures ou encore la bioturbation par la macrofaune, constituent les facteurs les plus influant pour expliquer la spéciation, le transport et le transfert des radionucléides au sein des écosystèmes. Cette compréhension est déterminante pour définir les zones d'accumulation au sein des écosystèmes, et les conditions d'exposition des organismes vivants.

L'activité microbienne augmente de manière nette l'immobilisation du Se(IV) et du Tc(VII) dans les sols de surface. L'interaction directe ou indirecte entre le polluant et les communautés de microorganismes présentes (bactéries, champignons) induit une rétention dix fois plus importante en termes de quantité pour le Se(IV) par exemple, de même qu'une modification de la spéciation de l'élément. Notamment, l'émission d'espèces sélénées volatiles (biométhylation) a pu être mise en évidence.

Ce flux, initialement proportionnel à la biomasse microbienne totale des sols, varie indépendamment de celle-ci après quelques mois d'incubation. Les travaux en cours ont pour objectif de relier ces variations à la dynamique des populations microbiennes présentes. Ce projet est complémentaire de travaux réalisés pour comprendre l'influence du cycle de la matière organique naturelle d'un sol sur le devenir du sélénium.

ii) Transfert sol-plante des métaux et métalloïdes

La mobilité et la biodisponibilité de métaux dans les sols constituent une problématique majeure pour la prévision du transfert des éléments du sol vers la chaîne alimentaire. La complexation des métaux par des ligands organiques naturellement bio-produits dans les sols et leur adsorption à l'interface solide-eau sont déterminantes dans la spéciation, et le transfert d'éléments trace.

Au CEREGE, des travaux sont focalisés sur l'étude des mécanismes de transfert sol-plante de Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Cu, et As, dont les concentrations dans des sols de la Réunion⁸, de Nouvelle-Calédonie⁹ et du Bangladesh¹⁰ sont naturellement élevées. Différents modèles seront étudiés : modèle As/riz, modèle Ni, Cr, Co, Mn/plantes hyperaccumulatrices ou non, modèle sols volcaniques plantes à valeur agronomique (laitues...). Pour les deux premiers modèles, le cycle des métaux et métalloïdes est fortement associé à la dynamique et au cycle du fer.

Le premier modèle s'inscrit dans le contexte de contamination en As de l'eau d'irrigation des rizières au Bangladesh (mise en évidence des mécanismes de contrôle de l'absorption de As par le riz et rôle de la plaque de fer racinaire). Ce travail ne se limite pas à la partie rhizosphérique, puisqu'il vise à mieux comprendre et déterminer les points d'entrée de l'As dans la chaîne alimentaire.

Le second aura pour objet d'étude les écosystèmes métallifères du massif du Koniambo en Nouvelle-Calédonie (compréhension du système en place afin d'évaluer l'impact des activités minières futures). Des bilans de masse seront établis afin de mettre en évidence les puits et source d'éléments dans les écosystèmes étudiés. Cela passe par une approche *in situ* mais également la mise en place d'expériences en conditions contrôlées (type rhizotrons). Nous essayerons de distinguer les processus microbiens des processus physico-chimiques de mobilisation des éléments dans des incubations de sol et/ou de sédiments, plus ou moins riches en matière organique, et dans des conditions expérimentales proches de celles qui seront mesurées sur le terrain (T°, humidité, pH, CE,...). Dans ces expériences contrôlées, la solubilisation de Cr, Co et Ni (mais aussi des éléments majeurs) sera étudiée, ainsi que la réorganisation des éléments au sein de la fraction solide.

Le dernier concerne les sols volcaniques réunionnais riches en ETM et en nanoparticules naturelles. Or les sols cultivés reçoivent des quantités importantes de déchets agricoles pouvant affecter les conditions bio-physico-chimiques et donc la mobilité des ETM. Le but de ce travail sera de déterminer les mécanismes bio-physico-chimiques de transfert sol-plante de Ni, Cr et Cu et plus particulièrement le rôle des imogolites et allophanes, nanoparticules naturelles.

⁸ GESSOL Coord. E. Doelsch CIRAD

⁹ ANR Coord. J.P. Ambrosi CEREGE

¹⁰ Superfund Basic Research Program (Epidémiologie As au Bangladesh Columbia Univ. A. van Geen) (2005-2010) + AQUATrain FP6-Research Training Networks Coord. D. Polya (2006-2009)

Dans ces différents travaux, le but est de mesurer l'impact des activités humaines (utilisation intensive des ressources en eau, activité minière, épandage de déchets "verts") sur la mobilité des ETM (éléments traces métalliques) en examinant plus particulièrement les processus dans la rhizosphère et le rôle de nanophases naturelles. [CEREGE].

Rôle d'exopolymères bactériens dans le prélèvement de métaux par les plantes

Les biofilms développés par des communautés bactériennes à la surface des racines constituent une interface complexe susceptible d'interagir par sa nature et sa structure avec les métaux et d'influencer la biodisponibilité des métaux et leur transfert vers la plante.

L'objectif de cette étude est d'examiner la contribution de biofilms produits par des bactéries productrices d'exopolysaccharides (EPS) à l'interface sol-racine dans le prélèvement de métaux par les plantes.

Le système de notre étude est constitué par *Arabidopsis thaliana*, plante modèle en génétique, une bactérie productrice d'EPS *Rhizobium sp.* YAS34 qui produit des biofilms sur les racines d'*A. thaliana*, les métaux (cadmium et zinc) et le sol (contamination multiéléments).

L'analyse de la production d'EPS et de biofilm *in planta* a été réalisée par imagerie et par dosage avec une lectine portant un chromophore fluorescent ou un traceur isotopique (^{125}I) (Fig. 2).

Dans les situations où la production d'EPS est diminuée par la présence de cadmium (< 75 ppm), le facteur d'accumulation de Cd dans les feuilles augmente pour les plantes inoculées par rapport aux plantes axéniques, avec une élévation concomitante de la concentration en soufre au niveau des racines. Pour des concentrations toxiques en cadmium pour la plante (> 75 ppm), la production d'EPS et la formation de biofilm sont induites. Ce qui se traduit par une diminution du facteur d'accumulation du métal dans les feuilles par rapport aux plantes axéniques, malgré une plus forte concentration en métal dosé au niveau des racines des plantes inoculées. Lorsque les plantes sont cultivées dans un sol contaminé (Cd, Zn, Pb), toxique pour le développement des plantes, une réduction du prélèvement de cadmium est observée pour les plantes inoculées par *Rhizobium sp.* YAS34 par rapport aux plantes témoins.

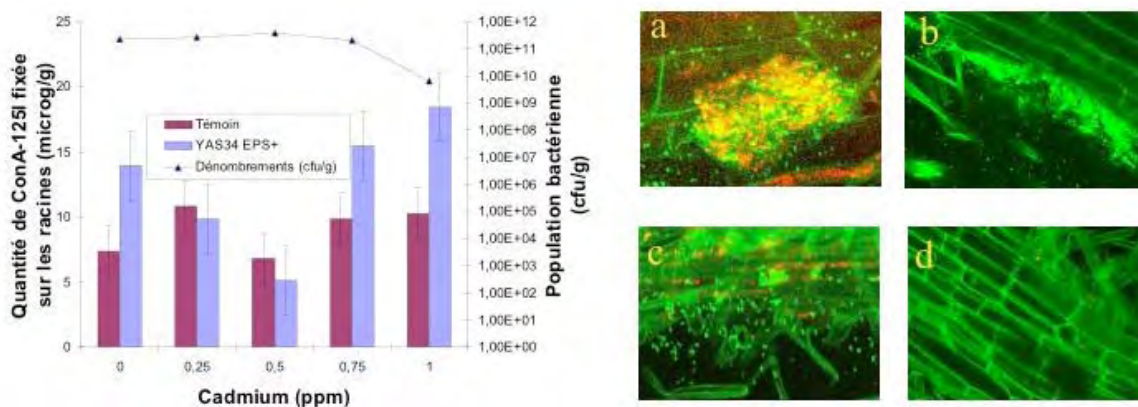


Figure 2. Quantification et imagerie de l'EPS produit par *Rhizobium sp.* YAS34 sur les racines d'*eto-2*. Les racines de plantules d'*eto-2* cultivées sur milieu contenant du Cd sont marquées par une lectine (ConA) portant un traceur radioactif ^{125}I ou un groupement fluorescent (Alexa-660) et reconnaissant spécifiquement l'EPS de

YAS34. Les plantes ont été cultivées sur milieu contenant du Cd (a) 0 ppm, b) 0,5 ppm, c) 1 ppm Cd d) plantes axéniques « témoin » cultivées sur 1ppm de cadmium. Les bactéries sont marquées à la GFP.

La toxicité du cadmium stimule l'organisation de *Rhizobium sp.* YAS34 en biofilms comportant une matrice d'EPS. Cette organisation contribue à diminuer le prélèvement de cadmium par la plante.

iii) Interactions nanoparticules manufacturées – cellules : écotoxicité des nanoparticules de synthèse

Les interactions de nanoparticules manufacturées, comme les oxydes (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , TiO_2 , CeO_2 , ZnO) et carbonées (fullerènes), avec des bactéries (ANR ECCO, Coord. O. SPALA CEA). L'objectif central est d'établir la relation entre l'état de surface des nanoparticules et l'impact biologique. Cet état de surface, dont dépend l'état de dispersion et donc la biodisponibilité, peut être modifié par des variations du milieu d'origine physico-chimique et/ou biologique (pH, force ionique, métaux, polysaccharides bactériens, biofilms...). La connaissance de l'influence de ces facteurs permet d'aborder l'étude toxicologique des nanoparticules dans les conditions les plus pertinentes. Dans les années à venir un effort particulier devra être engagé sur la caractérisation, la quantification et l'étude cinétique des phénomènes rédox ayant lieu à la surface des nanoparticules. Les résultats les plus récents sur des nanoparticules de fer ayant des degrés d'oxydation initiaux différents confirment ce que nous avons déjà publié concernant les nanoparticules de fer : la modification du degré d'oxydation des nanoparticules peut générer des effets toxiques sur les bactéries. Ces phénomènes rédox peuvent d'ailleurs générer des formes radicalaires comme les ROS à l'origine de stress oxydant. [CEREGE/LEMIRE].

iv) Les impacts environnementaux et sanitaires des particules et métaux lourds atmosphériques

Les conséquences tant sanitaires qu'écologiques de la pollution atmosphérique sont connues et de plus en plus documentées. Elles sont considérables au plan mondial. La pollution de l'air porte en effet atteinte à la santé humaine et peut affecter un grand nombre de personnes, y compris à des concentrations faibles. Dans ce cadre, nos actions portent sur la caractérisation fine des émissions particulières industrielles et la relation spéciation - toxicité. De même, les interactions entre particules atmosphériques et végétaux, ainsi que la contribution de la fraction naturelle aux concentrations en PM10 et PM2.5 seront abordées. Un point important visera dans le cadre du programme AASQA de la région PACA, la caractérisation de l'air ambiant et le traçage de sources. [CEREGE]

v) Apports de la spéciation des contaminants dans l'évaluation des risques

Le risque environnemental d'une substance chimique est classiquement évalué par le rapport entre deux grandeurs, notées la PEC et la PNEC, décrivant respectivement la «Concentration Prévisible dans l'Environnement» et la «Concentration Sans Effet Prévisible» de la substance considérée.

L'introduction de la notion de biodisponibilité dans les évaluations de risque a été mise en œuvre à l'occasion de l'évaluation de risque du zinc, coordonnée par le Bureau Européen des Substances Chimiques (ECB-Ispra). A cette occasion, il a été

acté que le calcul de l'indice de risque pour le zinc pouvait ne plus suivre le classique rapport PEC/PNEC, mais s'établir en prenant un facteur correctif (compris entre 0 et 1) représentant la fraction biodisponible de la substance dans le milieu. L'objectif de l'étude sera donc de déterminer la valeur du facteur correctif à partir de la mesure de la bioaccumulation de Cu et Cd dans des organismes (Bryophytes et Daphnies etc.) en milieux où la concentration est dite "chronique" et non "aiguë" comme dans les études classiques sur la toxicité des éléments en solution. Cette étude basée sur la caractérisation de la spéciation du Cu et Cd permettra de proposer des valeurs correctives basées sur une approche mécanistique. [CEREGE].

vi) Caractérisation moléculaire de la spéciation des contaminants

La caractérisation, au niveau moléculaire, des espèces ainsi que de leurs mécanismes d'interactions dans des systèmes naturels et anthropisés (sol, eau, air) est un domaine dans lequel des équipes de la future Fédération ont développé une forte activité depuis dix ans.

La méthodologie consiste à connaître l'arrangement spatial des atomes au sein de nano-objets et nano-structures mal organisés et d'en analyser et prévoir les conséquences vis-à-vis de l'efficacité du piégeage (réactivité, affinité...) et de l'organisation à moyenne et grande échelle. Pour cela il combine des analyses structurales multiéchelles, par diverses spectroscopies et microscopies (Fig. 3). Les grandeurs que nous pouvons ainsi analyser sont :

- la distance interatomique ou interdomaine dans des systèmes organisés à la mésoéchelle, au moyen de la **DRX** (*Diffraction des rayons X*) pour l'ordre intracristallin, la **DPAX** (*Diffusion aux Petits Angles de RX*) pour « l'ordre » interparticulaire (distances de corrélation) et les facteurs de forme et de structure permettant de remonter aux dimensions fractales, à la forme et à la taille des objets infra-microniques..
- la distance inter-atomique (< 10 Å) et la spéciation (incluant les états d'oxydation) dans des structures mal organisées par la combinaison des spectroscopies **XAS** (*X-ray Absorption Spectroscopy* : **XANES** (*X-ray Absorption Near Edge Structure*), **EXAFS** (*Extended X-ray Absorption Fine Structures*)), **spectro-microscopie X** (*micro-XANES, micro-EXAFS*), **FTIR** (*Infra-Rouge à Transformée de Fourier*), **RMN** (*Résonance Magnétique Nucléaire*).
- la mesure des concentrations au sein des phases reconnues par les méthodes précédentes au moyen de la microscopie **MEB-EDS** (*Micro-analyse : Microscopie électronique à balayage couplée à l'Energy Dispersive Spectroscopy*), **MET-EELS-EDS** (*microscopie Electronique à Transmission couplée à l'Electron Energy Loss Spectroscopy et/ou l'EDS*), **micro-XRF** (*X-ray Fluorescence Spectroscopy*). Ces techniques donnent accès à des paramètres structuraux confrontés à la dynamique moléculaire. [CEREGE]

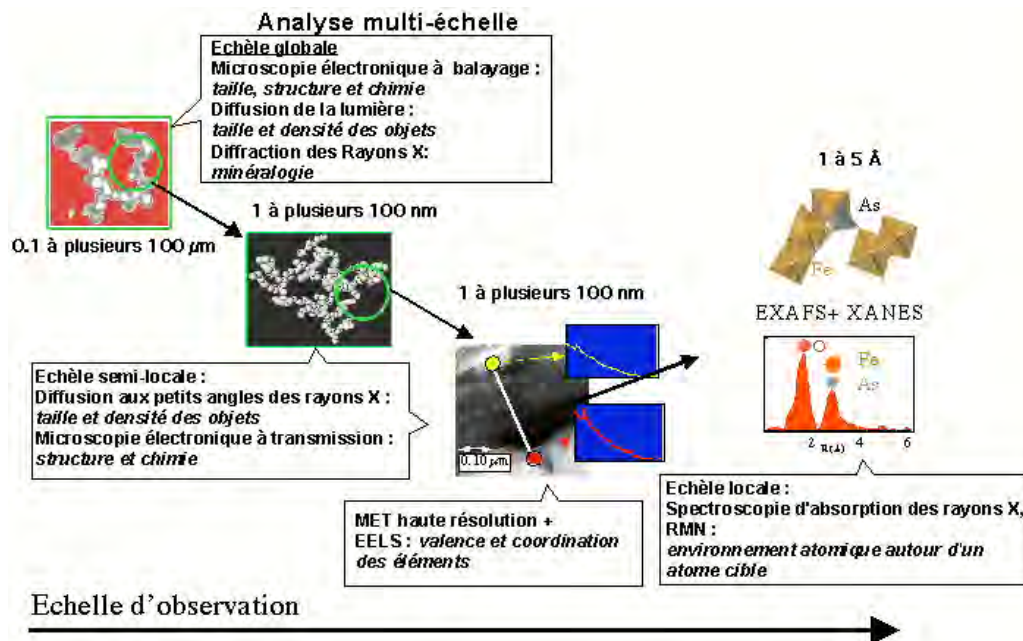


Figure 3 : analyse structurale multi-échelle

vii) Traçage des polluants.

Celui-ci reposera principalement sur l'analyse d'isotopes de métaux (Pb, Cd, Zn). Cette technique est applicable à tout mode de transfert du métal (eau, sol, atmosphère). Elle s'avère particulièrement efficace dans le traçage des sources, qu'il s'agisse de contaminations récentes (ex. contamination de nappes « Joint Network Project with Aquatest Limited », Technical University in Liberec, Cz Geological Survey), ou de pollutions anciennes (mise en évidence des contaminations métalliques anciennes depuis l'âge du Bronze dans les ports antiques méditerranéens et dans les Alpes méridionales (Prog. Eclipse II)).

Des études sont conduites sur la dynamique de transfert de métaux depuis le sol jusqu'à l'organe cible de la plante par utilisation d'isotopes radioactifs, afin de mieux comprendre le rôle de gènes étudiés dans le transfert sol – plante. Deux approches complémentaires sont utilisées : - la quantification du transfert par comptage (béta ou gamma) - l'imagerie de l'allocation de l'isotope (au PhosphorImager). Il a ainsi été montré, par marquage radioactif avec du ^{109}Cd de mutants nuls et de surexprimants du gène d'un transporteur de métaux (HMA4) chez *A. thaliana*, que ce dernier intervient essentiellement dans la vitesse de transfert de certains cations divalents des racines vers la partie aérienne. Ces expériences peuvent être réalisées en conditions de mono- ou poly-contamination par les métaux lourds, permettant d'analyser l'affinité relative d'un transporteur pour les différents métaux lourds qu'il peut prendre en charge. [CEREGE, UMR 6191 GRAP].

1b. Évaluation du risque

IRSN/LRE ; IRSN/LME ; IRSN/SENSIB

Objectif

Évaluer le risque lié à une pollution radioactive

Le constat sur le terrain des conséquences radiologiques de rejets radioactifs, et notamment dans le cas du retour d'expérience de l'accident de Tchernobyl, montre que les conséquences pour l'homme et pour l'environnement d'une pollution radioactive dépendent de l'importance et de la nature de celle-ci, mais aussi du territoire qui la reçoit et du contexte humain et environnemental au moment où elle se produit. Ceci est aussi vrai pour toutes les pollutions industrielles. Qu'elles s'expriment en termes économiques, de toxicité ou de risque sanitaire, ces conséquences seront plus ou moins pénalisantes suivant les caractéristiques du milieu touché (paramètres environnementaux) et suivant l'usage qu'en fait l'homme (paramètres anthropiques). Les différents milieux : urbains, agricoles, forestiers, fluviaux, lacustres, marins ou d'altitude, présentent notamment des sensibilités différentes vis-à-vis d'une pollution et au sein même de ces grandes composantes environnementales que sont les milieux, différents facteurs, naturels ou anthropiques spécifiques à l'écosystème considéré, déterminent la réponse de l'environnement à une pollution à une période donnée.

Les études sur l'évaluation des risques liés à une pollution radioactive sont conduites à l'IRSN (LRE ; LME et projet SENSIB).

i) Sensibilité radioécologique d'un territoire

Dans un espace agricole, par exemple, le type de culture et le moment du cycle végétatif constituent des facteurs de sensibilité importants. Le blé et le lait produits sur une surface soumise à une même pollution présenteront des niveaux de contamination respectifs très différents. La rémanence de cette contamination dans les cultures successives dépendra fortement des caractéristiques du sol. Et, de manière générale, toutes les caractéristiques intrinsèques à un écosystème, qui influent sur le transfert des polluants, confèrent à un territoire une sensibilité spécifique vis-à-vis d'une pollution. Il en est de même de facteurs anthropiques tels que les pratiques agricoles (utilisation d'engrais, irrigation, période de semis) ou zootechniques (alimentation des animaux, présence à l'extérieur). C'est l'ensemble de ces facteurs que l'on nomme dans le projet SENSIB les facteurs de sensibilité (sous-entendue la sensibilité radioécologique). La sensibilité radioécologique d'un territoire est donc définie par une double composante : environnementale et anthropique, dont les poids relatifs peuvent évoluer en fonction du temps.

Si un territoire présente une sensibilité à la pollution qui lui est propre, il est actuellement difficile de comparer la sensibilité globale de différents territoires : est-il plus grave, par exemple, d'avoir un stock important de polluants dans un espace naturel peu anthropisé ou d'avoir une faible concentration de ces mêmes polluants dans un cours d'eau largement utilisé pour l'irrigation ? La sensibilité radioécologique est un concept qui permet de représenter l'intensité de la réponse d'un territoire à une pollution. Les perspectives d'utilisation de ce concept sont explorées à l'IRSN depuis 2003 dans le cadre du projet SENSIB cofinancé entre l'IRSN et l'ADEME. Les concepts étudiés dans SENSIB montrent des perspectives intéressantes d'application à différentes étapes de la vie d'une installation nucléaire (rejets chronique, contexte accidentel, démantèlement). Dans le cadre de SENSIB, une nouvelle application baptisée PRIME (Projet de Recherche sur les Indicateurs de la sensibilité radioécologique et les méthodes Multicritères appliqués à l'Environnement

d'un territoire industriel) a pour objectif de proposer une application du concept de la sensibilité radioécologique à l'échelle d'un territoire dans le contexte post-accidentel. Il s'agit de développer, en concertation entre les experts (IRSN, INERIS et universitaires), les acteurs de la décision (DRIRE/ASN Rhône Alpes) et les représentants du territoire (CLI du Gard), une méthode d'analyse multicritères de caractérisation du territoire contaminé, utilisable pas les gestionnaires du risque lié à un accident industriel impliquant des substances radioactives. La méthode sera basée sur la hiérarchisation des facteurs de la sensibilité radioécologique d'un territoire vis-à-vis d'une pollution radioactive. [IRSN/SENSIB]

ii) Evaluation du risque aux écosystèmes pour les radionucléides seuls ou en mélange avec d'autres stressseurs

Au sein du Service d'Etudes du Comportement des Radionucléides au sein des Ecosystèmes (SECRE), les travaux de recherche ou d'expertise du LRE entrent dans le cadre de la protection de l'environnement, et incluent plus particulièrement l'étude du comportement des polluants (naturels ou artificiels, stables ou radioactifs, incluant les contextes de multipollution) et leurs effets à divers niveaux dans les écosystèmes continentaux, aquatiques et terrestres. Ils s'effectuent soit dans le cadre de l'avancée de ses programmes de recherches propres (ENVIRHOM), soit pour le compte ou en collaboration avec divers organismes sur le plan national (ANDRA, EDF, ...) ou international (Projets européens,...). Ces travaux ont pour vocation principale d'acquérir et de compléter les connaissances nécessaires à l'évaluation du risque, lié à la présence ou au rejet — existant ou prévisionnel — de radionucléides dans l'environnement continental, en conditions chroniques ou accidentelles. Les actions de recherche et développement du LRE visent à déterminer le comportement biogéochimique des radionucléides dans les compartiments « réservoirs », la biodisponibilité des radionucléides et effets biologiques sur des modèles végétaux aquatiques et terrestres en prenant en compte des relations trophiques

Ces études s'inscrivent dans la problématique et la stratégie de recherche du programme ENVIRHOM dédié à l'amélioration de l'évaluation du risque chronique, environnemental et sanitaire, associés aux radionucléides en traces. Les résultats acquis sont utilisés de manière opérationnelle dans le cadre de la conception de méthodes de caractérisation du risque environnemental et des outils associés. Ces réflexions sont également conduites à l'échelle européenne dans le cadre du projet ERICA qui fait suite au projet FASSET du 5^{ème} PCRD (6^{ème} PCRD Euratom, Environmental Risk from Ionising Radiation: Assessment and Management, LRE est leader d'un WP relatif à la caractérisation du risque environnemental) ou dans le cadre de collaborations avec EDF et l'ANDRA. [IRSN/LRE].

A moyen terme, l'ensemble de ces travaux doit aboutir au développement d'une approche intégrée et homogène pour l'évaluation comparée du risque écologique et sanitaire, prospective ou rétrospective, quelle que soit la typologie du stressseur, et prenant en compte les interactions potentielles. L'outil développé, en collaboration avec EDF notamment, sera dédié au domaine des expositions chroniques (*i.e.* d'une durée significative par rapport à la durée de vie de l'organisme exposé) et à faibles doses (domaine de (éco)toxicité subtoxique) et au contexte de multipollution. Ce dernier sera simplifié par la prise en compte de trois catégories de stressseurs : substances chimiques (incluant les métaux et les micropolluants organiques) et substances radioactives et stress naturel (nutriments, température). Quatre objectifs structurent les travaux planifiés à moyen terme et les résultats attendus :

- Disposer d'une méthode et d'un outil pour l'analyse des expositions : du terme-source aux cibles de protection (écosystèmes - Homme) avec homogénéisation des scénarios, des modèles et des méthodes de paramétrisation et d'analyses de sensibilité et d'incertitude quel que soit le stresser ;
- Prendre en compte l'interaction potentielle des différentes substances en mélange dans l'analyse et la modélisation des effets conjoints de stressers multiples avec deux volets : un volet théorique balayant différents modèles adaptés au domaine de la toxicité chronique à faibles doses et un volet expérimental appliqué à un nombre limité de stressers et de modèles biologiques expérimentaux ;
- Intégrer les avancées en termes méthodologiques pour caractériser le risque écologique et sanitaire, et quantifier les incertitudes numériques associées ;
- Appliquer la méthode et l'outil à plusieurs scénarios types représentatifs de pratiques courantes dans le secteur énergie nucléaire et/ou dans le secteur de l'industrie chimique ; proposer un indicateur de risque écologique qu'il sera possible de comparer à l'information issue des surveillances environnementales. [IRSN/LRE]

iii) Modélisation des transferts de radionucléides

Les missions du laboratoire de Modélisation Environnementale (LME) s'articulent autour de deux axes complémentaires : 1) le développement d'outils de modélisation opérationnels permettant d'évaluer l'évolution des concentrations en radionucléides et les effets potentiellement induits dans l'ensemble des compartiments de la biosphère, 2) le développement de méthodes et d'outils permettant de rationaliser les choix numériques (sélection de valeurs de paramètres,...), et de maîtriser l'incertitude et le niveau de confiance des modèles.

Le LME est à l'origine de plusieurs codes, dont un outil de calcul opérationnel, baptisé « CASTEAUR », qui permet d'estimer les transferts de radionucléides dans les cours d'eau, tant pour les situations de crise que pour les situations de fonctionnement normal des installations. Le LME s'investit désormais en collaboration avec EDF dans le développement de la plate-forme de modélisation « SYMBIOSE », outil d'aide à la modélisation et à l'analyse de l'impact dosimétrique à l'homme induit par la présence d'une contamination radioactive dans l'environnement. Les développements envisagés à plus long terme viseront à :

- étendre ou affiner la modélisation des processus impliqués dans le transfert des radionucléides dans la biosphère continentale ou marine,
- intégrer dans la chaîne de calcul la prise en compte des incertitudes pour accéder à l'évaluation probabiliste du risque, via une densité de probabilité associée à la dose,
- étendre le champ d'application de cet outil à l'évaluation du risque écologique, en termes d'effets sur la faune et la flore, via la modélisation des transferts dans de nouveaux biotopes (hors périmètre humain) et celle des réponses dose-effets,
- et enfin, **étendre le champ d'application de cet outil à l'évaluation du risque induit par des polluants stables (métaux lourds dans un premier temps).** [IRSN/LME]

2) Sensibilité du vivant vis à vis de la toxicité du polluant

2-a) Mécanismes d'adaptation et de transformation des toxiques

IMEP ; CEREGE ; SBTN ; LEMIRE ; LBC, IRSN/LRE

Objectif :

Déterminer les mécanismes d'adaptation et les réponses adaptatives des organismes et le mode de transformation des toxiques en substances moins toxiques

i) Etude des réponses adaptatives en réponse à une exposition chronique (i.e. multigénérationnelle) à un stressor (IRSN/LRE)

La sélection naturelle, mécanisme reconnu pour être la cause première des changements phénotypiques, dirige les processus adaptatifs. La pollution peut jouer un rôle important dans la sélection naturelle. En effet, pour des populations, une évolution rapide de la tolérance à un polluant a déjà été démontrée, notamment à cause des métaux lourds. Ces modifications phénotypiques que l'on peut observer sont la conséquence de deux mécanismes: (i) l'acclimatation qui fait intervenir la plasticité phénotypique des individus et/ou (ii) l'adaptation, impliquant des changements génétiques au sein de la population. En fonction du mécanisme mis en place, les conséquences à long terme peuvent être très différentes.

Or comprendre les mécanismes adaptatifs est une étape fondamentale pour toute étude cherchant à appréhender les conséquences écologiques de l'exposition chronique de populations d'une espèce donnée. En effet, les connaissances sur les changements des caractéristiques phénotypiques et génétiques sur plusieurs générations d'une population face à une perturbation de son environnement, nous permettraient d'évaluer le risque associé à l'exposition chronique à un polluant sur l'extinction de populations et le maintien de la biodiversité. Le projet initié à l'IRSN/LRE dans le cadre d'ENVIRHOM s'intéresse à la mise en évidence et, le cas échéant, à la caractérisation des réponses adaptatives de populations d'invertébrés benthiques (*Chironomus riparius*) soumises pendant plusieurs générations à une exposition à l'uranium *via* le sédiment. Plus précisément, trois questions sont posées : (i) Quelles sont les modifications phénotypiques d'une population de *C. riparius* exposée pendant plusieurs générations successives à un sédiment contaminé à l'uranium? (ii) Ces modifications phénotypiques sont-elles la conséquence d'une acclimatation des individus, ou d'une adaptation de la population? (iii) Les populations pré exposées ont-elles un avantage par rapport aux populations non pré exposées lorsqu'elles sont de nouveau en présence d'U? [IRSN/LRE]

ii) Spéciation de métaux par les microorganismes

Les organismes vivants développent de nombreux mécanismes d'adaptation à la présence de substances toxiques, en limitant leur import ou en les transformant en composés ou éléments moins toxiques et moins disponibles. Nos études ont pour objectif de déterminer au niveau moléculaire les voies d'entrées des espèces chimiques étudiées, de décrire les mécanismes de transformation de ces toxiques, et aussi de suivre l'évolution de la spéciation de ces contaminants.

La réduction d'oxyanions en forme élémentaire métallique moins toxique et moins biodisponible est utilisée par de nombreuses bactéries afin de lutter contre le caractère hautement toxique de ces composés.

Pseudomonas brassicacearum, une rhizobactérie modèle pour les études d'interactions moléculaires plantes-bactéries, a la particularité de réduire les sélénites en sélénium et les tellurites en tellurium (Fig. 4), les mécanismes de réduction de ces oxyanions est envisagée par analyse du transcriptome en utilisant des puces à ADN. [UMR 6191/LEMIRE].

Les travaux du LBC ont pour objectif d'identifier et de caractériser les mécanismes moléculaires de résistance des micro-organismes (bactéries photosynthétiques) à de nombreux toxiques (sélénite, séléniate, cadmium, arsenite et xénobiotiques). Ces problématiques sont abordées par des approches pluridisciplinaires combinant physiologie bactérienne, génétique moléculaire, biochimie structurale et fonctionnelle se focalisent sur l'étude des mécanismes moléculaires d'imports (transporteurs secondaires), de biotransformation (changement d'état redox, méthylation, mono-oxygénation), et de séquestration (chélation) des toxiques, permettant de les caractériser depuis le gène jusqu'à la structure. Les toxiques étudiés englobent le Se, Hg, As, Cd ainsi que les organophosphorés phytosanitaires. [UMR 6191/LBC]

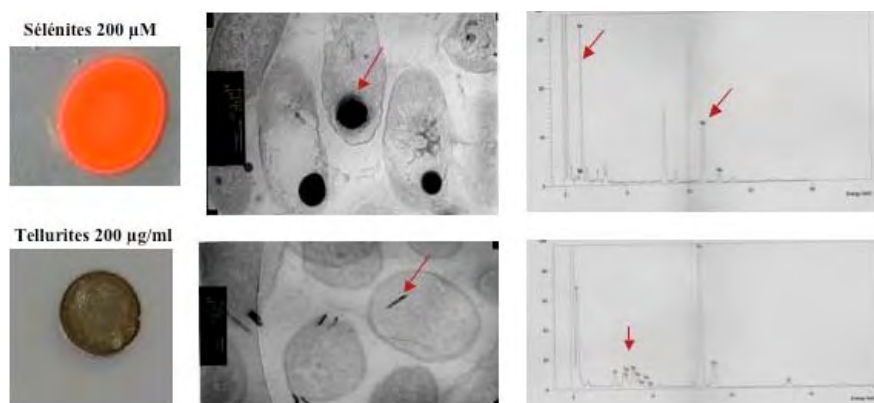


Figure 4 : Réduction de sélénites et de tellurites par *S. maltophilia*. A gauche photographie de colonies bactériennes, au centre observations microscopiques en MET couplé à une sonde EDX (à droite).

Stenotrophomonas maltophilia est une bactérie à Gram négatif, qui est essentiellement étudiée pour sa multiple résistance à différents antibiotiques, cependant aucune étude sur la tolérance aux métaux lourds de cette bactérie n'a été reportée. Nous avons montré que cette bactérie tolère de fortes doses de métaux lourds, sélénites, tellurites, Uranium, plomb et cadmium et de les séquestrer. Elle est capable de séquestrer l'équivalent de 4% de sa biomasse en cadmium. Contrairement aux autres organismes, cette bactérie ne module pas son taux de glutathion en réponse au cadmium, mais augmente fortement son taux de cystéine intracellulaire et produit au moins 3 composés thiolés de structure inconnue (en cours de caractérisation). Certaines bactéries ou organismes eucaryotes séquestrent le cadmium sous forme de CdS dans leurs vacuoles par un mécanisme impliquant le glutathion ou d'autres composés thiolés. Il existe une grande variété de complexants

du cadmium (Cd-phytochélatine, Cd metallothionine...) mais le Cadmium se trouve toujours coordonné au soufre. Lorsque *S. maltophilia* est cultivée sur milieu solide, les spectres XANES sont similaires et assez proches de CdS. Cependant, seulement 20% du cadmium se trouve dans un environnement soufré lorsque les cellules se développent sur un milieu liquide. Des atomes d'oxygènes sont présents autour du cadmium suggérant que la séquestration du cadmium ne nécessite pas forcément une thiolation. Ce résultat montre tout d'abord la force d'une approche pluridisciplinaire (étude de la spéciation couplée à l'approche microbiologique) et le besoin de poursuivre le travail pour mieux comprendre ces nouveaux mécanismes de tolérance au Cd. [CEREGE ; UMR 6191/LEMIRE].

Dans le cas des plantes hyperaccumulatrices, nous chercherons à déterminer tout d'abord les formes d'accumulation des métaux dans les parties aériennes, mais surtout à comprendre le rôle des micro-organismes dans les mécanismes de transformation des métaux (principalement Ni, Co, Mn et Cr). En particulier, une partie du travail portera sur le rôle des mycorhizes à arbuscules (MA) dans la séquestration du nickel et la réduction de sa toxicité vis-à-vis de la plante. Elle consistera dans un premier temps à quantifier les effets de souches MA sur la croissance, la richesse en phosphore et en azote, la concentration en Ni et les symptômes de toxicité de plants de sorgho (plante utilisée ici comme modèle). Cette plante est cultivée en chambre de culture sur un sable alimenté avec une solution nutritive additionnée de solution métallique. Les racines, ainsi que le mycélium du champignon mycorhizien, seront récupérées et une analyse plus fine microscopique à nanométrie de la distribution de Ni sera effectuée afin de vérifier si le nickel est séquestré dans le mycélium et les organes du champignon et à quel niveau précis. Les substances fongiques qui interviennent dans la séquestration des métaux seront également recherchées comme précédemment par HPLC/MS. [CEREGE]

Des études à l'IMEP visent à estimer l'impact des xénobiotiques potentiellement écotoxiques sur le compartiment microbien et les cycles biogéochimiques C, N, P de ces systèmes. Ces travaux prennent en compte le fonctionnement microbien d'écosystèmes terrestres à faibles pressions anthropiques (litières et sols forestiers, agrosystèmes « bio »...), et l'évaluation de l'importance de différents facteurs biotiques (Humidité, température, disponibilité en C,N,P...) sur le fonctionnement de ces systèmes. [IMEP]

2-b Impact et mode d'action des toxiques sur le vivant

SBTN ; LBME ; UMR 6191 (LGBP, LEMIRE, LEMP, LEMS), IRSN/LRE

Objectif :

Déterminer le mode d'action des toxiques à différents niveaux d'organisation du vivant

Un produit toxique est un composé chimique ordinaire qui peut nuire à la santé ou à l'environnement. Sa toxicité n'apparaît le plus souvent qu'à partir d'une certaine concentration. Nos travaux visent à déterminer les doses de toxiques qui perturbent la machinerie cellulaire et à comprendre le mode d'action de ces toxiques à différents niveaux d'organisation du vivant. Ces études nous permettent de caractériser les stratégies de détoxification que mettent en place les différents organismes étudiés. Les toxiques perturbent le fonctionnement de la machinerie cellulaire à différents niveaux de la régulation : transcriptionnelle, post-transcriptionnelle et traductionnelle.

i) Établissement de relations dose-effets sur les grandes fonctions de l'individu, susceptibles d'impacter la démographie d'une population. Effets de stressseurs en mélange : IRSN/LRE

Pour caractériser le risque pour l'environnement, il est nécessaire de quantifier les relations entre les expositions et les effets pour une espèce donnée (relations dose-effet). C'est sur la base de telles connaissances que pourront être élaborés des critères de protection. Ceux-ci pourront être des valeurs limites ou des valeurs guides représentatives de conditions ne provoquant aucun effet sur l'environnement ou correspondant à un risque négligeable. En conséquence, un effort particulier est consacré à la détermination de tels critères pour les radionucléides par des méthodes clairement décrites. Le développement et la mise en œuvre de tests de laboratoire pour l'évaluation des effets revêt une importance particulière pour les radionucléides puisque les suivis écologiques pratiqués aujourd'hui sont en général trop peu sensibles pour permettre de détecter des effets. Dans le cadre d'ENVIRHOM, la priorité est donnée à la conception et au développement de tests d'écotoxicité chronique à l'échelle d'une ou plusieurs générations.

Une fois internalisé, le polluant est distribué et biotransformé selon une gamme étendue de processus métabolique, fonction de l'élément et/ou de l'espèce. Seule une fraction de cette quantité internalisée est biologiquement active en termes de toxicité. D'un point de vue opérationnel, la connaissance de cette quantité « critique » et de sa cible biologique marque la transition entre le domaine sans effet et le domaine de la toxicité.

Chez divers espèces d'invertébrés d'eau douce exposés à l'uranium même à de faible concentration (20µg/L), le métal est séquestré au sein de granules pluriélémentaires (Fe, Ca, P), dont la majorité est déposée près de mitochondries, pouvant donc engendrer un dépôt d'énergie lié aux particules alpha émises à l'échelle locale.

Pour l'uranium(VI) ou le sélénium(IV), les effets toxiques sur des populations phytoplanctoniques sont corrélés avec la quantité de métal intracellulaire (Figure 5), l'inhibition de la croissance de la population n'apparaissant de manière significative qu' à partir d'un seuil.

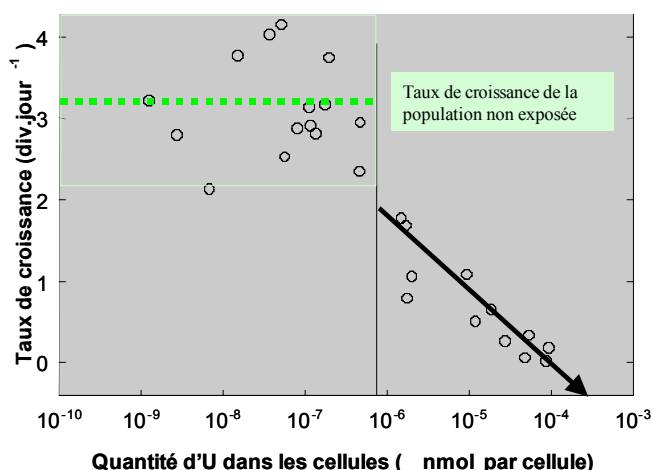


Figure 5: Relation entre l'inhibition de la croissance (en division par jour) et la quantité d'uranium internalisée par les cellules pour des populations d'algues

unicellulaires exposées à l'uranium en solution (pH 5). A partir d'un quota intracellulaire de 10^{-6} nmole d'uranium, le taux de croissance diminue de manière linéaire

Les effets biologiques susceptibles de se produire en réponse à la fraction biologiquement active du radionucléide internalisé peuvent s'exprimer à différents niveaux d'organisation biologique : depuis le niveau subcellulaire jusqu'au niveau individuel, et populationnel. La stratégie d'ENVIRHOM est **d'étudier les relations dose-effets en première approche pour des réponses macroscopiques au niveau des grandes fonctions de l'individu, susceptibles d'impacter la démographie d'une population**. Ces fonctions, ou traits d'histoire de vie, sont principalement la survie des différents stades d'une espèce au cours de son cycle de vie, sa capacité reproductive, et l'âge de maturité pour la première reproduction. Les recherches au niveau subcellulaire sont réservées à la compréhension des mécanismes de toxicité élémentaires.

Les effets de stressseurs en mélange par rapport aux effets de chacun des stressseurs pris isolément sont mal connus. Les effets potentiels conjoints de stressseurs multiples (physiques ou chimiques, stables ou radioactifs) en condition d'exposition chronique à faible dose sont étudiés en laboratoire dans l'objectif de supporter la compréhension et la modélisation des interactions potentielles.

Les méthodes en cours de développement visent à identifier les effets super-additifs ou synergiques ou les effets antagonistes. Le principe consiste à établir des relations doses-effets pour chaque substance séparément puis d'étudier la réponse obtenue lors de mélanges binaires. Cette réponse expérimentale est comparée aux relations modélisées sur la base d'hypothèse d'addition des doses (isoaddition) ou d'addition des effets (heteroaddition). La figure 6 montre comment la toxicité de l'uranium sur la croissance d'une algue verte est modifiée selon la présence de sélénium ou de cadmium dont les actions toxiques sont bien connues. Le mélange uranium+cadmium présente un effet synergique, tandis que le mélange uranium+sélénium est antagoniste. [IRSN/LRE]

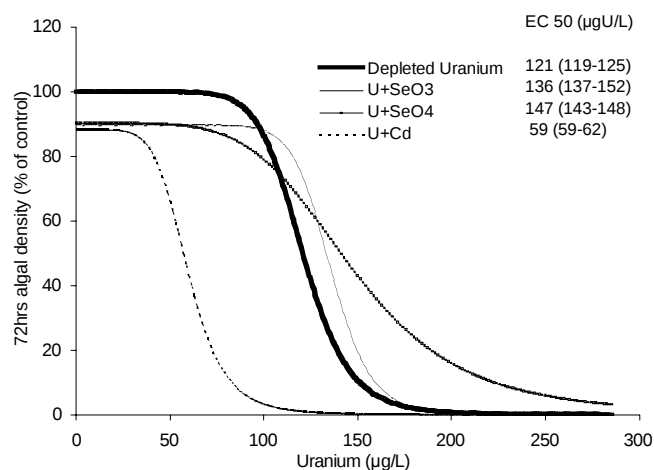


Figure 6: Effet de l'uranium seul ou en mélange avec du sélénium ou du cadmium, sur la croissance d'une population d'algues unicellulaires (inhibition de croissance au bout de 72h d'exposition à pH 5). Les concentrations d'exposition en sélénium ou en cadmium utilisées sont celles impliquant 10% d'effet (i.e. 60, 0.96 and 42 µg/L of selenite Se(IV), selenate Se(VI) et cadmium respectivement). La concentration en uranium induisant 50% d'effet selon les conditions de mélange étudiées sont rapportées à droite du graphe.

ii) Etude de l'ensemble des modifications de l'expression de gènes et protéines générés par les toxiques

Pour expliquer les effets des composés toxiques au niveau le plus fin possible, nous avons recours aux concepts et méthodes génomiques et post-génomiques les

plus avancés, comme l'étude de l'ensemble des modifications de l'expression des gènes et des protéines.

L'homme

Le SBTN à Marcoule développe une approche intégrée de ces mécanismes dans des lignées humaines (modèles cellulaires rénal, pulmonaire et immunitaire). En utilisant la transcriptomique et la protéomique, (figure 7) il a été possible de décrire les modes d'action de divers toxiques métalliques : sels d'uranyle (programme de toxicologie nucléaire du CEA), de cobalt (programme collaboratif avec EDF). De telles études permettent de mettre en évidence des voies de signalisation spécifiques de l'entrée de l'ion métallique qui permettent d'envisager à terme des biomarqueurs. L'analyse globale des mécanismes de réponse au stress métallique permettent aussi de proposer des solutions thérapeutiques car elles fournissent des indications précieuses sur la cinétique et la(les) cible(s) qu'il faut viser. L'étude cinétique de la réponse permet aussi de déterminer les modalités cellulaires du passage d'un scénario réversible d'intoxication à celui où la cellule, entrée dans un mode irréversible comme l'apoptose voire la nécrose, ne pourra être sauvée. Un regard particulier est porté sur la phase intermédiaire où la situation est encore réversible mais où le risque de mise en place d'un contexte pathogène est élevé.

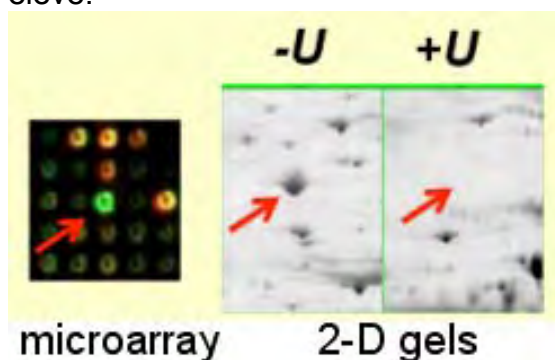


Figure 7 : A gauche, analyse de transcriptome, le spot vert correspond à une répression de la transcription de HSP90. Les analyses en 2-D PAGE montrent la disparition de la protéine correspondante.

Les études conduites sur les sels métalliques ont d'ores et déjà permis de proposer plusieurs candidats biomarqueurs, accessibles au dosage dans les fluides biologiques, dont certains signent spécifiquement un ion ou une forme chimique particulière de ces ions toxiques (formes soluble vs insoluble ; effet du contre-ion). Il convient également de rappeler dans ce paragraphe le rôle clé joué par l'analyse bioinformatique (traitement des données, modélisation fonctionnelle) et un effort particulier a été fait au SBTN dans cette direction. La qualité de l'analyse dépendant largement de la qualité des données expérimentales, une attention particulière est portée aux processus de standardisation, de traçabilité, et de reproductibilité des analyses. [SBTN/CEA]

Une étude réalisée au LBME sur la réponse de fibroblastes humains et des lignées murines de pré-adipocytes traités par As III et AS V, a révélé que les effets carcinogènes de l'Arsenic III seraient liés à la fois au stress oxydatif et au déséquilibre entre prolifération et différenciation cellulaire. À l'inverse, les composés du Gallium ne paraissent induire ni cytotoxicité ni de modifications d'expression génique. Dans les associations arsenic/gallium, le danger proviendrait donc uniquement de l'arsenic. [LBME]

Arabidopsis thaliana

Les réponses transcriptionnelles des feuilles et des racines d'*A. thaliana* ont été analysées en utilisant des biopuces CATMA (Complete Arabidopsis Transcriptome MicroArray) contenant 24,576 gènes d'*A. thaliana* en réponse au cadmium. L'analyse des résultats a permis de mettre en évidence au niveau des racines que l'expression d'un grand nombre de gènes impliqués dans l'assimilation, la réduction et l'incorporation du soufre est modulée en réponse au cadmium dès 2h d'exposition. Nos résultats montrent qu'en présence de cadmium, le métabolisme du soufre est activé et dirigé au profit d'une production massive de glutathion. Il est intéressant de noter que cette régulation n'a pas été détectée au niveau des feuilles. Par ailleurs, suite à une exposition au cadmium, le contenu en glutathion diminue pour permettre la synthèse de phytochélatines dans les racines. En revanche dans les feuilles, seul le contenu en phytochélatines augmente en réponse au cadmium, le pool de glutathion n'étant pas affecté. Au niveau des feuilles, une induction très précoce (dès 2h) des gènes codant les enzymes impliquées dans la voie de biosynthèse des phénylpropanoïdes a été observée ainsi que de deux facteurs de transcription décrits comme étant responsables de la régulation de la biosynthèse des anthocyanes. L'ensemble de ces résultats suggère qu'il existe des voies de régulation différentes des mécanismes de détoxification entre les feuilles et les racines mais aussi que les mécanismes de perception, de signalisation et de détoxification sont affectés différemment au cours du temps en fonction des concentrations de cadmium utilisées. [UMR6191/LEMS]

Des études sont conduites sur les modifications post-transcriptionnelles de l'expression génétique suite à un empoisonnement chronique au cadmium. Une mise au point de la méthodologie du "traductome" où les ARNs polysomaux a été réalisée pour interroger des microarrays en comparaison avec des ARN totaux. Cette méthodologie a été appliquée à des systèmes cellulaires soumis au cadmium et nous a permis de mettre en évidence plusieurs classes d'ARNm suivant leur devenir traductionnel, l'abondance de ces classes étant variable suivant les stress (comparaison cadmium/ stress nutritif). L'originalité de ces travaux est de montrer que, pour une classe d'ARNm, la traduction et la transcription peuvent être découplées. Certains ARNm subissent une forte activation traductionnelle en quasi-absence d'activation transcriptionnelle alors que d'autres subissent, au contraire, une répression traductionnelle en l'absence de répression transcriptionnelle. Alors que l'abondance des populations dans ces classes est relativement faible dans le cas de la carence nutritive, elles représentent la majorité des ARNs dans le cas de l'intoxication au cadmium. [UMR 6191/ LGBP].

La levure

Une équipe du SBTN développe un modèle d'étude chez *S. cerevisiae* de l'impact des toxiques environnementaux sur l'import-export nucléaire. Ce système est fondé sur des constructions génétiques à type « simples hybrides » et un crible phénotypique colorimétrique à haute capacité. Il permet aussi bien l'analyse exhaustive de chimiothèque sur la fonction d'import nucléaire mais aussi de sélectionner les protéines spécifiquement relocalisées au noyau dans des conditions environnementales données à partir de bibliothèques de gènes de toutes provenance (levure, bactéries, plantes, homme). Dans la mesure où ces voies de régulation et ces mécanismes sont très conservés dans l'évolution, les conclusions tirées du modèle levure se sont avérées facilement transposables à l'Homme. On peut citer l'exemple de la relocalisation de p53 humain qui a pu être étudiée sous l'effet de stress métallique (Cd, Hg) ou radiatifs isolés ou cumulés. Les effets synergiques de

stress sont détectés de façon particulièrement sensible dans ce système semi-quantitatif. Fait notable, la sensibilité du système développé à Marcoule permet de travailler avec des protéines en abondance naturelle, ce qui est souvent impossible dans les stratégies de microscopie à base de fusions GFP où il est nécessaire de sur-exprimer les protéines étudiées, une contrainte qui biaise la physiologie. [SBTN/CEA]

Pseudomonas brassicacearum

P. brassicacearum est une bactérie qui a la particularité de présenter un phénomène de variation de phase qui génère des variants qui sont affectés dans le métabolisme secondaire. Même si la bactérie d'origine (phase I) et son variant (phase II) ne montrent pas de différences au niveau des doses tolérées de Cd, le dosage de Cd lié ou intracellulaire est cinq fois plus élevé chez les cellules en phase II. C'est pour cette raison qu'il nous a semblé important d'étudier le mode de toxicité de ce métal en relation avec la variation de phase. L'analyse du transcriptome des deux phases cellulaires en réponse à la toxicité de Cd, révèle que la variation phénotypique permet deux stratégies d'adaptation différentes à la toxicité du métal. Les cellules en phase I résistent par un mécanisme d'évitement, en restructurant la paroi, en remplaçant le lévane par l'alginate, en surexprimant un système d'efflux et en réprimant les transporteurs de cations qui pourraient faciliter la pénétration du cadmium. Les cellules en phase II s'avèrent incapables d'empêcher le Cd d'entrer dans la cellule, par contre elles sont efficaces dans la mise en place de système de réparation des dommages générés par le Cd. En réponse au Cd, la bactérie réprime les gènes impliqués dans la mobilité pour détourner cette énergie vers la surexpression de gènes codant pour des anti-oxydants comme la putrescine et des osmoprotectants tels que le tréhalose. Nous n'avons pas mis en évidence de modulation du métabolisme du soufre comme démontré chez *A. thaliana*. [UMR 6191/LEMIRE]

Deinococcus deserti

L'exposition de *D. deserti* à une forte dose de rayonnement gamma, ou à une longue période de dessiccation, génère la fragmentation de son génome (cassures doubles brins de l'ADN), mais cette bactérie a la capacité de le réparer en quelques heures en milieu appauvri. Le génome de *D. deserti* VCD115, dont la taille est d'environ 3,8 Mb, a été séquencé très récemment (Génoscope, Evry). Un premier assemblage a été obtenu et l'analyse de la séquence, incluant l'annotation et la génomique comparative avec le génome de *D. radiodurans*, est actuellement en cours. La séquence du génome de *D. deserti* VCD115 permettra de mettre en évidence à la fois des points communs entre les deux génomes (*D. deserti* VCD115 vs *D. radiodurans* R1), les différenciant de génomes complets de bactéries radio-sensibles, et également des gènes uniques à VCD115. La génomique comparative et également d'autres approches globales (transcriptomique, protéomique) seront utilisées afin d'identifier les gènes et les protéines candidates. Ensuite, des approches ciblées (génétiques, biochimiques, structurales) seront utilisées pour étudier le rôle des gènes et protéines identifiés dans les mécanismes de radio-tolérance et de réparation de l'ADN. Nous développerons pour cela des outils génétiques chez *D. deserti*, incluant la construction des souches mutantes qui seront ensuite caractérisées pour leur viabilité après irradiation et dessiccation et leur capacité à réparer les cassures de l'ADN. Les protéines candidates seront étudiées par des approches biochimiques et structurales. [UMR 6191/LEMIRE]

iii) Effet indirect des toxiques : production des espèces actives de l'oxygène

Les différentes études menées au sein de la future fédération de recherche ont montré que la toxicité de la plupart des toxiques étudiés se traduisait souvent par la génération d'un stress oxydatif lié à la formation d'espèces actives de l'oxygène (EAO) toxiques (radical hydroxyle, radical superoxyde, peroxyde d'hydrogène).

Des équipes de la future fédération de recherche s'attachent donc à définir les mécanismes de toxicité indirecte, liés aux perturbations dans la production de différentes espèces de l'oxygène. Cette étude s'appuie sur l'analyse des voies de production des espèces actives de l'oxygène, la caractérisation des voies de signalisation du stress oxydant, pour une meilleure connaissance des effets biologiques, directs ou induits par ces espèces.

Bien que le cadmium ne soit pas un métal rédox, sa toxicité a été clairement liée à un stress oxydant, avec des peroxydations lipidiques, l'oxydation de protéines et des dommages sur l'ADN. L'origine de ce stress oxydant n'est pas bien connue.

Chez *A. thaliana*

Parmi les manifestations les plus significatives du stress oxydant induit chez les plantes par le cadmium la peroxydation des lipides. Celle-ci peut dépendre de voies, enzymatique, impliquant le couple lipoxigénase (LOX)/ Lipide acyle hydrolase (patatine), et non enzymatique, induite par les EAO. Nos résultats montrent que ces 2 voies sont induites chez *Arabidopsis* lors d'une exposition à de fortes doses de cadmium. D'autre part, nos travaux indiquent que ce métal provoque l'expression de 3 gènes codant des LOX et de trois gènes codant des patatines. Ces données ont pu être confirmées grâce à l'analyse des données transcriptomiques obtenues au laboratoire. L'objectif de notre étude vise à comprendre le rôle physiologique du processus d'oxydation des lipides qui se déclenche en réponse au cadmium.

Nous chercherons également à mieux comprendre le rôle physiologique du processus d'oxydation des lipides qui se déclenche en réponse au cadmium. Plus particulièrement, de déterminer s'il s'agit d'un phénomène délétère aboutissant à la dégradation des lipides et à la mort cellulaire, ou bien si cet événement oxydant est à l'origine de signaux cellulaires spécifiques (oxylipines). L'étude de la composante enzymatique de la peroxydation des lipides est en cours. Différentes lignées mutantes affectées dans des gènes LOX et patatines ainsi que des lignées transgéniques sur-exprimant ces gènes ont été obtenues. Leur caractérisation moléculaire et physiologique sera poursuivie. [UMR 6191/LEMS]

Le Laboratoire d'Ecophysiologie Moléculaire des Plantes développe et utilise des méthodes biophysiques et d'imagerie pour analyser de manière non-invasive les dégâts cellulaires et les réponses physiologiques des plantes soumises aux contraintes de l'environnement. Les méthodes biophysiques développées (fluorescence chlorophyllienne, thermoluminescence, photoacoustique, spectrométrie de masse, ...) permettent notamment d'étudier les processus de la photosynthèse à l'échelle de la cellule, de la feuille ou de la plante. Les méthodes d'imagerie basée sur la mesure de l'émission infra-rouge ou de la fluorescence des chlorophylles permettent de cartographier les variations de températures liées à la transpiration des plantes ou différents processus photosynthétiques. Récemment, une nouvelle méthode d'imagerie basée sur la mesure de la luminescence spontanée a été développée pour visualiser et quantifier l'état d'oxydation de l'organisme et l'intensité des peroxydations lipidiques. Ces outils sont combinés à

des méthodes biochimiques comme, par exemple, l'analyse des produits d'oxydation des lipides ou de la concentration de différents molécules antioxydantes et à une approche génétique (mutants). Nous sommes particulièrement intéressés par les mécanismes de protection du chloroplaste qui permettent à la plante de résister au stress oxydant, qu'il soit induit par les radiations lumineuses ou les métaux lourds. Ces mécanismes de résistance incluent les antioxydants des membranes chloroplastiques (caroténoïdes, vitamine E) ou les systèmes enzymatiques de détoxification des peroxydes de lipides ou de réparation des protéines oxydées. [UMR 6191/LEMP]

Chez *E. coli*

Le LIPM a entrepris l'étude du lien entre stress cadmium et stress oxydant chez *E. coli* dans le cadre du programme ToxNuc-E SIDDERE. L'utilisation de mutants déficients en systèmes de détoxification du superoxyde ou des peroxydes, a révélé que la toxicité du cadmium dès les faibles doses est spécifiquement liée à la présence d'ions superoxyde dans la cellule. L'hypothèse de travail est que cette toxicité pourrait s'expliquer en partie par l'existence de cibles communes pour ces deux toxiques, comme l'aconitase, protéine à centre Fe_4S_4 , oxydée par le superoxyde. L'activité aconitase, inhibée par l'ion superoxyde, n'est que partiellement restaurée sur des extraits cellulaires en présence de Cd^{2+} . En parallèle, des mesures par RPE montrent une augmentation de la concentration intracellulaire en fer libre sur les souches exposées au cadmium. Ces études se poursuivent par la mesure des interactions Cd^{2+} -aconitase sur l'enzyme purifiée. [UMR 6191/LIPM]

iv) Génotoxicologie et toxico-cancérogénèse (LBME)

Ces études visent à déterminer le risque d'apparition d'altérations ou de mutation du patrimoine génétique sur cellules somatiques (association au risque de cancer) et germinales (association au risque de réduction de la fertilité). Elles participent également à la recherche de signatures moléculaires spécifiques des toxiques ou des pathologies qu'ils induisent. Les actions de recherche initiées et mises en œuvre au Laboratoire de Biogénotoxicologie et Mutagenèse Environnementale ont pour objectif :

- de développer l'application *in vitro* et *ex vivo* des tests de génotoxicité tels que le test des comètes, la numération des micronoyaux associée à l'hybridation « in situ » de sondes pancentromériques fluorescentes (FISH), la détection spécifique des adduits sur les protéines et sur l'ADN par immunocytochimie et les biomarqueurs du stress oxydatif cellulaire.

- d'étudier les risques génotoxiques et mutagènes des expositions aux faibles doses de rayonnements ionisants et de proposer un protocole de biosurveillance par application de biomarqueurs d'exposition *ex vivo* tels que le test de numération des micronoyaux dans les lymphocytes binucléés en culture associé à la FISH et le dosage de la 8-oxo-désoxy-guanosine urinaire.

- de déterminer les mécanismes de la génotoxicité de nuisances environnementales telles que les UV solaires, les métaux lourds et des nanoproduits (notamment nanomaghémite et nanoparticules d'oxydes de cérium) sur des cultures de lymphocytes, de kératinocytes, de mélanocytes et de fibroblastes humains. Pour ces derniers, à l'heure où une politique de gestion des risques liés aux nanotechnologies se met en place de manière quasi concomitante à leur développement, il s'avère capital de comprendre les mécanismes de toxicité observés au niveau cellulaire pour

bien appréhender le potentiel toxique de ces matériaux sur la santé humaine. L'un des moyens reconnus pour rendre compte de la probabilité des effets cancérigènes, tératogènes mais également du vieillissement cellulaire prématuré, est de mettre en œuvre des tests de toxicologie génétique pouvant rendre compte des altérations du génome en rapport avec la phase d'initiation de la cancérogenèse à participation. Ces études sont conduites en partenariat avec l'UMR 6635 CEREGE.

- d'étudier la génotoxicité des HAP chez les salariés des entreprises du pourtour de l'Etang de Berre par l'application *ex vivo* de biomarqueurs d'exposition génotoxique notamment la mise en évidence d'adduits sur l'ADN par immunohistochimie et la détermination des lésions primaires de l'ADN par le test des comètes. L'objectif visé est la mise en place de mesures de prévention efficaces validées par une application cinétique des biomarqueurs.

- de développer un modèle de culture de cellules germinales de rats applicable à la détermination de la génotoxicité de nuisances environnementale telles que les rayonnements ionisants et les métaux lourds et au développement de biomarqueurs de toxicité vis-à-vis de la méiose. Plusieurs études ont mis en évidence une décroissance des paramètres du sperme chez les donneurs fertiles au cours des cinquante dernières années dans les pays industrialisés. Actuellement, 15% des couples consultent pour infertilité au cours de leur vie reproductive, les troubles de la reproduction sont donc une pathologie fréquente. La découverte des perturbateurs endocriniens et l'augmentation constante des toxiques pour la reproduction référencés ouvrent une nouvelle aire de recherche dans les causes d'infertilité. Ces recherches sont d'autant plus importantes et intéressantes que l'appareil reproducteur est également touché par une augmentation très importante du nombre des cancers du testicule, qui pourrait également être liée à des facteurs environnementaux. L'impact des agents génotoxiques sur les cellules germinales est particulièrement important à évaluer. En effet, les lésions induites sur l'ADN des cellules germinales sont potentiellement transmissibles à la descendance des individus exposés. Notre équipe développe une approche *in vitro* par la mise au point d'une technique originale de co-culture de cellules germinales et cellules de Sertoli de rat couplée au test des comètes.

- de développer l'application de biomarqueurs de génotoxicité (comètes, adduits, micronoyaux) aux spermatozoïdes de patients consultant pour infertilité. L'étude est associée à une enquête étiologique en vue de rechercher la responsabilité de l'environnement professionnel et à des dosages de xénobiotiques inorganiques et organiques dans le liquide séminal. Ce travail est programmé en partenariat avec l'UMR 6635 CEREGE et avec le Laboratoire de Chimie de l'Environnement (LCE, Université de Provence)

- de réaliser des études de cytogénotoxicité des nanoproducts utilisés en cosmétologie (notamment nanoparticules d'oxydes de titane) au moyen d'une approche thermodynamique (microcalorimétrie pour déterminer la cytotoxicité globale sur la bioénergétique cellulaire), oxymétrie (pour déterminer la cytotoxicité mitochondriale), biogénotoxicologique et toxicogénomique. Ce travail est effectué en partenariat avec l'UMR 6635 CEREGE

- de contribuer à la proposition d'une alternative à l'expérimentation animale pour répondre efficacement à la réglementation REACH sur les produits chimiques qui oblige désormais l'industriel à démontrer l'innocuité de son produit vis à vis de la santé humaine. Ceci est un changement majeur par rapport à la démarche précédente dans laquelle il était demandé une évaluation de la toxicité du produit.

faut donc repenser totalement la stratégie de test des produits chimiques. L'objectif général de ce projet est d'établir une démarche stratégique de tests basée sur des méthodes alternatives à l'expérimentation animale, prédictive de l'innocuité de produits chimiques vis à vis de l'homme. Les modèles cellulaires étudiés seront des hépatocytes et des fibroblastes humains, des kératinocytes issus d'épiderme humain reconstitué et des cellules pré-adipocytaires de souris. Les études mises en œuvre seront la cytotoxicité, la génotoxicité, l'impact sur le transcriptome et la plasticité génomique. Trois grandes familles seront ainsi abordées : les métaux au travers de l'arsenic, les pesticides au travers de l'endosulfan et les biocides au travers du formaldéhyde.

- de produire des connaissances sur les mécanismes de synthèse des adduits exocycliques sur l'ADN par les composés aromatiques nitrés (CANs) présents dans l'environnement et de proposer un modèle mécanistique passant par la production d'espèces radicalaires. Ce mécanisme fait appel à la peroxydation lipidique, elle-même induite par les espèces réactives de l'oxygène générées au cours de la bioactivation des CANs. La peroxydation lipidique s'accompagne de la production d'aldéhydes mono-insaturés telles que le malondaldéhyde ou le 4-hydroxy-2-nonanal notamment. Ces dernières sont responsables de la production des adduits exocycliques, notamment éthéno et propano-adduits sur les bases de l'ADN. La compréhension des mécanismes de formation de ces adduits, l'étude de leur stabilité, de leur réparabilité et de leurs modes d'élimination constitue une approche prometteuse dans la compréhension des effets génotoxiques du stress oxydatif et dans la recherche de nouveaux biomarqueurs. Ce travail est réalisé en partenariat avec le Laboratoire de Chimie de l'Environnement (LCE Université de Provence)

2-c Identification et caractérisation des protéines cibles des toxiques

SBTN ; UMR 6191 LIPM

Objectif

Déterminer les éléments de réponse à l'intoxication, susceptibles d'être la cible ou le marqueur du toxique

La toxicité de métaux peut résulter d'interactions directes entre le métal et des composés cellulaires, en particulier des protéines dont ils inhiberaient le fonctionnement.

Les méthodologies utilisées au SBTN (cf 2-b) fournissent des protéines « cibles » qu'il faudra caractériser d'un point de vue structural et énergétique. Ces protéines « cibles » sont des protéines susceptibles de lier, transformer ou accumuler spécifiquement un composé toxique. À ce titre, les connaître est une étape essentielle dans le diagnostic, la prévention du risque pathogène ou la remédiation thérapeutique. Le SBTN s'est doté d'une plate forme spécialisée dans le clonage, la surexpression et la purification des protéines cibles de composés toxiques. Ceci ouvre la voie à des caractérisations avancées : analyse cristallographique des complexes cible-toxique, mesure des paramètres thermodynamiques et/ou cinétiques utiles à la construction des modèles toxicocinétiques, etc... Disposer de protéines purifiées permet aussi d'envisager le développement de tests diagnostics et les outils de recherche via la préparation d'anticorps et d'antigènes traceurs. [SBTN/CEA]

Les travaux menés au LIPM ont pour objectif d'identifier les protéines cibles du cadmium chez *Escherichia coli* par l'utilisation de ^{109}Cd (émetteur γ) et la mise au point de techniques de séparation par gels d'électrophorèse bidimensionnels en conditions non dénaturantes. Ces travaux ont permis de mettre en évidence 5 à 6 cibles du Cd, et ceci suite à l'exposition à de faibles doses de cadmium (1 et 10 μM Cd). L'identification des protéines est réalisée par spectrométrie de masse. Deux des 6 cibles ont été identifiées et confirmées par la construction de mutants où le gène codant pour ces enzymes a été délété. Quatre autres cibles sont en cours d'analyse. Les interactions protéine-Cd seront analysées *in vitro* pour les cibles identifiées, par les méthodes spectroscopiques développées au laboratoire et dans le cadre de collaborations appropriées. Ces approches permettront d'identifier des combinaisons de ligands et des motifs structuraux présentant une forte affinité et relative sélectivité pour le Cd dans le contexte cellulaire.

En parallèle de l'identification et de l'analyse des interactions métal-protéine se produisant *in vivo*, nous analysons les propriétés des sites métalliques dans les protéines d'un point de vue plus fondamental, par des approches couplées de biologie moléculaire et de biophysique. Ces études devraient permettre à terme d'identifier ou de développer de nouvelles bio-molécules chélatantes non toxiques et spécifiques vis-à-vis de métaux toxiques ou radionucléides dans des buts de bio-dépollution.

Nous nous appuyons sur deux approches novatrices de spectroscopie IRTF, la micro-dialyse couplée à un système ATR-IRTF et l'exploration du domaine IR lointain ou contribuent les vibrations métal-ligand. Nous adapterons également des approches de spectrométrie de masse encore peu développées pour étudier les interactions métal-ligand. Ces deux approches seront utilisées de façon complémentaire. La spectroscopie IRTF en mode différentiel permettra d'identifier la nature chimique des ligands impliqués dans la fixation du métal et le rôle de motifs structuraux à distance du métal sur les propriétés du site métallique. La spectrométrie de masse, par l'analyse d'interactions non covalentes, et par des approches d'échange H/D et de protéolyse ménagée, permettra de localiser les ligands du métal sur la séquence protéique et de déterminer des zones d'interaction au sein des protéines. Les aspects spectrométrie de masse seront développés par David LEMAIRE. L'achat d'un spectromètre de masse ESI-Q-TOF est en cours, grâce à un financement CNRS/CEA/Région PACA. Lorsque ce sera possible, les données ainsi obtenues seront complétées par des approches structurales par spectroscopie de RMN ou la cristallisation et la diffraction de rayons X. [UMR 6191/LIPM].

PUBLICATIONS

1. AUFFAN M., DECOME L., ROSE J., ORSIERE T., DE MEO M., BRIOIS V., CHANEAC C., OLIVI L., BERGE-LEFRANC J-L., BOTTA A., WIESNER M.R., BOTTERO J-Y., (2006) *'In Vitro Interactions between DMSA-coated Maghemite Nanoparticles and Human Fibroblasts: a Physico-chemical and Cyto- Genotoxic Study*, Environmental Science and Technology, 40, 4367-4373.
2. BION L., ANSOBORLO E., MOULIN V., REILLER P., COLLINS R., GILBIN R., FÉVRIER L., PERRIER T., DENISON F., COTE G. (2005). Influence of thermodynamic

database on the modelisation of americium(III) speciation in a simulated biological medium. *Radiochimica Acta* 93, 715–718.

3. C. BOTTA, G. IARMACOVAI, F. CHASPOUL, I. SARI-MINODIER, J. POMPILI, T. ORSIERE, J.L. BERGE-LEFRANC, A. BOTTA, P. GALLICE AND M. DE MEO. (2006) Assessment of occupational exposure to welding fumes by inductively coupled plasma-mass spectroscopy (ICP-MS) and by the alkaline comet assay. *Environ Mol Mutagenesis*, 47, 4, 284-95.
4. CHANAL A., CHAPON V., BENZERARA K., BARAKAT M., CHRISTEN R., ACHOUAK W., BARRAS F. & HEULIN T. (2006). The desert of Tataouine: an extreme environment that hosts a wide diversity of microorganisms and radiotolerant bacteria. *Environ. Microbiol.*, 8, 514-525
5. COSIO, C., P. VOLLENWEIDER & C. KELLER (2006) Localization and effects of phyto-extracted cadmium in leaves of tolerant willows (*Salix viminalis* L.) I. Macrolocalisation and phytotoxic effects of cadmium. *Environmental and Experimental Botany*, 58, 64-74.
6. DE GROOT A., CHAPON V., SERVANT P., CHRISTEN R., FISCHER-LE SAUX M., SOMMER S. & HEULIN T. (2005). *Deinococcus deserti* sp. nov., a gamma-radiation-tolerant bacterium isolated from the Sahara Desert, *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 55, 2441-2446.
7. DUPEYRAT F., VIDAUD C., LORPHELIN A. & BERTHOMIEU C. (2004). Long distance charge redistribution upon Cu, Zn-superoxide dismutase reduction: Significance for dismutase function. *J. Biol. Chem.*, 279(46), 48091–48101.
8. G. IARMARCOVAI, I. SARI-MINODIER, F. CHASPOUL, C. BOTTA, M. DE MEO, T. ORSIERE, J.L. BERGE-LEFRANC, P. GALLICE, A. BOTTA. (2005) Risk assessment of welders using analysis of eight metals by ICP-MS in blood and urine and DNA damage evaluation by the comet and micronucleus assays. Influence of XRCC1 and XRCC3 polymorphisms. *Mutagenesis*, 20, 6, 425-432
9. IARMARCOVAI G., I. SARI-MINODIER, T. ORSIÈRE, M. DE MÉO, P. GALLICE, C. BIDEAU, D. INIESTA, J. POMPILI, J.L. BERGE-LEFRANC AND A. BOTTA. (2006) A combined analysis of XRCC1, XRCC3, GSTM1 and GSTT1 polymorphisms and centromere content of micronuclei in welders. *Mutagenesis*, , 21(2), 159-165
10. GABANT G, AUXILIEN S, TUSZYNSKA I, LOCARD M, GAJDA M, CHAUSSINAND G, FERNANDEZ B, DEDIEU A, GROSJEAN H, GOLINELLI-PIMPANEAU B, BUJNICKI J, ARMENGAUD J. (2006) THUMP from archaeal tRNA :m²G10 methyltransferase, a genuine autonomously folding domain. *Nucleic Acids Res.* 34, 2483-2494.
11. GODON C, COULLET S, BAUS B, ALONSO B, DAVIN AH, DELCUZE Y, MARCHETTI C, HAINAUT P, KAZMAIER, QUÉMÉNEUR E. (2005) Quantitation of p53 nuclear relocation in response to stress using a yeast functional assay : effects of irradiation and modulation by heavy metal ions. *Oncogene* 24, 6459-6464.
12. HAVAUX M., TRIANAPHYLIDES C., GENTY B. Autoluminescence imaging: a non-invasive tool for mapping oxidative stress. *Trends Plant Sci.*, sous presse
13. HERBETTE S., TACONNAT L., HUGOUIVIEUX V., PIETTE L., MAGNIETTE M.L., CUINE S., AUROY P., RICHAUD P., FORESTIER C., BOURGUIGNON

- J., RENOU J.P., VAVASSEUR A., LEONHARDT N. Genome-wide transcriptome profiling of the early cadmium response of *Arabidopsis* roots and shoots. *Biochimie* (sous-presse).
14. KITTIWORAKARN J, LECOQ A, MOINE G, THAI R, LAJEUNESSE E, DREVET P, VIDAUD C, MENEZ A, LEONETTI M. (2006) HIV-1 Tat raises an adjuvant-free humoral immune response controlled by its core region and its ability to form cysteine-mediated oligomers. *J. Biol. Chem* 281, 3105-3115.
 15. KLONOWSKA A., HEULIN T. & VERMEGLIO A. (2005). Selenite and tellurite reduction by *Shewanella oneidensis*. *Appl. Env. Microbiol.*, 71(9), 5607-5609.
 16. LABILLE J., BRANT J., VILLIERAS F., PELLETIER M., THILL A., MASION A., WIESNER M., ROSE J., BOTTERO J.-Y. (2006). "Affinity of C60 fullerenes with water." *Fullerene Nanotubes and Carbon Nanostructures.*, 14: 307-314.
 17. MADOZ-ESCANDE C., SIMON O. (2006) Contamination of terrestrial gastropods *Helix aspersa Maxima* with ¹³⁷Cs, ⁸⁵Sr, ¹³³Ba and ^{123m}Te by direct, trophic and combined pathways. *Journal of Environmental Radioactivity*, 89 (1), 30-47
 18. MOLINA-HEREDIA F. P., HOUÉE-LEVIN C., BERTHOMIEU C., TOUATI D., FAVAUDON V., ADAM V., BOURGEOIS D. & NIVIÈRE V. (2006). Detoxification of superoxide without production of H₂O₂. A new antioxidant activity of superoxide reductase complexed with ferrocyanide. *PNAS* (sous presse).
 19. NICOLAI M., RONCATO M.-A., CANOY A.-S., ROUQUIE D., SARDA X., FREYSSINET G., & ROBAGLIA C. (2006). Large-scale analysis of mRNA translation states during sucrose starvation in *Arabidopsis* cells identifies cell proliferation and chromatin structure as targets of translational control. *Plant Physiol.*, 141, 663-673. (classé 3 par Faculty of 1000)
 20. PIERRU B., GROSSE S., PIGNOL D. & SABATY M. (2006). Genetic and biochemical evidences for the involvement of a molybdo-enzyme in one of the selenite reduction pathways of *Rhodobacter sphaeroides* f. sp. *denitrificans* IL106. *Appl. Environ. Microbiol.*, 72(5), 3147-53.
-
-

AXE 4. ECOTECHNOLOGIES ET DEVELOPPEMENT DURABLE

4.1. Les enjeux sociétaux

Les activités humaines ont une influence majeure sur notre environnement. Les transports, l'industrie, la consommation d'énergie sont sources de pollution atmosphérique (CO₂, ozone,...) ou terrestre (métaux lourds, xénobiotiques,...). La pollution des sols par les activités industrielles fait l'objet d'une prise de conscience récente, au regard de plus de deux siècles d'activité industrielle. Dans le domaine de l'énergie, la diminution des réserves d'énergies fossiles et la perspective de changements climatiques rendent prioritaire la recherche de sources renouvelables et de nouveaux vecteurs énergétiques.

Les progrès scientifiques dans différentes disciplines (biologie, génomique, physico-chimie, génie des procédés) permettent d'envisager le développement de nouvelles technologies limitant la pression de l'homme sur l'environnement. L'écotechnologie se réfère à toutes les activités visant à mesurer, prévenir, limiter ou corriger les atteintes à l'environnement et les problèmes relatifs aux déchets et aux écosystèmes. L'écotechnologie joue un rôle clef en vue d'atteindre un développement durable. Elle permet d'améliorer la croissance économique (puisque'elle réduit les coûts de protection de l'environnement) et en même temps sauvegarde les ressources naturelles et l'environnement.

Des efforts importants en recherche et développement sont nécessaires afin de proposer des solutions plus efficaces pour le contrôle et la remédiation des contaminations des eaux et des sols. Ces technologies innovantes, à coût réduit et respectueuses de l'environnement, doivent dans certains cas être spécifiques à certains contaminants. Dans le domaine de l'énergie, l'essor des bioénergies, notamment des biocarburants et du vecteur hydrogène, s'inscrit au premier plan d'une stratégie de développement durable. La loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique du 23 juillet 2005 se donne en particulier pour objectifs de contribuer à l'indépendance énergétique et à la lutte contre l'aggravation de l'effet de serre, notamment par le recours aux énergies renouvelables issues de la biomasse.

Les technologies innovantes relatives à l'environnement sont mises en œuvre par des entreprises. Celles-ci sont soit des créations nouvelles, issues de l'initiative d'entrepreneurs, soit des entreprises existantes qui se restructurent et évoluent pour exploiter plus efficacement ces technologies. La dynamique de ces créations est un objet d'étude. Chaque technologie disponible doit être considérée à l'aune du marché, c'est-à-dire des prix, des coûts, des demandes et de la compétition entre entreprises pour l'offrir. Chaque technologie doit aussi être évaluée de façon concurrentielle avec celles qui lui sont substituables. La dynamique de la création d'entreprises ou de branches d'entreprises centrées sur les technologies liées à l'environnement est donc un objet d'étude qui se prête à l'action interdisciplinaire. La région PACA offre en particulier un terrain riche pour recueillir des données sur les modes de financement de ces technologies (capital risque et autres solutions), sur les emplois créés, les structures de concurrences, les styles de management, les

méthodes de commercialisation et les liens entre ces entreprises et les laboratoires de recherche, ainsi que sur leur insertion dans les pôles de compétitivité.

Dans ce contexte les équipes de la Fédération de Recherche développent des approches originales permettant l'émergence de technologies de rupture. La création de la Fédération de Recherche permettra de dynamiser cet axe en associant les compétences de biologistes, physico-chimistes et spécialistes des procédés thermiques.

Les axes de recherche

A. Caractérisation, traitement et limitation des pollutions

1. Détection des polluants (bioindicateurs, biosenseurs, capteurs physiques et chimiques, procédés) [UMR 6191 CEA, UMR 6116 IMEP, FRE2704 LCE]
2. Réhabilitation de sites et sols contaminés [UMR 6191 CEA, CEREGE, INERIS, LCE FRE 2704]
3. Traitement des eaux et effluents pollués [UR 6181 LMSNM-GP]
4. Recyclage de déchets [CEREGE, INERIS, FRE2704 LCE]

B. Production d'énergies renouvelables

1. Production d'hydrogène : [UMR 6191 CEA, CEA DEN, CEREGE]
2. Production d'autres biocarburants (bioéthanol, biodiesel) : [UMR 1163 INRA, UMR 6191 CEA, UMR 6181 LMSNM-GP]
3. Exploration de la biodiversité : [UMR 180 IRD, UMR1163 INRA, EA3781, UMR 6191 CEA]

4.2. Les forces en présence

Unités de Recherche	Thématiques de recherche - Axe 4 A. Pollution/dépollution	Taille *
CEREGE UMR 6635 CNRS - Université Paul Cézanne	• Piégeage des métaux par les matériaux • Phytoremédiation • Spéciation et biodisponibilité des métaux	8
CEA Cadarache DSV UMR 6191	• Transporteurs de métaux • Phytoremédiation • Biosenseurs	8 (LBDP) 7 (LEMS) 2 (LBC)
UMR 6181, MSNM-GP, Université Paul Cézanne	Traitement des eaux Procédés membranaires	2 Prof 5 MCF
FRE 2704 – LCE, Université de Provence	• Capteurs physiques et chimiques • Bioindicateurs • Traitement des effluents (OHT) • Valorisation de la biomasse	2 Prof 7 MCF 1 IE 2 Adj. Tech

IMEP	Bioindicateurs de pollution	10
INERIS	- Essais d'altération des déchets et des déchets valorisés - Caractérisation physico-chimique des matériaux - Modélisation du comportement à long terme - Phytoremédiation	7
LCE FRE 2704	Compostage, Traitements par Macrophytes, Procédé OHT ; Capteurs in-situ	8
	Total	61

Unités de Recherche	Thématiques de recherche - Axe 4 B. Bioénergies	Taille *
CEA Cadarache DSV UMR 6191	- Production photobiologique d'hydrogène - Production de biocarburants par des microalgues	Chercheurs, ingénieurs 7 techniciens 2
CEA Cadarache DEN/DTN/STPA/LPC	Gazéification haute température de la biomasse pour la production de biocarburant de synthèse et/ou d'hydrogène	5
UMR 6181 LMSNM-GP, Université Paul Cézanne	Production de biocarburant à partir de graines d'oléagineux – Extraction par CO₂ supercritique	2 Prof 3 MC
UMR 1163 INRA/Universités de Provence et de la Méditerranée	- Exploration à haut débit de la biodiversité fongique - Modelage des génomes fongiques - Ingénierie enzymatique - Etude de l'évolution des génomes fongiques.	Chercheurs+ EC : 9 Ingénieurs : 4 Techniciens : 3
UMR 180 - MicroBiotech IRD/Université de Provence/Université de la Méditerranée	- Exploration de la biodiversité bactérienne en milieu extrême - Ecologie microbienne génomique et métagénomique des environnements extrêmes.	Chercheurs + EC : 16 Ingénieurs : 7
EA 3781 Université de Provence	Phylogénie et biodiversité microbienne	Chercheurs+ EC : 1 Ingénieurs :1
CEROG – CESMAO, EA 2188,	Stratégie des entreprises et développement durable	3
CAE EA 898 – faculté d'économie appliquée	- Marché des permis de pollution - Principe pollueur - payeur	6
	Total	69

4.3. Les plateaux techniques mis à disposition des laboratoires de la Fédération

L'IFR PMSE 112 a mis en place une **plate-forme analytique de micro-analyse** très performante regroupant un MEB (Hitashi S 300-N), un microscope Infra-Rouge, un spectro-microscope RX (Horiba XGT5000) et un appareil de Micro-diffraction X (Panalytical X Pert Pro MPD). Cet ensemble d'appareils très complémentaires est unique au niveau régional voire national. Dans le cas du spectro-microscope RX de nombreuses équipes du CEREGE et de l'IFR PMSE 112 l'utilisent pour diverses études (impact environnemental lié au recyclage et au traitement de déchets, mobilité et disponibilité des métaux en environnement contaminé, l'impact des poussières atmosphériques, caractérisation de sédiments ou l'étude des météorites).

Un des objectifs de la Fédération sera de renforcer à la fois la spectro-microscopie RX et les techniques d'imagerie afin de proposer un parc expérimental de spectroscopie et micro-spectroscopie de très haut niveau. La mutualisation qui est déjà en fonctionnement pour les équipes de l'IFR PMSE 112, montre l'efficacité de cette pratique.

Le CEREGE et l'IFR PMSE 112, en association avec **l'INERIS** et le Syndicat mixte de l'Arbois ont créé **ARDEVIE** (Arbois, DEchets Valorisation Innovation Environnement), un centre d'expertise sur la valorisation de déchets, basé sur l'Europôle de l'Arbois à Aix en Pce. Les objectifs de ce centre sont de caractériser, recycler, valoriser, inertier et étudier les impacts sur l'homme et les écosystèmes de différents types de déchets. Des actions de recherche et développement sont menées dans différents domaines (caractérisation des mécanismes bio-physicochimiques de relargage/fixation de contaminants, impacts sur les organismes, modélisation des transferts). Un aspect important concerne l'assistance technique (aide à l'application de la réglementation, qualification de nouveaux procédés de traitement, validation de scénarii de valorisation) à destination des collectivités locales et des industriels. Il s'agit à l'heure actuelle de la seule structure s'intéressant à la valorisation des déchets au niveau de la région PACA. Le centre est désormais opérationnel et sera un formidable atout de la future fédération. Il s'agit clairement d'une action structurante du pôle de compétitivité « Gestion des Risques et Vulnérabilité des Territoires » - Régions PACA/ Languedoc Roussillon.

Le laboratoire LPC (DEN, CEA Cadarache) possède une plate-forme dite NTE (Nouvelle Technologie pour l'Energie) orientée principalement sur la gazéification de la biomasse lignocellulosique. Les dispositifs mis en œuvre sont donc des procédés thermochimiques, dont un four tournant de pyrolyse (capacité de l'ordre du kilogramme par heure), un réacteur de vapo-réformage des gaz de pyrolyse, des fours hautes températures pour post-traitement, des réacteurs de conversion par plasma. Le LPC dispose de moyens analytiques (chromatographe gaz, chromatographe gaz couplé spectromètre de masse, thermobalance, dilatomètre, PID et FID, Mesure Karl Fischer).

Enfin, le laboratoire dispose de moyens de calculs et de simulation avec des licences de logiciel de calcul d'écoulements/échanges (Comsol), de calculs d'équilibres thermodynamiques (Factsage et Gemini) et de procédé (Prosim).

L'UMR 6191 CEA Cadarache dispose :

- Au **LB³M**, d'enceintes climatiques, de salles de culture, de hottes à flux laminaire, de congélateurs -80°C, pour la culture et pour la cryo-conservation des souches d'algues et de cyanobactéries et pour le criblage haut débit de souches d'intérêt. Le laboratoire a constitué une banque de mutants d'insertion de l'algue *Chlamydomonas reinhardtii* qu'il se propose de mettre à disposition de la communauté scientifique. Au niveau analytique, le laboratoire dispose d'une plateforme de mesure d'échange gazeux constituée de plusieurs spectromètres de masse utilisés pour évaluer les potentialités de bioproduction d'hydrogène de souches d'intérêt ainsi que l'activité enzymatique d'hydrogénases à différents niveaux d'oxygène. Le laboratoire dispose en outre d'un chromatographe à gaz couplé à un spectromètre de masse, de spectrofluorimètres, de plusieurs chaînes de purification HPLC, FPLC, de centrifugeuses ainsi que d'équipements classiques de laboratoire pour la biochimie et la biologie moléculaire.
- Au **LBC**, d'un plateau technique de microbiologie (enceintes dédiées à la culture bactérienne, fermenteurs) et de biochimie structurale et fonctionnelle (spectrophotomètres, fluorimètres, salle de cristallisation) adapté la caractérisation moléculaire de protéine d'intérêt ainsi qu'à la mise au point et au développement de biosenseurs bactériens.
- Au **LIPM**, de deux spectromètres IRTF en mode différentiel optimisés pour faire des mesures en mode différentiel sur des protéines en solution. Un accessoire ATR-diamant est optimisé pour analyser les changements vibrationnels associés à la fixation d'un métal sur une protéine. Cet outil permet d'identifier la nature chimique des ligands du métal. L'acquisition d'un spectromètre de masse de type ESI Q-TOF est prévue par un financement conjoint CNRS, CEA, région et IFR112-CEREGE. Cet outil permettra de déterminer la stœchiométrie de complexes protéine-ligand, ainsi que les zones d'interactions covalentes et non covalentes. Il pourra permettre également l'identification de composés chimiques ou biologiques cibles des métaux ou toxiques.

Le LMSNM-GP (UMR 6181) possède sur l'Arbois d'un Plateau technique de recherche et de développement important sur les Procédés Propres et Environnement, on peut y trouver des :

- Installations pilotes de séparations membranaires (pervaporation, osmose inverse, microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration)
- Installations pilote de traitements biologiques de traitement des eaux (Bioréacteur à membranes externe et interne)
- Installation de gazéification de boues et de déchets
- Rhéomètre (tous types de géométries, en écoulement simple et en dynamique)
- Installations pilotes en milieu supercritique (extraction, production de poudre, cellule haute pression, banc laser...).

L'IMEP (UMR CNRS 6116, Equipe d'Ecologie Microbienne) dispose de salles et d'étuves de culture, de chambres froides, de hottes à flux laminaire, de collections de microorganismes (bactéries et champignons), de congélateurs -80°C, d'autoclaves et matériels de stérilisation, d'une hotte anaérobie, de fermenteurs, d'appareils de respirométrie, de matériel de microscopie en épifluorescence. D'un point de vue analytique, l'équipe d'Ecologie microbienne possède des

spectrophotomètres, un lecteur de multi-plaques, des HPLC, une FPLC, une CPG, du matériel d'électrophorèse et d'IEF. Elle possède en outre tous les équipements de base nécessaires à des études microbiologiques, biochimiques et chimiques. L'équipe bénéficie également du service commun de Biologie Moléculaire de l'IMEP (PCR, AFLP, RAPD, RFLP, ISSR, Micro sat., marqueurs moléculaires, DGGE, analyse du polymorphisme, clonage, construction).

L'IFR 86 BAIM a mis en place une plate-forme nationale gérée par l'INRA Centre International de Ressources Microbiennes-Champignons Filamenteux.

La mise en place de cette plate-forme nationale s'inscrit dans la dynamique des Centres de Ressources Biologiques (CRB) lancée par l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) et par le Bureau des Ressources Génétiques (BRG) au niveau français. Ces CRB doivent avoir des standards élevés de qualité et d'expertise tels que demandés par la communauté des scientifiques et des industriels. Ils doivent permettre l'accessibilité aux ressources biologiques dont dépendent les Recherches et Développement dans les domaines des Sciences de la Vie et l'avancement des Biotechnologies. Quatre actions sont engagées au sein de cette plate-forme:

- Regrouper les collections nationales de champignons filamenteux d'intérêt dans le domaine de la chimie verte (biomatériaux, biocarburants, fibres papetières et textiles...), en assurer l'authentification, la conservation et la diffusion et mettre en place des actions de collectes dans des biotopes ciblés. Quatre cents souches ont ainsi été transférées et contrôlées permettant de disposer de 1 000 souches sur le site de Marseille.
- Développer des outils pour l'exploration à "haut débit" des relations phylogénie/fonctions enzymatiques des champignons lignocellulolytiques. Un automate GENESIS adapté au criblage fonctionnel de la biodiversité fongique fonctionne en conditions stériles et est muni de trois bras manipulateurs.
- Mise en place une base de donnée dynamique contenant l'ensemble des informations physiologiques et technologiques relatives à ces ressources fongiques.
- Faciliter l'accès et la valorisation de ces ressources et des connaissances associées dans un cadre juridique s'appuyant sur les conventions internationales et les normes européennes.

Certifié ISO 9001 : 2000



- Inscrire le CIRM de Marseille dans une démarche de rationalisation et d'assurance qualité. Compte-tenu des exigences en matière de Management de la Qualité décrites dans la première version des « Prescriptions obligatoires relatives au fonctionnement CRB », le CIRM a été certifié ISO 9001:2000 en juin 2006.

Le LCE (FRE CNRS 2704, Equipe Chimie de L'Environnement Terrestre) dispose d'un parc analytique conséquent en matériels de détection spectroscopique, de chromatographie en phase liquide et en phase gazeuse, de préparation d'échantillons et d'automatisation de procédures analytiques :

- 2 CPG-FID dont l'une est équipée d'un injecteur grand volume, 1 HPLC-UV, 2 HPLC-fluorimétrie, 1 Chromatographie ionique, 1 HPIC-

UV/fluorimétrie/ampérométrie, 1 LC-MS couplé à une trappe d'ions (ionisation par électrospray)

- 1 ICP-AES avec génération d'hydrures, 1 COT-mètre équipé d'un module solide et liquide, 1 COT-mètre+Analyseur d'azote (achat en cours), 5 UV-Visible, dont 2 miniatures à fibres optiques, 2 spectrofluorimètres
- 1 Minéralisateur micro-onde, 1 Extracteur solide - liquide de type ASE, 1 Extracteur liquide - liquide de type SPE.

Le LCE dispose également d'un réacteur pilote d'oxydation hydrothermale (OHT) permettant l'étude, le suivi en ligne et la modélisation de la dégradation de composés solides et liquides.

4.4. Les axes structurants

A. Caractérisation, traitement et limitation des pollutions

La détection et la caractérisation des pollutions (des sols ou des eaux) sont primordiales en matière de gestion de sites contaminés et d'optimisation des filières de traitement des déchets. Dans le cadre des sites et sols contaminés, il est primordial de recourir à des techniques de détection performantes (détection de faibles concentrations, identification de la spéciation des contaminants) et peu coûteuses. Ces deux aspects sont souvent difficiles à concilier.

Les équipes de la Fédération de Recherche disposent de compétences reconnues en biologie, en physico-chimie et en génie des procédés qu'elles se proposent de mettre en commun au service de la recherche et du développement de technologies innovantes dans les domaines de la détection des pollutions, de leur traitement ou du recyclage des déchets. Cette diversité des compétences permettra d'envisager des solutions partielles pour un déchet donné, mais également de prendre en compte la totalité d'une filière de traitement des déchets.

A-1 : Détection des polluants

Recherche et validation de biomarqueurs enzymatiques

L'objectif est de mettre en évidence des perturbations d'origine anthropique (ETM, pesticides, HAP, ...) en utilisant les activités enzymatiques du sol comme biomarqueurs. Ces dernières peuvent s'avérer très utiles dans ce type d'application car elles sont susceptibles d'être directement inhibées par le polluant (notamment les ETM) ou de présenter un niveau de production altéré. Les travaux menés sur cette thématique consistent à :

- (1) sélectionner les enzymes bioindicatrices les plus significatives pouvant être des hydrolases ou des oxydases
- (2) établir une méthode de mesure simple reposant sur l'utilisation de méthodes individuelles ou d'un kit de mesure enzymatique en épifluorescence. Ce dernier point fait l'objet d'une demande d'étude ISO, pour laquelle l'équipe de l'IMEP intervient en tant qu'expert.
- (3) définir un référentiel de la variabilité des enzymes sélectionnées, applicable à des perturbations et des sols variés,

(4) calibrer et valider sur le terrain ces biomarqueurs pour une large gamme de perturbations et de sols,

(5) mettre en relation ces biomarqueurs avec d'autres paramètres physiques, chimiques, biologiques (biomasses et biodiversités fonctionnelles microbiennes (BioLog®), respirométrie oxytop®, screening de microflores dégradantes), et biochimiques des sols.

Développement de biosenseurs pour les métaux lourds

Les recherches visent à identifier les protéines cibles de métaux lourds dans le but ultérieur d'utiliser ces molécules soit comme bioindicateur, soit comme base structurale pour le développement de biosenseurs. L'utilisation de ^{109}Cd (émetteur γ) et la mise au point de techniques de séparation par gels d'électrophorèse bidimensionnels en conditions non dénaturantes a permis de mettre en évidence 5 à 6 cibles du Cd chez *E. coli*, et ceci suite à l'exposition à de faibles doses de cadmium (1 et 10 μM Cd). L'identification des protéines par spectrométrie de masse est suivie d'une caractérisation *in vitro* des interactions « protéine-métal » et des sites métalliques des métalloprotéines, pour mieux comprendre au niveau moléculaire les déterminants de l'affinité, de la spécificité et de la réactivité chimique des sites métalliques. Ces études reposent notamment sur des approches de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) notamment dans le domaine IR lointain et de spectrométrie de masse. Il s'agira d'identifier des combinaisons de ligands et des motifs structuraux présentant une forte affinité et une relative sélectivité pour le métal d'intérêt (Cd, uranyle).

Les applications visées sont le développement de systèmes performants de bioremédiation (micro-organisme accumulateur ou biotransformant) ou le développement de biosenseurs sensibles et spécifiques. Dans le cas où le système enzymatique est induit par l'agent toxique, le biosenseur est basé sur le couplage de son promoteur à un gène rapporteur codant une protéine de référence dont la synthèse sera aisément détectée. Si les mécanismes enzymatiques responsables de la résistance au toxique ne sont pas induits, mais constitutifs, la stratégie utilisée consiste à purifier, caractériser et immobiliser ces enzymes. Le système de détection mis en place est alors basé sur la mesure directe des interactions protéines-substrat.

Développement de biosenseurs bactériens par la technique du gène rapporteur.

Certaines bactéries sont capables de se développer malgré la présence de toxiques (métalliques, xénobiotiques...) dans leur milieu de culture. La stratégie de défense mise en place par ces micro-organismes consiste dans de nombreux cas à induire la synthèse de protéines spécifiques leur permettant de résister et de biotransformer ces produits. Nos travaux visent à identifier et caractériser ces mécanismes de résistance au niveau moléculaire par des approches globales (banque de transposon, complémentation de souches sensibles, protéomique comparative) ou ciblées (délétion ou surexpression de gènes candidats), afin de les exploiter par le développement de biosenseurs bactériens. La technique développée est celle du gène rapporteur, placé sous contrôle du promoteur d'un gène dont l'expression est induite par un agent toxique. Le biosenseur est alors basé sur la construction d'un plasmide comportant le promoteur et son régulateur, couplés à un gène rapporteur codant une protéine de référence dont la synthèse sera aisément détectée. Les plus utilisées (la luciférase, la Green Fluorescent Protein) sont

capables de produire une couleur significative ou encore d'émettre, dans certaines conditions, de la luminescence. Ainsi, en présence de toxique, le promoteur est activé, provoquant la synthèse de la protéine de référence et donc un signal proportionnel à la quantité de toxique présente dans le milieu. Des biosenseurs de mercure et d'arsenite couplant le promoteur de la mercurique réductase ou celui de l'arsenite réductase à une luciférase sont dès à présent fonctionnels. Notre expertise dans ce type d'approche sera exploitée et étendue dans le cadre de biosenseurs de métaux lourds (arseniate, oxyde de sélénium, tellurite, cadmium et Nickel) ou de toxiques xénobiotiques (organophosphorés phytosanitaires).

Développement de capteurs physiques et chimiques

Les recherches visent à développer des capteurs dans l'optique d'être utilisés sur site pour permettre une mesure directe ou semi-directe des polluants métalliques, évitant les risques liés à leurs modifications (de concentration, de réaction) entraînées par les étapes d'échantillonnage, de stockage et de transport. Ils se doivent d'être compacts, si possible de faible coût, facilement automatisables et utilisables. Pour cela, les méthodes de détection spectrale (UV-Visible, fluorescence, luminescence, proche infrarouge) sont privilégiées. Afin de réduire les impacts sur le milieu, les dispositifs d'échantillonnage accompagnant le système de mesure se doivent d'être miniaturisés et n'utiliser que de faibles volumes d'eau à analyser (Utilisation de la SIA -Sequential Injection Analysis-, MSFIA -Multi-Syringe Flow Injection Analysis-, MPFS -Multi Pumping Flow System-). Ils devront être conçus et opérer dans le respect des douze principes de la chimie verte, c'est-à-dire notamment n'utiliser que des réactifs chimiques non toxiques pour l'environnement ou être peu consommateurs en réactifs peu toxiques.

Les capteurs développés sont de trois types :

Capteurs physiques :

Le terme de « capteur physique » se réfère à l'utilisation de méthodes spectrales directes pour l'identification et la quantification des polluants évoqués ci-dessous. Les composés NO_2^- , NO_3^- , Cr^{VI} , ainsi que de nombreux composés organiques présentant des liaisons insaturées sont par exemple détectables directement par spectrophotométrie UV-Visible ou par fluorescence. La spéciation de ces composés lorsqu'ils sont présents simultanément peut alors être réalisée par un traitement mathématique du signal (« déconvolution spectrale »).

L'utilisation de fibres optiques permet l'acquisition de ce signal et l'utilisation de logiciels adaptés permet son traitement et la détermination des teneurs recherchées.

Par l'utilisation de ce type de capteurs, il est donc possible de mesurer des composés spécifiques, mais aussi des paramètres globaux tels que la DCO, le COT, les MES, un indice d'humification, ...

Capteurs chimiques :

Lorsque les composés recherchés n'absorbent pas dans les domaines spectraux d'étude ou lorsque le traitement mathématique du signal ne permet pas de séparer les composés d'intérêt, il est nécessaire de passer par une étape de prétraitement de l'échantillon. Celle-ci peut consister soit en une réaction de dérivation (ajout d'un réactif complexométrique pour la détection d'espèces métalliques, ajout d'une amide pour l'identification de composés carboxyliques, ...),

soit en une étape de séparation sur support de type résine ou membrane, soit encore en une étape de photoxydation permettant de transformer des composés non visibles en composés directement détectables dans les domaines spectraux choisis.

Capteurs biochimiques :

Ces capteurs sont utilisés lorsque l'on recherche un effet direct d'un polluant ou d'une famille de composés sur l'environnement, ou lorsqu'on ne veut déterminer qu'un indice global. Il peut s'agir d'organismes de type algues sur lesquels on va mesurer la diminution du rendement photosynthétique induite par la présence de composés toxiques (mesure de la fluorescence). Il peut également s'agir de l'étude de l'inhibition de réactions enzymatiques en présence de composés toxiques (par chimiluminescence). Dans tous les cas, la diminution de la luminescence peut être corrélée à la concentration des polluants ciblés, à condition de choisir des réactions enzymatiques ou des organismes biologiques spécifiques.

Premières applications : En partenariat avec les laboratoires directement impliqués dans l'axe 2, il est déjà prévu des applications concrètes aux capteurs déjà développés

1. Etude et remédiation d'écosystèmes lagunaires saumâtres

La première application concrète sera menée en partenariat avec les équipes des professeurs Roux et Sukhinov lors de l'étude et le suivi de la remédiation d'écosystèmes lagunaires saumâtres (Etang de Berre, Mer d'Azov).

Afin de modéliser ces écosystèmes, il est nécessaire d'acquérir un grand nombre de données physico-chimiques et chimiques, qui, pour ces dernières, ne peuvent être mesurés que sur site afin d'éviter la modification des teneurs en certains composés lors des phases d'échantillonnage et de stockage des échantillons (silicates, nitrites, ammonium, sulfure d'hydrogène, fer (II), ...).

Les données acquises par les capteurs existants (nitrites, nitrates, composés azotés, Matières En Suspension, Carbone Organique Total) permettront de faire un état des lieux initial avant la mise en place des processus de remédiation prévus (notamment sur l'Etang de Bolmon), et un suivi de l'évolution de la qualité physico-chimique des zones saumâtres étudiées lors des apports successifs d'eau douce dans le milieu.

Ces données permettront d'alimenter les modèles hydrodynamiques et d'étudier les cycles biogéochimiques des substances polluantes ; ils permettront également de déterminer des cinétiques de réaction, encore largement absentes de la littérature.

Des capteurs devront également être développés pour certains autres paramètres (sulfure d'hydrogène, par exemple).

2. Gestion des effluents et conséquence des épandages sur la qualité des eaux

La pérennité de la voie de traitement biologique et microbiologique des eaux usées et des boues de stations d'épuration par les sols et les plantes passe par l'acquisition de données physico-chimiques et chimiques, permettant d'étudier les modes de transfert et de dégradation des composés épandus.

A côté des outils de mesure permettant de caractériser de grandes surfaces (télédétection, géophysique), des capteurs au niveau des sols ou dans les sols sont également nécessaires.

Dans ce cadre, de nouveaux capteurs doivent être créés ; il pourra notamment s'agir de bougies poreuses instrumentées. A l'aide de fibres optiques installées à différentes profondeurs, ces bougies poreuses permettront d'analyser directement in-situ l'eau des sols et ainsi de déterminer la mobilité et la biodisponibilité de certains composés, d'étudier les éventuelles modifications des cycles biogéochimiques induits par les épandages.

Cadre programmatif :

2005-2008 : Projet NRBC (Risques Nucléaire, Radiologique, Biologique et Chimique) financé par le CEA. Le projet concerne les Biosenseurs et la Biodégradation Bactérienne

2007-2010 : Projet ERMOE, financé par l'ANR Physique Chimie du Vivant. L'objectif est de caractériser des mécanismes catalytiques de molybdo-réductases.

2004-2007 : Toxicologie Nucléaire Environnementale. Un projet étudie la résistance des bactéries aux métaux lourds et aux radionucléides. Un autre projet concerne l'étude des interactions protéine-métal dans les sites de chélation.

2005-2008 : Projet Caractérisation de perturbations anthropiques affectant le fonctionnement et la qualité des sols : développement de bioindicateurs enzymatiques (IMEP, financé par l'ADEME et l'Agence de l'eau RMC)

2006-2009 : Projet ARSENIUM (Développement de sondes fluorescentes pour la détermination des différentes formes d'arsenic et de sélénium inorganiques dans les eaux). Programme Jeunes Chercheurs financé par l'Agence Nationale de la Recherche.

2007-2008 : Projet GF-Log (Développement d'une procédure analytique pour l'identification et la caractérisation de la matière organique soluble dans les sols). Projet financé par l'ADEME.

A-2 : Réhabilitation des sites et sols contaminés (phytoremédiation – utilisation de nanoparticules)

Phytoremédiation

Cette technique de remédiation des sols fait appel aux capacités qu'ont les plantes supérieures d'extraire (phytoextraction) ou de stabiliser (phytostabilisation) des polluants. Cette technique semble particulièrement prometteuse dans les cas de contaminations de surface étendues et impliquant des concentrations moyennement élevées. Elle pose cependant encore de nombreuses questions fondamentales quant aux mécanismes intervenant lors de l'extraction ou la stabilisation des ETM (éléments traces métalliques) du sol. La mise en place de ces techniques ainsi que la gestion globale des surfaces contaminées sur le long terme ont été peu étudiés.

Le contrôle de l'ensemble du processus implique un travail à différentes échelles spatiales et de temps, de l'échelle moléculaire aux champs, d'études ponctuelles à des cycles d'observation de plusieurs années, à la fois sur les plantes et les sols.

L'application bien comprise de la phytoextraction (extraction des ETM aux moyens de plantes accumulatrices ou hyperaccumulatrices) et de la phytostabilisation (qui utilise des plantes tolérantes associées à des amendements réduisant la biodisponibilité et la mobilité des ETM) nécessite tout d'abord de mettre en évidence les mécanismes de tolérance et d'accumulation des métaux au niveau de la plante. Ainsi les techniques actuelles de biologie moléculaire permettent de déceler le rôle spécifique de certains gènes dans les capacités d'une plante à résister aux métaux lourds ainsi qu'à les transférer dans les parties aériennes où ils peuvent plus facilement être pris en charge : des travaux récents effectués sur *Arabidopsis thaliana* (plante modèle en génétique moléculaire), montrent que la surexpression d'un transporteur de type P-ATPase permet de doubler le transfert de cadmium depuis le sol jusqu'aux feuilles. L'expression hétérologue d'un transporteur ABC de levure (YCF1) augmente également la tolérance des plantes au Cd et Pb et leur transfert aux parties aériennes. Des régulateurs post-traductionnels sont également impliqués dans la tolérance à divers métaux lourds. Ces mécanismes ne sont pas indépendants de ceux régulant les cycles des éléments essentiels tels que le phosphore. On a montré en particulier qu'une plante carencée en P re-largue des molécules facilitant la solubilisation et l'absorption du phosphate et d'éléments associés tels que les ETM. La localisation des ETM au sein de la plante a montré que les métaux sont stockés chez les plantes tolérantes (hyperaccumulatrices ou non) dans des compartiments métaboliquement peu actifs. Ces différentes approches et les résultats obtenus posent des bases objectives de sélection chez des espèces à fort développement adaptées à la phytoremédiation (tabac, peuplier ou plantes de grande culture).

Au niveau du sol, le contrôle de la biodisponibilité des ETM est particulièrement critique pour l'optimisation à la fois de la phytoextraction et de la phytostabilisation. La biodisponibilité est dépendante des conditions environnementales du site à remédier, du prélèvement par la plante et des caractéristiques intrinsèques du sol. Elle nécessite des approches en conditions contrôlées et en systèmes pilotes en conditions « naturelles », qui sont déjà menées par les différentes équipes et seront combinées dans le cadre de la fédération de recherche.

Enfin un point important concernant ces nouveaux procédés de traitement est d'aborder l'ensemble de la filière. Dans le cas de la phyto-extraction, par exemple, il est essentiel de proposer des solutions de traitement des parties aériennes des végétaux piégeant les polluants, récoltés annuellement. **La complémentarité des équipes du CEREGE et du LMSNM-GP permettra de répondre à cet objectif.**

Utilisation de nanoparticules

Le CEREGE étudie l'efficacité de certains types de nanoparticules comme les nanoparticules de Fe⁰ et Ni⁰. En collaboration avec des laboratoires de recherche à l'étranger (Centre for Water and Waste Technology, Sydney-Australie, Department of Civil & Environmental Engineering, Duke University, Durham, USA) et des entreprises telles que Sita Remediation différents protocoles expérimentaux de traitements font l'objet de développements : traitement *in-situ*, mise en place de barrières réactives, traitement *ex-situ* sur colonnes et réinjection. L'intérêt de tous ces procédés repose sur la grande réactivité des nanoparticules métalliques et leur

capacité à piéger des polluants inorganiques et organiques. Les mécanismes mis en jeu font souvent appels à des réactions d'oxydo-réduction et de formation d'oxyhydroxydes métalliques. L'approche méthodologique développée au sein de la FR (approche moléculaire des mécanismes réactionnels) permet de déterminer les cinétiques et quantifier des mécanismes de dégradation des polluants (utilisation de spectroscopie d'absorption X, de diffusion inélastique de RX). Des développements méthodologiques sont en cours.

Cadre programmatif :

2007 : convention CEREGE-SITA Remediation (projet DENIPOP)

2005-2007 : Projet Toxicologie nucléaire TRANSPLAM.

2005-2007 : Projet Toxicologie nucléaire Transporteurs.

2006-2009 : Projet ANR PRECODY Phytobois

2006-2009: Riboroot, projet ANR

A-3 : Traitement des eaux et effluents pollués (bioremédiation, procédés) :

L'évolution des contraintes environnementales liées à une protection accrue des milieux naturels nécessite la prise en compte d'un plus grand nombre de polluants et notamment des polluants spécifiques de type xenobiotiques. Il est donc important de pouvoir mettre au point des procédés d'épuration adaptés au traitement de ces effluents spécifiques et complexes. Ces procédés peuvent être de type biologique, de type physico-chimique ou encore une combinaison biologique et physico-chimie.

Le LMSNM-GP développe des recherches sur la mise au point et le développement de procédés de traitements des eaux usées spécifiquement adaptés aux effluents particuliers (toxiques, xenobiotiques). Ce travail de recherche porte aussi bien sur des installations pilote de type biologique aérobie (Bioréacteur à membranes) que sur des pilotes de séparations membranaires (pervaporation, osmose inverse, nanofiltration, ultrafiltration, microfiltration). Les principaux intérêts de ces procédés sont qu'ils sont, compacts, modulaires, et particulièrement efficaces du point de vue de l'élimination de la pollution. Ils sont particulièrement adaptés, comme nous avons déjà pu le montrer à travers différentes études, à une problématique très importante de réutilisation des eaux usées aussi bien de types urbaines qu'industrielles.

L'IMEP, du point de vue du traitement des effluents, s'intéresse à la phytoépuration d'effluents issus d'activités agro-alimentaires. La phytoépuration présente certains avantages pour le développement des activités microbiennes en augmentant la surface de fixation grâce à un système racinaire (racine et rhizome) particulièrement dense dans les premiers centimètres du sol (0 à 40 cm) qui va constituer le siège principal de la dégradation de la matière organique. Le processus de bioépuration est suivi par différentes approches complémentaires : i) la mesure d'activités microbiennes spécifiques impliquées dans la dégradation de certains des composés majoritaires de l'effluent, ii) l'évaluation de la diversité fonctionnelle des communautés microbiennes présentes (microplaques Ecolog®), iii) la quantification

de la biomasse microbienne par microscopie à épifluorescence, *iv*) la transformation globale de la matière organique par RMN du solide, *v*) les mesures de DCO et DBO. Cette biotechnologie permet de traiter des effluents divers en raison de son efficacité et de son adaptabilité importantes, ceci sans production de boues. De plus, les coûts de sa mise en place, de son suivi et de son entretien sont faibles. Ainsi, ce type de traitement peut s'intégrer parfaitement dans tout paysage et convient plus particulièrement pour des PME en milieu rural.

Le LCE développe des procédés par traitements biologiques par compostage ou macrophytes plantées et le procédé d'Oxydation HydroThermale (OHT). Les travaux sur le compostage des déchets et les traitements par macrophytes plantées portent essentiellement sur la compréhension de l'évolution de la matière organique au cours des procédés. Cette connaissance est nécessaire à l'optimisation des valeurs des paramètres de process (qualité des mélanges dans le cas des composts, conditions d'aération, temps de séjour...) et permet de développer des outils adaptés aux contrôles analytiques sur site. Une meilleure qualification de la matière organique des différents composts est également indispensable à leur valorisation.

Le procédé d'oxydation hydrothermale en conditions sous critiques permet la destruction des déchets organiques par oxydation en phase aqueuse sous forte pression mais à des températures de 250 à 320 °C. L'oxydant est généralement l'oxygène de l'air. Les travaux du LCE contribuent à une meilleure connaissance de la réactivité de différents déchets (liqueurs noires de papeterie, polymères de synthèse ou cellulosique, explosifs...) par l'étude des cinétique et mécanismes de dégradation, des rendements, mais aussi par la caractérisation des effluents de l'OHT. Cependant les enjeux actuels portent sur une diminution des température et temps de séjour, sur une amélioration de la qualité des effluents de l'OHT en particulier dans le cas du traitement d'effluents ou déchets riches en azote. Pour répondre à ces enjeux, sont étudiés l'amélioration du contact du déchet avec l'oxydant (objet d'un brevet) et l'utilisation de catalyseurs.

Dans le cadre du traitement des eaux, les équipes de la future Fédération ECCOREV développent des procédés alternatifs à la filtration et aux procédés de coagulation-floculation. Dans les deux types de procédés, et comme nous l'avons développé dans l'action « A-2) Réhabilitation des sites et sols contaminés », il s'agit d'utiliser au mieux de nouveaux matériaux nanométriques issus des nanotechnologies pour certains. Dans le cadre de la filtration, le CEREGE développe un procédé original de synthèse de membranes céramiques à base de nanoparticules de fer : les ferroxanes®. Il est possible actuellement d'obtenir des membranes céramiques à base d'oxyde de fer ayant des caractéristiques équivalentes aux membranes commerciales. La taille de pore obtenue, grâce à la petite taille des Ferroxanes® permet d'envisager de les utiliser pour de la nano-filtration. L'intérêt de ce procédé est de ne générer peu ou pas de déchet et correspond au standard de la 'chimie verte' tout en bénéficiant des propriétés des particules de petite taille. L'enjeu des prochaines années est d'améliorer le procédé afin de développer des membranes réactives ou même catalytiques. Ces membranes catalytiques pourraient offrir un double avantage. Outre les capacités d'élimination de polluants en fonction de leur taille, qui reste le phénomène principal (filtration), il serait possible d'éliminer des polluants solubles par une réaction en surface des membranes (sorption, modification de l'état rédox...). **La mise en place de la Fédération permettra d'associer la partie synthèse (CEREGE) à la partie étude à l'échelle pilote (LMSN-GP) des membranes céramiques réactives.**

Dans le cas de la coagulation-floculation l'idée sera de mettre au point des réactifs de nouvelle génération en association avec les industriels (Véolia Environnement, cadre confidentiel).

Cadre programmatif :

2005-2010 Programme NSF 'Partnerships for International Research and Education (PIRE)': « New Generation Synthetic Membranes: Nanotechnology for Drinking Water Safety » coordonné par Tarabara V.V, (Mischigan State University-USA). (CEREGE : financement des missions trans-Atlantique)

2007-2010. Mise au point de matériaux réactifs pour le traitement des eaux par coagulation-floculation (Anjou recherche (Veolia Environnement)) (convention en négociation)

A-4 : Recyclage de déchets : comportement à long-terme des matériaux et impact environnemental

Le recyclage et la valorisation des déchets représentent des alternatives importantes aux filières classiques de gestion des déchets que peuvent être l'incinération et le stockage. Tous les types de déchets industriels, agricoles, urbains peuvent être concernés par une valorisation. Outre les aspects énergétiques (cf. § B), la valorisation peut consister par le recyclage pour permettre une économie de matière première. Dans tous les cas, il est indispensable de prendre en compte les impacts environnementaux des différentes filières afin d'établir un bilan entre avantages et inconvénients sur le long terme.

Les équipes de la future Fédération développent des actions complémentaires en ce qui concerne la valorisation de déchets organiques ainsi que des déchets inorganiques issus de l'industrie ou des activités urbaines. Ces travaux s'inscrivent pour l'essentiel dans le cadre du centre d'expertise ARDEVIE détaillé ci-dessus.

Les recherches concernent le comportement à long terme de déchets industriels valorisés principalement en génie civil. Il s'agit en effet à l'aide d'une approche moléculaire des mécanismes de transfert des éléments, de définir l'impact environnemental de la réutilisation de certains déchets ou sous-produits de l'industrie. Cette approche permet aussi de proposer de nouvelles voies de traitement de déchets en vue de leur réutilisation. A titre d'exemple, la figure 1 illustre l'évolution du degré d'oxydation du chrome dans des matrices de ciments utilisées pour piéger des déchets inorganiques. Ces travaux ont abouti à la mise en évidence de l'existence de phases minéralogiques capables de ralentir le relargage du Cr(VI) dans la zone altérée. Ce résultat, pris en compte dans un modèle de transport réactif, a permis de mieux prédire le comportement à long terme des ciments contenant du chrome.

Pour étudier le comportement à long terme, l'approche moléculaire est également couplée à de la modélisation chimie-transport. Ce couplage permet d'approcher l'altération des matériaux et la libération des métaux pour des échelles de temps plus longues que celles réalisées à l'échelle du laboratoire. Le modèle est initialisé et validé grâce aux données expérimentales obtenues précédemment, puis des calculs de prédiction sont réalisés pour connaître le comportement à long terme du déchet valorisé pour des scénarii d'utilisations donnés.

L'approche de modélisation présente la particularité de tenter de reproduire l'évolution au sein même du matériau, et ce malgré sa complexité (évolution minéralogique et évolution des polluants).

Les recherches en cours concernent les conséquences de la réutilisation des laitiers d'aciérie en construction routière (projet ANR PRECODO ECLAIR), la réutilisation de fraisats dans de nouveaux enrobés routiers. De même une étude va être initiée sur la réutilisation de MIOM (mâchefers d'incinérateur d'ordures ménagères) en génie civil avec la société Véolia Propreté.

Les équipes de la future Fédération s'intéressent aussi à la valorisation de biodéchets, en particulier des boues de station d'épuration ou des composts de boues de station d'épuration et de déchets verts. Concernant les composts, le but est, grâce à l'étude des critères de maturité, de réduire le temps de compostage et d'obtenir des produits de qualité définie correspondant aux besoins des différents utilisateurs. L'étude des effets de l'épandage de ces biodéchets sur la décomposition de la matière organique de sols forestiers ou d'agrosystèmes permet d'appréhender leur impact environnemental. Les travaux menés sur cette thématique consistent tout d'abord à comprendre les processus microbiologiques impliqués dans la décomposition de la matière organique des sols après épandage ainsi que dans différents procédés de compostage (dénombrement des microorganismes, biodiversité microbienne génétique et fonctionnelle, activité respiratoire, activités enzymatiques, dégradation chimique de la matière organique par RMN et NIRS) et d'évaluer l'importance de différents paramètres permettant d'accélérer la phase de maturation du compost (température, pH, teneur en eau, acides organiques, C, N, P).

Plus encore que l'étude de l'évolution biogéochimique des biodéchets utilisés comme apport en agriculture ou sylviculture, les équipes de la future Fédération étudient les paramètres agronomiques de la qualité des composts et l'impact écotoxicologique par l'étude de la réponse des communautés microbiennes de sols aux amendements en boues ou composts.

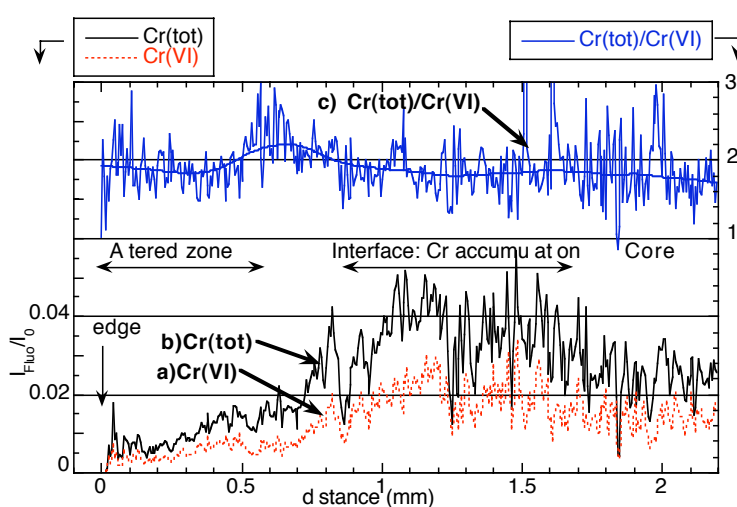


Figure1. Profils de fluorescence enregistrés à A) 5.998 (Cr(VI)) et B) 6.02 keV (Cr(Tot)) du front d'altération vers le cœur du ciment altéré et C) rapport Cr(tot)/Cr(VI) (mesure effectuée sur synchrotron)

A-5 : Procédé d'oxydation de déchets organique avec récupération d'énergie

Parmi les voies possibles de valorisation de déchets organiques solides ou liquides, l'oxydation en voie humide ou oxydation hydrothermale (OVH ou OHT) représente un procédé séduisant, alternatif de l'incinération qui présente l'avantage de ne pas produire de dioxines, de furannes, ni de NO_x , SO_2 ou encore de poussières volatils. Ce procédé est particulièrement adapté au traitement de déchets trop dilués pour être incinérés ou bien trop toxiques pour être digérés biologiquement. Ce système offre de surcroît la possibilité de générer de l'énergie pour une DCO initiale de seulement 15g/L. Les recherches en cours concernent l'application de l'OVH à l'élimination de sous-produits animaux (IAA) directement en sortie d'abattoir avec le traitement simultané des effluents liquides. Dans le contexte de l'épizootie de la vache folle une validation biologique vis-à-vis d'agents hautement infectieux tels que le prion de l'ESB est également en cours de réalisation. Les équipes de la fédération envisagent de coupler cette technologie avec un traitement biologique des effluents de sortie (A2). En effet, et bien que les rendements de dégradation de matière organique atteignent plus de 90%, des composés réfractaires subsistent et nécessitent un traitement biologique supplémentaire. D'un point de vue énergétique, l'objectif majeur est la valorisation énergétique excédentaire du procédé. La seule énergie nécessaire est la différence d'enthalpie à fournir au démarrage entre l'effluent entrant et celui sortant alors que pour l'incinération traditionnelle il faut fournir en continu l'énergie pour chauffer l'air, le combustible à 1000°C et évaporer toute l'eau présente. La réaction d'oxydation hydrothermale, fortement exothermique, peut donner lieu à une récupération d'énergie. En effet, à partir de 15 g.L⁻¹ d'alimentation en DCO, le procédé devient autotherme. L'énergie excédentaire fournie par le procédé peut être récupérée, en théorie, sous forme thermique, mécanique ou électrique. L'énergie de basse intensité telle que l'eau chaude et la vapeur basse pression est abondante. Ses applications sont nombreuses et variées. Certaines usines utilisent de l'eau initialement de faible température pour alimenter des bouilleurs. Les autres courants d'eau chaude et les condensats de vapeur peuvent servir pour le lavage. Il est évidemment possible de récupérer l'énergie produite par OHT sous des formes autres que calorifiques : électrique et mécanique en l'occurrence. Mais les rendements sont alors nettement moins élevés. En général, trois niveaux de récupération peuvent être envisagés : (1) Récupération maximale de chaleur : les effluents sont refroidis au maximum avant détente sur des échangeurs de chaleur. (2) Récupération d'énergie mécanique et/ou électrique en quantité suffisante pour rendre l'utilisation autonome. L'excès libéré par l'oxydation peut être récupéré sous forme de chaleur sur des échangeurs. (3) Récupération de l'intégralité de l'énergie sous forme mécanique et électrique. Un exemple de balance énergétique a été estimé pour l'OHT de liqueurs noires à 10% solides, issues d'un procédé semi-chimique au carbonate de soude : sur 6,33 MJ entrant dans le procédé, 5,28 MJ sont utilisables en sortie. L'efficacité de récupération est ainsi supérieure à 80 %. D'un point de vue pratique il paraît plus raisonnable de la récupérer sous forme thermique. Les différentes possibilités de valorisation énergétiques de vapeur seront explorées : Production de chaleur : préchauffage de l'effluent, chauffage d'installations situées à proximité, production combinée chaleur / électricité, revente à des installations collectives ou individuelles

Cadre programmatif :

2006-2009 ANR PRECODO : « Evaluation environnementale du Comportement d'un LAitier LD utilisé en Infrastructure Routière – ECLAIR »

2006-2007 Convention Veolia Propreté-ARDEVIE.

2006-2008 Evaluation de l'écocompatibilité d'un compost de boues industrielles, Contrat industriel (ORTEC-ORSEM-IMEP-CNRS, ECO-MED)

2006-2007 Mise au point et développement du nouveau procédé CESAM de compostage de biodéchets (Contrat SIVED du centre ouest-Var, (ADEME, Région PACA, Département Var) (IMEP-Ecologie microbienne)

2004-2006 Étude de faisabilité de traitement des déchets d'animaux par OVH (ADEME).

2005-2008 DEBIOCIDE - Destruction de déchets animaux crus et d'agents biologiques pathogènes par oxydation hydrothermale – Validation du procédé. (ACI Ministère).

2005-2008 Nouvelle voie de traitement de déchets animaux bruts par oxydation hydrothermale (ADEME-Région PACA-OREAM).

B. Production d'énergies renouvelables

En France, le secteur des transports absorbe à lui seul jusqu'à 60 Mtep de carburants fossiles par an : il dépend à 98 % des carburants d'origine fossile et représente le plus gros émetteur de gaz à effet de serre (27 % des émissions nationales en 2002). Parmi les solutions de remplacement envisageables, l'hydrogène et les biocarburants tiennent une place privilégiée, mais des procédés propres et durables de production doivent être proposés. Une première génération de biocarburants, développée ces dernières années, est en cours de déploiement dans le cadre du plan « Biocarburants » avec un objectif d'incorporation dans les carburants de 5,75 % en 2008 et de 7 % en 2010. Les biocarburants actuels, pour l'essentiel le bioéthanol (obtenu en France à partir de betteraves et de blé) et le biodiesel (ester d'huiles végétales) mélangés respectivement à l'essence et au gazole, sont issus des organes de réserve de plantes cultivées. Or les surfaces agricoles utilisables pour les biocarburants sont limitées compte-tenu des usages concurrents (notamment l'alimentation) et de la disponibilité en eau.

La biomasse, qui représente une des richesses de la région PACA (3^{ème} site forestier au niveau national), est principalement utilisée (15 %) pour la production d'énergie thermique notamment dans les secteurs résidentiels et tertiaires, mais très peu (1 à 2 %) pour la production d'électricité ou de carburants. Le potentiel de biomasse végétale mobilisable pour la production de bioénergies (biocarburants, chaleur, électricité, hydrogène) est estimé à plus de 20 millions de tep, dont 80 % environ sont constitués par la partie ligno-cellulosique de la plante. Le développement d'une filière de conversion massive de ligno-cellulose (voire d'autres déchets organiques) en hydrogène et/ou diesel de synthèse pourrait permettre, à terme, une production annuelle de 20 Mtep. Cette filière constituerait un complément nécessaire à la filière « éthanol » actuelle afin de rendre significative (i.e. supérieure à 20% de la consommation nationale) la production de biocarburant en France. Or on ne dispose pas à l'heure actuelle de technologie fiable et compétitive pour la conversion industrielle de la biomasse lignocellulosique en carburant (biocarburants

de seconde génération). Par ailleurs, il existe un potentiel considérable, et quasi inexploité, de production de bioénergies par l'action de micro-organismes photosynthétiques conduisant à de l'hydrogène ou à des lipides utilisables en biocarburants. Dans tous les cas, ces filières (basées soit sur la conversion de la biomasse, soit sur une production directe) permettent une valorisation de l'énergie solaire (la région PACA est le 1^{er} gisement au niveau national) en limitant les productions de gaz à effet de serre.

Les laboratoires de la Fédération de Recherche disposent de compétences reconnues dans le domaine des bioénergies (conversion biologique ou thermique de la biomasse, production directe de biocarburants) et constituent un pôle de recherche sur les bioénergies probablement unique en France. Elles coordonnent notamment deux projets ANR du « Programme National pour la Recherche sur les Bioénergies », participent à 4 autres projets ANR et 3 projets européens sur ces thématiques. L'objectif est de renforcer ce potentiel en développant des actions de recherche coordonnées, en partageant des ressources communes et articulant ces recherches avec les pôles de compétitivité régionaux « Capénergies », « Risque » et « Mer », pour créer à terme en région PACA un pôle de recherche et développement d'envergure européenne, vecteur d'innovation dans le domaine des bioénergies.

B-1. Production d'hydrogène :

Différentes filières technologiques peuvent être mises en œuvre pour produire de l'hydrogène en ayant recours à la biomasse ou à des processus biologiques. Deux voies sont abordées par les équipes de la fédération :

- Gazéification thermochimique de biomasse ou de déchets
- Production photobiologique directe

Gazéification haute température (biomasse, déchets)

Une filière de seconde génération, basée sur la gazéification haute température de la biomasse, requiert des unités de conversion à fort rendement matière pour répondre à l'objectif de production massive d'hydrogène et/ou de diesel de synthèse. L'une des pistes proposées par le groupe intégré au projet GALACSY (cf. § cadre programmatif) repose sur un apport d'énergie extérieure au système ne contribuant pas aux émissions de CO₂. Ce projet vise à évaluer la faisabilité et l'intérêt technico-économique d'appliquer (en tout ou partie) de l'énergie extérieure au procédé de gazéification (voie allothermique) et de synthèse de carburant et/ou d'hydrogène. Les résultats acquis dans le cadre du projet doivent permettre de quantifier le gain en termes d'augmentation des rendements matière et énergétique en fonction des coûts d'approvisionnement, de production et de distribution. Les données expérimentales (cinétiques réactionnelles et de mélange, transferts et pertes thermiques) seront intégrées dans une approche de modélisation et simulation. L'ensemble aboutira à l'évaluation de la rentabilité de la voie allothermique.

D'une manière générale, afin de pouvoir atteindre les objectifs de rendement et de qualité de gaz de synthèse souhaités (intermédiaire réactionnel pour la production de carburant et/ou d'hydrogène), il est nécessaire de porter la biomasse (ou le déchet organique) à haute température (cf. figure 1). Pour cela, le développement de procédé spécifique est à mener, notamment sur deux types de technologies à savoir

les réacteurs à lit fluidisé et les réacteurs à flux entraînés, concepts dont la taille est extrapolable pour l'échelle industrielle visée.

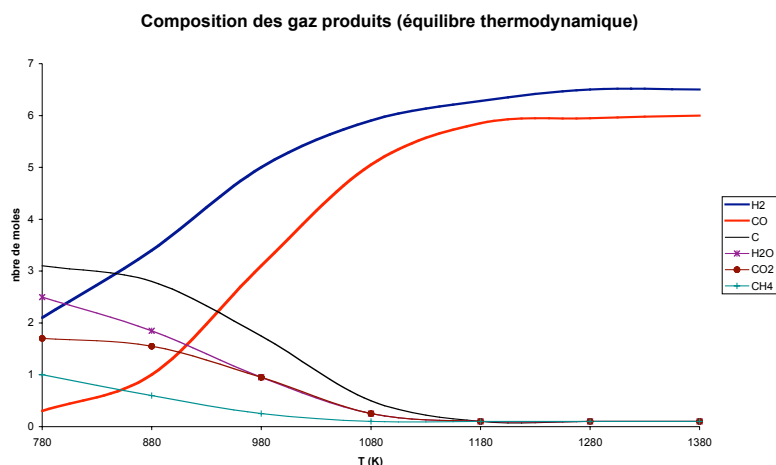


Figure 2 : Composition des gaz générés par gazéification de la biomasse en fonction de la température (hypothèse de l'équilibre thermodynamique).

Parmi la grande variété de biomasses (bois, céréales, déchets...) et le nombre important de procédés se dessinant (extraction, fermentation, combustion...) le choix s'est porté sur la gazéification thermique de biomasse très humide, comme les boues de station d'épuration des eaux usées, les déchets organiques, les algues etc. Ces biomasses réputées difficiles en raison notamment de la forte teneur en eau représentent néanmoins un gisement vaste. La gazéification est un procédé thermochimique qui consiste à convertir la totalité de la matière organique en gaz combustible sous une impulsion thermique et en présence contrôlée de dioxygène. Les températures sont proches de 1000°C. L'intérêt de ces procédés est de posséder un rendement élevé, ainsi qu'un temps de séjour court. De plus, le seul sous produit est constitué par la matière minérale, ne nécessitant généralement pas d'autre traitement pour leur stabilisation. Les gaz combustibles produits sont riches en dihydrogène, mais à ce jour seul l'aspect combustible, donc mélangé avec du CO CH₄, importe.

Les difficultés thématiques à résoudre peuvent se classer en deux catégories :

- la mise au point technologique du procédé permettant de traiter et valoriser ces biomasses humides en tenant compte de leur spécificité.
- l'analyse cohérente des filières.

A ce jour le premier point a été particulièrement étudié. Le montage expérimental présent au laboratoire permet d'évaluer la qualité et la quantité de gaz produits, qu'ils soient polluant ou pas, sous l'effet du traitement thermique à partir de quelques dizaines de grammes d'échantillon. La particularité affichée est de ne travailler qu'en présence de vapeur d'eau pure, c'est à dire en absence totale

d'oxygène. Le montage permet aussi de recueillir les matières minérales pour étudier leurs caractéristiques et leurs compositions. La biomasse retenue, boues de station d'épuration des eaux usées, présente trois particularités : forte teneur en eau, forte teneur en azote, forte teneur en matière minérale. L'étude complète menée (cinétique, identification des composés), débouche actuellement sur la mise au point et le dimensionnement d'un pilote qui prend en compte l'impact de ces fortes teneurs.

Parallèlement, un outil est développé pour analyser les aspects économiques des filières dans leur ensemble (transport, prétraitement, co-traitement...).

Valorisation des hémicelluloses en biohydrogène par traitement combiné fongique-bactérien [UMR 1163 INRA et UMR 180 IRD].

L'hydrolyse par des enzymes fongiques des hémicelluloses produit des sucres en C5 difficilement utilisables par les levures lors de la fermentation éthanolique. Les propriétés originales de certaines bactéries anaérobies extrémophiles du genre *Thermotoga* étudiées en partenariat avec l'IRD à Marseille, permettent d'envisager à partir de ces sucres une production d'hydrogène par des hydrogénases présentant une réactivité moindre vis-à-vis de l'oxygène.

Cadre programmatif :

2006-2009 Projet GALACSY (ANR/PNRB), "Evaluation des potentialités de la Gazéification Allothermique de Ligno-cellulose Appliquée à la production de bio-carburant de Synthèse

Production photobiologique directe [CEA Cadarache UMR 6191]

Certains microorganismes à photosynthèse oxygénique (algues et cyanobactéries) possèdent une hydrogénase en interaction avec la chaîne photosynthétique de transfert d'électrons. Cette particularité leur permet de produire de l' H_2 en utilisant l'eau comme donneur d'électrons et l'énergie solaire. La photoproduction d' H_2 est un phénomène transitoire, l'hydrogénase étant sensible à la présence d'oxygène (sous-produit de la photosynthèse), ce qui en limite les applications possibles.

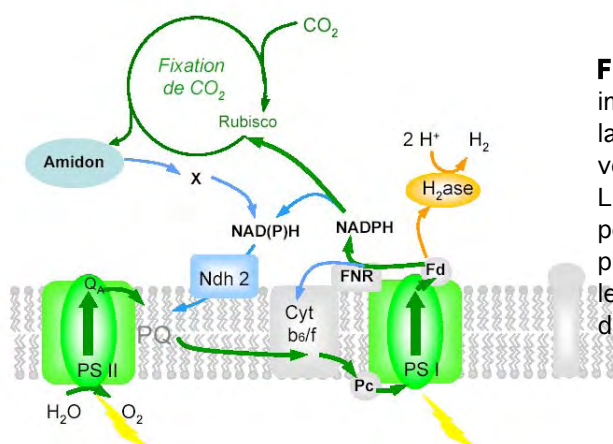


Figure 3 : Voies de transfert d'électrons impliquées dans la photosynthèse et dans la bioproduction d'hydrogène chez l'algue verte *Chlamydomonas reinhardtii*. L'accumulation transitoire d'amidon permet de découpler dans le temps les phases de photosynthèse oxygénique et les phases anoxiques de production d'hydrogène.

L'UMR 6191 développe des recherches visant notamment à décrire les voies métaboliques et les gènes impliqués dans la synthèse des molécules d'intérêt et la régulation de leur activité, de déterminer les étapes limitantes et d'envisager une optimisation des capacités de production par génie métabolique ou génétique. Deux stratégies complémentaires dans le but de s'affranchir de la limitation majeure que constitue la sensibilité à l'O₂ de l'hydrogénase. La première consiste à séparer dans le temps les phases de photosynthèse oxygénique et de production d'H₂ en jouant sur la flexibilité métabolique : cette approche est menée chez l'algue unicellulaire *C. reinhardtii*. La seconde, menée chez *Synechocystis*, vise à réduire la sensibilité à l'oxygène de l'hydrogénase en identifiant les bases de sa résistance à l'O₂. Les deux organismes modèles retenus présentent des avantages communs (génome séquencé, nombreux outils génétiques disponibles) mais des contextes bioénergétiques et cellulaires différents. *C. reinhardtii* possède une hydrogénase à fer à forte activité couplée à la chaîne photosynthétique via la ferrédoxine alors que *Synechocystis* possède une hydrogénase à Ni-Fe utilisant le NAD(P)H comme donneur d'électrons.

La sensibilité des hydrogénases à l'oxygène constitue un obstacle majeur pour l'élaboration de procédés de bioproduction d'H₂. L'élucidation des mécanismes impliqués dans cette réactivité vis-à-vis de l'O₂ et la recherche d'enzymes présentant une réactivité moindre constitue un enjeu majeur. Certaines enzymes particulièrement résistantes à l'O₂ ont été décrites. Il a été proposé que leur résistance soit due à un encombrement stérique du canal hydrophobe permettant l'échange des gaz entre le milieu et le site actif de l'hydrogénase. Pour d'autres hydrogénases, la résistance à l'O₂ pourrait être conférée par l'adjonction d'un ligand CN supplémentaire. L'étude des mécanismes de résistance des hydrogénases à l'O₂ est abordée à travers des réseaux de collaboration entre des équipes de structuralistes (IBS Grenoble), de spectroscopistes (CNRS, Marseille) et de biologistes moléculaires. Dans le cadre du projet ANR PNRB Divhydo (associant le CEA Cadarache UMR 6191 et l'IRD UMR 180), nous envisageons d'explorer la diversité bactérienne dans le but de rechercher de nouvelles hydrogénases présentant une réactivité moindre vis-à-vis de l'O₂ et d'identifier les déterminants moléculaires de cette résistance. L'objectif à terme est de transférer ces déterminants moléculaires via la mutagenèse dirigée à des hydrogénases d'organismes photosynthétiques.

Les connaissances acquises permettront d'élaborer des stratégies pertinentes pour produire et sélectionner des souches dont les rendements potentiels pourront être compatibles avec une application industrielle. La validation concrète de ces potentialités sera effectuée en collaboration avec des laboratoires spécialisés dans le génie des procédés ou directement en partenariat avec des industriels.

Cadre programmatif :

2005-2007 Projet ANR non-thématique « PhotobioH₂ », coordonné par J. Legrand, Université de Nantes ; labellisé par le pôle de compétitivité « Capénergies »

2006-2008 Projet ANR PNRB « Divhydo » coordonné par L. Cournac, CEA sur la diversité des hydrogénases ; labellisé par le pôle de compétitivité « Capénergies »

2005-2007 Projet NEST 6^{ème} PCRD "SOLAR-H" sur la production photobiologique d'hydrogène coordonné par S. Styring, Suède

Thèse :

V. Chochois : Analyse génétique des relations entre le catabolisme des réserves d'amidon et la bioproduction d'H₂.

B-2. Production d'autres biocarburants (bioéthanol, biodiesel)

Production d'éthanol par fermentation de la biomasse

Les champignons filamenteux constituent la première source du monde microbien d'enzymes performantes pour la transformation des biomasses végétales en sucres convertibles en bioéthanol. Cependant, cette étape clé peut représenter jusqu'à 50% du prix de revient du bioéthanol d'origine lignocellulosique.

Développement de systèmes d'expression fongiques pour le prétraitement et la saccharification des lignocelluloses en sucres fermentescibles

- Modèle basidiomycète *Pycnoporus cinnabarinus* pour le prétraitement. Ces travaux ont été rendus possible grâce à l'obtention de lignées monocaryotiques génétiquement stables chez *P. cinnabarinus*, qui sont des cellules hôte incontournables pour la surexpression des enzymes impliquées dans le prétraitement. Une intégration en multicopies (8 copies) a été réalisée avec une production supérieure au g/L d'une métalloenzyme à cuivre la laccase, stratégique pour la délignification des lignocelluloses. Notre objectif est de faire de *Pycnoporus* le système d'expression central pour la production des enzymes spécialisées dans la déstructuration de la lignine. Ce système d'expression a été breveté par l'INRA et l'Université de Provence et sera développé dans le nouveau projet intégré européen BIORENEW (2006-2010).

- Modèle *Trichoderma reesei* pour la saccharification. Ce champignon a été retenu comme hôte industriel en raison de sa capacité à dégrader de façon très efficace la cellulose. Son génome a été séquencé et plus de 10 000 gènes codant pour des protéines ont été identifiés. *T. reesei* est capable de produire à grande échelle (50 g/l) d'enzymes cellulolytiques. Dans ce cadre, nous avons mis en place des collaborations fortes avec l'Institut Français du Pétrole et la Société SAF-ISIS qui ont développé autour de *T. reesei* une plate-forme pré-industrielle à Souston pour la saccharification de la biomasse végétale. Nous disposons de souches industrielles hyperproductrices de cellulases-hémicellulases dont nous complétons le génome avec des enzymes auxiliaires aux propriétés de saccharification complémentaires du système cellulolytique. *T. reesei* CL847.

Analyse dynamique des sécrétomes de *Trichoderma reesei*.

L'étude des sécrétomes de la souche industrielle de *T. reesei* CL847 est réalisée par l'analyse en gel deux dimensions des protéines sécrétés par le champignon cultivé selon différentes conditions de culture. Cette approche différentielle permet l'identification de nouvelles enzymes intervenant dans le métabolisme des lignocelluloses.

Amélioration des performances des enzymes cibles par ingénierie protéique.

Approche-structure fonction pour une étude fiable des activités enzymatiques. Ces études ont pour objectif la détermination des structures tridimensionnelles des

enzymes clés impliquées dans la dégradation des lignocelluloses (collaboration avec l'UMR 6098 CNRS d'Architecture et Fonction des Macromolécules Biologiques de Marseille). Deux structures fongiques ont ainsi été déterminées (la laccase comme enzyme de prétraitement et une féruloyl estérase comme enzyme d'aide à la saccharification).

Construction de nano-outils fongiques. L'objectif est de créer par génie génétique chez *T. reesei* et *A. niger* de nouvelles enzymes avec des capacités catalytiques améliorées. Plusieurs stratégies ont été développées, deux enzymes peuvent être greffées entre elles par le système de fixation bactérien dockérine-cohésine ou associées par une fusion traductionnelle afin de créer de nouvelles enzymes chimériques. De façon alternative, nous développons une deuxième catégorie d'outils enzymatiques comportant un domaine protéique auxiliaire de fixation à la cellulose (CBM, Carbohydrate Binding Module). Ces protéines ont pour rôle de diriger le système enzymatique vers la cellulose.



Maîtrise des cultures fongiques et changement d'échelle.

La production des enzymes fongiques de transformation des lignocelluloses constitue le point clef du développement des procédés de production de bioéthanol et en conditionne directement la rentabilité. Dans ce contexte, nous avons mis en place une halle pilote de biotechnologie, inscrite au contrat de plan état-région et dont les locaux ont été inaugurés en mars 2005. La mise en place de ce service, que nous avons voulu commun avec les enseignements du département biotechnologie de l'ESIL permet de réaliser l'extrapolation des procédés de fermentation, de purification et de transformation à l'échelle pilote. Nous avons en particulier développé des procédés « fed-batch » adaptés aux cultures fongiques en partenariat avec l'IFP (MONOT F.) et la société SAF-ISIS (TAILLADE P.). Cette collaboration nous ouvre l'accès à une plate-forme de démonstration équipée de bioréacteur de 30 m³.

Mieux comprendre l'évolution des génomes des champignons ligninocellulolytiques.

La croissance régulière du nombre de génomes fongiques séquencés permet d'aborder la génomique comparée de façon plus fine et statistiquement plus robuste. Grâce aux approches complémentaires de la phylogénie, ceci devient un véritable outil de découverte lorsqu'on aborde des familles multigéniques fonctionnellement riches reflétant l'insertion d'un organisme dans son environnement ce qui est le cas des champignons filamenteux. Dans ce cadre, une base de données concernant l'étude des enzymes d'oxydo-réduction, « Lignin-Active Enzymes » sera développée (collaboration avec l'AFMB à Marseille). Enfin, une étude comparative des génomes des champignon cellulolytique *Trichoderma reesei* et ligninolytique *Phanerochaete chrysosporium* sera réalisée. Ces travaux sont essentiels pour avoir une vision globale et intégrée du métabolisme original de ces champignons filamenteux pour la

production de biocarburant et permettront de comprendre comment ces champignons se sont spécialisés vers la dégradation de la lignine ou de la cellulose.

Cadre programmatif :

2005-2009 : Contrat de l'Union Européenne-Integrated Project Energy-3 . New Improvements for lignocellulosic Ethanol (NILE).

2006-2010 : Contrat de l'Union Européenne-Programme nanotechnologie and nanosciences, knowledge based multifunctional materials, new production processes and devices. White biotechnology for added value products from renewable plant polymers : design of tailor made biocatalysts and new industrial bioprocesses (BIORENEW).

2006-2008 : ANR-ADEME Programme National de Recherche sur les Bioénergies (PNRB). Stratégie de prétraitements physiques, enzymatiques et Chimiques appliqués à la biomasse-Bio-Ethanol (SPECABBE).

2006-2008 : ANR-ADEME Programme National de Recherche sur les Bioénergies (PNRB). Amélioration de l'hydrolyse enzymatique de la paille de blé par optimisation du mélange cellulolytique et des conditions de mise en oeuvre.

2006-2008 : ANR-INSERM Programme Collections d'Echantillons Biologiques, Valorisation et Certification. Structuration du Centre International de Ressources Microbiennes (CIRM).

2005-2006 : AGRICE-ADEME Analyse protéomique et exploration à haut débit des ressources fongiques pour le modelage de *Trichoderma reesei* en vue de la saccharification de paille de blé en sucres fermentescibles en éthanol.

2005-2006 : AGRICE-ADEME Valorisation des pailles de céréales et de lin oléagineux par la production biotechnologique de biomolécules naturelles et de fibres papetières blanchies.

Programme Ressources Génétiques (2007-2008). Exploration de la biodiversité fongique au travers de l'étude de la phylogénie de familles de gènes d'intérêt.

Production de biocarburants à partir de graines d'oléagineux – extraction par CO₂ supercritique [UMR 6181 MSNM-GP]

La production actuelle d'EMHV (Esters Méthyliques d'Huile Végétale) ou d'EEHV (Esters Ethyliques d'Huile végétale) à partir de graines d'oléagineux met en jeu dans un premier temps l'extraction de l'huile puis, dans un deuxième temps, une transestérification de cette huile. L'extraction est réalisée à l'aide de solvants organiques tels que l'hexane dont l'utilisation présente de multiples inconvénients. L'hexane est un solvant toxique, dont le stockage et la manipulation exigent des précautions particulières. L'extraction par l'hexane est peu sélective et la phase extraite contient des phospholipides ou autres composés qui doivent ensuite être séparés de l'huile. Il est également nécessaire de réaliser une séparation de l'huile et du solvant d'extraction, étape généralement réalisée par distillation. Il reste par ailleurs une certaine quantité de solvant dans le tourteau après extraction, ce qui rend difficile sa valorisation potentielle.

L'utilisation du CO₂ supercritique comme solvant d'extraction présente plusieurs avantages. Ce solvant est très sélectif. Sous certaines conditions opératoires, seule

l'huile est extraite et l'étape de purification de la phase extraite n'est donc plus nécessaire. De plus, une simple dépressurisation permet de séparer l'huile du solvant d'extraction. Certains composés du tourteau peuvent être valorisés, aucun solvant toxique n'ayant pollué la matrice. Outre le fait d'utiliser un solvant « propre », l'extraction par CO₂ supercritique permet de réduire le nombre d'opérations unitaires mises en jeu dans le procédé d'extraction en comparaison avec l'extraction par l'hexane.

Le LPPE est actuellement partenaire scientifique d'un industriel (Société Valcobio) porteur d'un projet de construction d'une usine de production d'EMHV avec extraction par CO₂ supercritique. L'extraction par CO₂ supercritique est connue et appliquée dans l'industrie depuis environ 25 ans mais pour des capacités de production inférieures à celle d'une usine de production de biocarburants. Un projet de création d'une ERT (Equipe de Recherche Technologique) regroupant la Société Valcobio et le LPPE est actuellement en cours de réalisation. Des projets de recherche en commun avec cet industriel porteront sur la valorisation du tourteau et l'amélioration de l'étape de transestérification. Le LPPE est un partenaire du projet SHAMASH, intitulé « Production de biocarburants lipidiques par des microalgues », et subventionné en partie par l'ANR.

Production de lipides par des microalgues [UMR 6191 CEA Cadarache, UMR 6181 MSNM-GP]

Certaines algues unicellulaires, comme les chlorelles, accumulent des lipides de réserve de type triglycérides lorsqu'elles sont placées dans certaines conditions environnementales, telles une carence minérale. Cette accumulation, qui peut représenter jusqu'à 60% du poids sec, présente un intérêt biotechnologique dans la mesure où les lipides ainsi produits peuvent être utilisés comme source de biocarburant (biodiesel). Les microalgues présentent en outre l'intérêt d'une productivité surfacique importante (au moins un facteur 10) lorsqu'on les compare aux grandes cultures traditionnelles utilisées comme source de biocarburant (colza ou tournesol). Les microalgues présentent l'avantage de contenir de nombreux sous-produits valorisables (compléments alimentaires : caroténoïdes, acides gras insaturés). La technologie de culture en photobioréacteurs est exploitable dans des zones non favorables aux grandes cultures (disponibilité en eau).

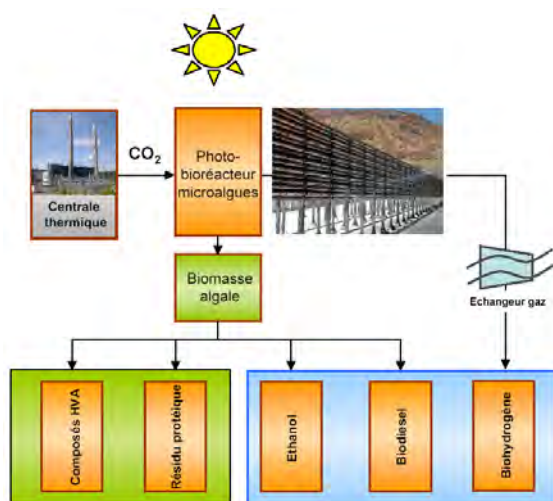


Figure 4 : Utilisation de photobioréacteurs solaires contenant des cultures de microalgues pour la production d'hydrogène, de biocarburants lipidiques, de biomasse valorisable et la séquestration de CO₂ d'origine industrielle.

L'objectif des recherches en cours est d'évaluer le potentiel d'utilisation des microalgues en vue d'une utilisation des lipides en biocarburant. Il s'agit d'une part de définir les espèces d'algues présentant un contenu lipidique optimal et d'autre part de mieux cerner les conditions physiologiques permettant l'accumulation de lipides de réserve chez diverses espèces d'algues. Enfin, on tentera d'optimiser le contenu en lipide valorisable des microalgues en se basant sur une meilleure connaissance des mécanismes moléculaires impliqués dans l'accumulation de triglycérides (voies métaboliques, signaux cellulaires impliqués dans l'accumulation).

Cadre programmatif :

2006-2008 Projet ANR PNRB « Shamash » coordonné par O. Bernard, INRIA (Sophia-Antipolis) sur la production de biocarburants lipidiques ; labellisés pôles « Mer » et « Capénergies »

B-3. Exploration de la biodiversité

Les microorganismes (champignons, microalgues, bactéries) possèdent des propriétés étonnantes de dégradation des lignocelluloses ou de synthèse (éthanol, hydrogène,...) de molécules d'intérêt énergétique. La biodiversité des microorganismes est encore à peine explorée qu'elle est déjà en danger dans de nombreux biotopes. Il paraît essentiel, notamment dans le but de promouvoir des innovations dans le domaine des biotechnologies, de protéger cette biodiversité et de se doter des outils pour l'explorer à « haut débit » en vue de la valoriser. Les projets en cours concernent pour l'essentiel les champignons filamenteux. **Un des objectifs de la Fédération sera d'étendre ces approches à d'autres organismes (algues unicellulaires et bactéries) présentant un intérêt dans le domaine des bioénergies.**

L'INRA, l'IRD et l'université de Provence sous l'égide de l'**UNESCO** ont créé une Chaire dans le domaine des Biotechnologies au service du Développement Durable (BIODEV). Ces Chaires sont inscrites par le Ministère aux contrats Quadriennaux et correspondent à un "label international d'excellence". Cette chaire sera ouverte aux partenaires de la fédération de recherche. Un des aspects concerne la protection et la valorisation du patrimoine génétique microbien par la recherche de nouvelles souches d'intérêt dans le domaine des bioénergies, notamment par la mise en place d'opérations de collectes dans des biotopes ciblés (tropicaux, halophiles ou extrêmes dues à des changements climatiques - désertification - ou à des pollutions industrielles).

Etude « haut débit » des relations gènes-fonctions enzymatiques

Construction de biopuces thématiques pour l'analyse des transcriptomes. La mise en place de banques d'EST pour le criblage *in silico* de nouveaux gènes sera réalisée par l'UMR 1163 en partenariat sur le campus de Luminy avec La plateforme technologique RIO du TAGC qui fait partie de l'INSERM. Il sera possible, d'étudier les réseaux fonctionnels de gènes impliqués dans la production de bioénergie issus de biomasses lignocellulosiques.

Etude des relations phylogénie-fonction par criblage à « haut débit » de la biodiversité. Cette approche nécessite la mise en place de procédés robotisés. Un automate GENESIS adapté à l'exploration de la biodiversité a été mis en place au

sein de la plate-forme nationale Centre International de Ressources Microbiennes-Champignons Filamenteux de l'UMR 1163.

Développement de nouveaux outils bioinformatiques et biomathématiques en évolution

L'Equipe Associée 3781 de l'Université de Provence, « Evolution biologique et phylogénomique » possède une expertise unique pour la reconstruction phylogénétique et la modélisation des concepts en évolution. Cette équipe développe de nouveaux outils pour mieux caractériser et valoriser la biodiversité microbienne et pour faciliter l'intégration des données provenant de champs aussi divers que l'enzymologie, la génomique, la biologie structurale ou l'écologie des habitats.

Conception d'une base de données pour la taxonomie et la phylogénie des microorganismes. Cette base sera un outil d'identification rapide des ressources microbiennes, par le regroupement et la validation de plus de 1 500 séquences d'ITS et de phylogénie grâce au développement de traitements bioinformatiques adaptés. A terme, cette base évoluera vers un service web et permettra une revisite de la phylogénie du monde fongique, représentant ainsi un outil incontournable pour les études de phylogénie-fonctions.

Automatisation des procédures d'annotation par l'utilisation de langages d'intelligences artificielles : Plate-forme bioinformatique FIGENIX. Dans le but d'analyser les énormes volumes de données issues du séquençage des génomes de différentes espèces, une automatisation complète des procédures d'analyse sera réalisée dans le cadre de la plate-forme bioinformatique FIGENIX grâce à plusieurs modèles de suites de programmes bioinformatiques.

Modélisation des concepts en évolution. L'étude de la diversification fonctionnelle de famille d'enzyme de saccharification des biomasses végétales en sucres fermentescibles en éthanol est réalisée. Le traitement des séquences génomiques codant pour ces enzymes et les liens entre les « shifts » évolutifs permettront de comprendre la diversification fonctionnelle de cette famille d'enzymes en relation avec le rôle de l'environnement.

Etude des mécanismes de protection contre le stress oxydant chez les microorganismes extrêmophiles

L'UMR 180 IRD étudie les différents mécanismes de protection contre les stress oxydants des microorganismes producteurs ou consommateurs d'hydrogène. Les variations des conditions physico-chimiques de leur environnement peuvent mettre en jeu différents mécanismes. Cette étude est réalisée par voie protéomique transcriptomique et biochimique en collaboration avec deux équipes du CNRS au Laboratoire de Bioénergétique et Ingénierie des Protéines UPR9036 sur les Thermotogales, et les Aquificales. L'arrivée de deux compétences complémentaires dans l'UMR au cours de l'année 2006-2007 va permettre d'enrichir cette démarche par le développement d'une approche combinant les génomique et métagénomique pour passer aux études structurales et fonctionnelles des communautés microbiennes hyperthermophiles d'intérêt. Cette approche est également intégrée dans le développement des nouveaux outils bioinformatiques cités ci-dessus.

Cadre programmatif :

2006-2008 : ANR-INSERM Programme Collections d'Echantillons Biologiques, Valorisation et Certification. Structuration du Centre International de Ressources Microbiennes (CIRM).

2007-2008 : Programme Ressources Génétiques du Bureau des Ressources Génétiques (BRG). Exploration de la biodiversité fongique au travers de l'étude de la phylogénie de familles de gènes d'intérêt.

2006-2009 : Programme européen EURODEEP d'exploration des populations thermophiles, hyperthermophiles et halophiles des fosses sous-marines océaniques. Exploration, phylogénie, écologie et exploitation de la biodiversité bactérienne et de son métabolisme.

2006-2008 Projet ANR PNRB « Divhydo » coordonné par L. Cournac, CEA sur le diversité des hydrogénases ; labellisé par le pôle de compétitivité « Capénergies »

Projet d'infrastructure de recherche (CPER)

Un projet de création d'un « **Institut de Biotechnologie et Bioénergies** » a été récemment soumis dans le cadre des contrats de plan état région (CPER). L'objectif est de constituer, à partir d'un noyau constitué par un des laboratoires de l'UMR 6191 (une quinzaine de personnes dont 5 chercheurs, 3 ingénieurs, 3 techniciens et 4 à 6 thésards et post-docs), un pôle scientifique sur les bioénergies, dans les domaines de la production d'hydrogène, de biocarburants lipidiques et de biomasse valorisable à partir de microalgues ou de cyanobactéries. Ce projet, qui nécessitera la construction d'un nouveau bâtiment, s'inscrit dans le cadre du pôle de compétitivité régional « Capénergies ».

Il aura un effet structurant au niveau régional en regroupant dans un premier temps des chercheurs du CEA Cadarache et du CNRS (équipe de M. Rousset CNRS, BIP Marseille) travaillant sur les processus de bioproduction d'hydrogène par les algues et bactéries. L'objectif est de constituer un pôle scientifique d'excellence sur une thématique reconnue dans le cadre du pôle de compétitivité régional « CapEnergies ». Cet Institut travaillera en forte synergie avec les laboratoires de la Fédération de Recherche et notamment avec **l'UMR 180 IRD, l'UMR1163 INRA et l'EA3781**. Celui-ci permettra d'attirer des chercheurs intéressés par ces thématiques pour constituer à terme un pôle de niveau européen. Une des missions de l'Institut de Biotechnologie et Bioénergies sera de créer les conditions favorables à un transfert technologique vers des PME régionales.

Ce projet nécessitera la construction d'un nouveau bâtiment pouvant accueillir une trentaine de chercheurs, ingénieurs, techniciens et étudiants. La surface bâtie (environ 1000 m²) comprendra des surfaces de laboratoire (600 m²), des surfaces de bureau (250 m²), une serre solaire abritant des photobioréacteurs et des démonstrateurs (100 m²) et un espace communication (100 m²) permettant la visite des installations par le public sans perturber les travaux de recherche. La localisation hors enceinte, dans le cadre de la future Cité de l'Energie du CEA Cadarache, permettrait une meilleure ouverture sur l'extérieur. Une partie des locaux créés sera destinée à héberger temporairement des chercheurs issus de PME ou de start-up régionales dans le cadre de partenariats de recherche.

PUBLICATIONS ET BREVETS

Axe 4 A - Caractérisation, traitement et limitation des pollutions

- Aida M., Beis D., Heidstra, R., Willemsen V., Blilou I., Galinha C., Nussaume L., Noh Y.-S., Amasino R. & Scheres B. (2004). The PLETHORA genes mediate patterning of the Arabidopsis root stem cell niche. *Cell*, 119, 109-120
- Arnoux, P., Sabaty, M., Alric, J., Frangioni, B., Guigliarelli, B., Adriano, J.-M. & Pignol, D. (2003). Structural and redox plasticity in the heterodimeric periplasmic nitrate reductase. *Nature Struct. Biol.*, 10, 928-934
- Berne, C., Allainmat, B., & Garcia, D. (2005) Tributyl phosphate degradation by *Rhodospseudomonas palustris* and other photosynthetic bacteria. *Biotech Lett.* 27, 561-566
- Bottero JY. Nanotechnologies for a Sustainable Environment. Mc Graw Hill (M.R Wiesner and J.Y Bottero Eds) (2006)
- Boudenne, J.-L., Boussetta, S., Brach-Papa, C., Branger, C., Margaillan, A., Théraulaz, F. (2002) Modification of a poly(styrene-co-divinylbenzene) resin by grafting of an aluminium selective ligand. *Polymer International*, 51 (10) 1050-1057
- Brach-Papa, C., Coulomb, B., Branger C., Margaillan A., Théraulaz, F., Vanloot, P., Boudenne, J.-L. (2004) Fluorimetric determination of aluminium in water by sequential injection through column extraction. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 378 (6), 1652-1658
- Cannavo, P., Dudal, Y., Boudenne, J.-L., Lafolie, F. (2004) Potential for fluorescence spectroscopy to assess the quality of soil water-extracted organic matter. *Soil Science*, 169 (10), 688-696
- Chaurand P., Rose J., Domas J., Briois V., Olivi L., Bottero J-Y. (2006) Environmental impacts of steel slag reused in road construction: a crystallographic approach. *Journal of Hazardous Materials* (sous-presse)
- Cortalezzi, M. M.; Rose, J., Wells, G. F., Bottero, J.-Y., Barron, A. R., Wiesner, M. R. (2003) Ceramic Membranes Derived from Ferroxane Nanoparticles: a new route for the fabrication of iron oxide ultrafiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, 227, 207-217
- Coulomb, B., Richardson, Y., Brach-Papa, C., Boudenne, J.-L., Théraulaz, F. (2006) Rapid estimation of TOC in a marine urban sewage area by UV Spectral Deconvolution. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 86 (14), 1079-1093
- Criquet S., Braud A., Nèble S. (2006) Short-term effect of sewage sludge applications on phosphatase activities and available P in Mediterranean soils. *Soil Biology and Biochemistry* (acceptée avec révisions).
- Farnet A.M., Criquet S., Cigna M., Gil G., & Ferré E. (2004). Purification of a laccase from *Marasmius quercophilus* induced with ferulic acid: reactivity towards natural and xenobiotic aromatic compounds. *Enzyme and Microbial Biotechnology*, 34, 549-554
- Gravot A., Lieutaud A., Verret F., Auroy P., Vavasseur A. & Richaud P. (2004). AtHMA3, a plant P1B-ATPase, functions as a Cd/Pb transporter in yeast. *FEBS Lett.*, 561, 22-28.
- Gros, R., Jocteur-Montrozier, L., & Faivre P. (2006) Does disturbance and restoration of alpine grassland soils affect the genetic structure and diversity of bacterial and N₂-fixing populations ? *Environmental Microbiology* (sous presse)
- Hirsch J., Marin E., Floriani M., Chiarenza S., Richaud P., Nussaume L. & Thibaud MC. (2006), Phosphate deficiency promotes modification of iron distribution in Arabidopsis plants. *Biochimie* (sous presse)
- Keller, C., C. Ludwig, F. Davoli, J. Wochele (2005). Assessment of plant incineration used for phytoextraction of heavy metals. *Environ. Sci. Technol.*, 39, 3359-3367

- Misson J., Raghothama K., Jain A., Jouhet J., Block M., Bligny R., Ortet P., Creff A., Somerville S., Rolland N., Doumas P., Nacry P., Herrerra-Estrella L., Nussaume L. & Thibaud M.-C. (2005) Transcriptional analysis using the *Arabidopsis thaliana* whole genome Affymetrix gene chips determined plants responses to phosphate deprivation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102, 11934-11939
- Misson J., Thibaud M.-C., Bechtold N., Raghotama K. & Nussaume L. (2004) Transcriptional regulation and functional properties of Arabidopsis Pht1 ;4, a high affinity transporter contributing greatly to phosphate uptake in phosphate deprived plants. *Plant Mol Biol*, 55, 727-741
- Pierru, B., Grosse, S., Pignol, D., Sabaty, M. (2006) Genetic and biochemical evidences for the involvement of a molybdo-enzyme in one of the selenite reduction pathways of *Rhodobacter sphaeroides* f. sp. *denitrificans* IL106. *Appl Env. Microb.* 72(5):3147-53.
- Planquart, P., Rabier, J., Coulomb, B., Massiani, C., Boudenne, J.-L. (2006) Colza (*Brassica napus*, v. *Jaguar*) responses to low level of metal inputs through sewage sludge application : Induction of phytochelatin synthesis. *Journal of Soils and Sediments*, 6(4), 221-230
- Préveral S., Ansoborlo E., Mari S., Vavasseur A., Forestier C. (2006) Metal(loid)s and radionuclides cytotoxicity in *Saccharomyces cerevisiae*. Role of YCF1, glutathione and effect of buthionine sulfoximine. *Biochimie*, sous-presse.
- Reymond M., Svistoonoff S., Loudet O., Nussaume L. & Desnos T. (2006) Identification of QTL controlling root growth response to phosphate starvation in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Environ.* 29, 115-125
- Rose J., pppBenard A., Susini J., Borschneck D., Hazemann J.-L., Cheylan P., Vichot A., Bottero J.-Y. (2003) First insights of Cr speciation in leached Portland cement using X-ray spectromicroscopy. *Environmental Science and Technologies* 37, 4864-4870
- Song W.Y., Sohn E.J., Martinoia E., Lee Y.J., Yang, Y.Y., Jasinski M., Forestier C., HWANG I. & Lee Y. (2003) Engineering tolerance and accumulation of lead and cadmium in transgenic plants. *Nat. Biotechnol.*, 21, 914-919
- Vivares, D., Arnoux, P., & Pignol, D. (2005) A papain-like enzyme at work : native and acyl-enzyme intermediate structures in phytochelatin synthesis. *Proc. Nat. Acad. Sci. U S A*. 102, 18848-18853
- Verret F., Gravot A., Auroy P., Préveral S., Forestier C., Vavasseur A. & Richaud P. (2005) Heavy metal transport by AtHMA4 involves the N-terminal degenerated metal binding domain and the C-terminal His(11) stretch. *FEBS Lett.*, 579, 1515-1522
- Verret F., Gravot A., Auroy P., Léonhardt N., David P., Nussaume N., Vavasseur A. & Richaud P. (2005) Overexpression of AtHMA4 enhances root-to-shoot translocation of zinc and cadmium and plant metal tolerance. *FEBS Lett.*, 576, 306-312

Brevets

- Barron A., Cortalezzi M.-M., Rose J., Wiesner M., Organic Acid-FeOOH (Ferroxane) particles and ferroxane-derived ceramics and ceramic membrane, Date de dépôt : 24/01/03, N° : 03732078.5-2111-US0302101
- Garcia D. & Berne C. Procédé de dégradation du TBP par une souche bactérienne photosynthétique. (2003) Dépôt de demande de brevet en France n° 0305762. (2004) Extension internationale n° PCT/FR2004/001165
- Richaud P., Verret F., Gravot A., Auroy P., Vavasseur A. & (2005) "Genetically modified plants and their applications in phytoremediation". Demande internationale de brevet n°PCT/IB2005/000961 avec priorité n°PCT/IB2004/001271
- Dudal, Y., Guillon, E., Dupont, L., Quicampoix, H., Boudenne J.-L. (2006) Method for determining the biogeochemical reactivity of an organic aqueous sample. Extension internationale n° PCT/FR2006/000215
- Vanloot, P., Brach-Papa, C., Boudenne, J.-L., Coulomb, B., Lieutaud G. (2006) Procédé et dispositif de dosage de cations Al^{3+} ou Fe^{3+} pour l'analyse de traces d'aluminium et de fer en milieu aqueux. Brevet FR 06 06938 du 28 juillet 2006.

Axe 4 B - Production d'énergies renouvelables

- Alves A., Record E., Lomascolo A., Scholmeijer K., Asther M., Wessels J. and Wosten H. (2004) Highly efficient production of laccase by the basidiomycete *Pycnoporus cinnabarinus*. *Applied and Environmental Microbiology* 70, 6379-6384
- Bellaïfiore, S., Barneche, F., Peltier, G. Rochaix, J.D. (2005) State transitions and adaptation to changing light require chloroplast thylakoid protein kinase STN7. *Nature* 433, 892-894
- Benoît I., Asther Michèle, Sulzenbacher G., Record E., Marmuse L., Parsigla G, Gimbert I., Asther M., Bignon C. (2006) Respective role of protein folding and glycosylation in the thermal stability of recombinant feruloyl esterase A. *FEBS Letters* (sous presse)
- Bernard, L., Desplats, C., Mus, F., Cournac, L., Cuiné, S. & Peltier, G. (2006) *Agrobacterium tumefaciens* Ndh2: characterization and interaction with bacterial and thylakoid membranes. *FEBS J.* 273, 3625-3637.
- Cayol, J.L., Fardeau M-L, Garcia J-L, Ollivier B (2002) Evidence of interspecies hydrogen transfer from glycerol in saline environments. *Extremophiles* 6, 131-134
- Fontanier V, Ambrosio M, Barbati S. Application of Wet Air Oxidation to the treatment of Meat-and-Bone Meal and Animal By-Products. *Environ. Technol.* **2006**, Submitted
- Fouchard, S., Hemschemeier, A., Caruana, A., Pruvost, J., Legrand, J., Happe, T., Peltier, G. & Cournac, L.. (2005) Investigations on autotrophic and mixotrophic hydrogen photoproduction in sulphur-deprived *Chlamydomonas* cells. *Appl. Environ. Microbiol.* 71, 6199-6205
- Levasseur A., Gouret P., Lesage-Meessen L., Asther Michèle, Asther M., Record E., & Pontarotti P. (2006) Tracking the evolutionary and functional shifts connection : the lipase esterase example. *BMC Evolutionary Biology* (sous presse)
- Levasseur A., Navarro D., Punt P.-J., Belaich J.-P., Asther M. & Record E. (2005) Improvement of ferulic release by action of engineered bifunctional enzymes associating the feruloyl esterase A, the xylanase B and a carbohydrate-binding module from *Aspergillus niger*. *Applied and Environmental Microbiology* 71, 8132-8140
- Meza, J.C., Lomascolo A, Navarro D, Sigoillot JC, Auria R (2006) New process for fungal delignification of sugar-cane bagasse and simultaneous production of laccase in a Vapor Phase Bioreactor. *Journal of Agricultural Food and Chemistry* 54,3852-3858
- Mus, F., Cournac, L., Cardettini, V., Caruana, A. & Peltier, G. (2005) Involvement of a type-II NAD(P)H dehydrogenase in non-photochemical plastoquinone reduction and H₂ photoproduction in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Biochim. Biophys. Acta* 1708, 322-332
- Postec, A., Le Breton, C., Fardeau, M.L., Lesongeur, F., Pignet, P., Querellou, J., Ollivier, B., & Godfroy, A. (2005) *Marinitoga hydrogenotolerans*, a novel member of the order *Thermotogales* isolated from a black smoker chimney on the Mid-Atlantic Ridge. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 55,1217-1221
- Record E., Punt P.-J., Chamkha M., Labat M., Van den Hondel A. & Asther M. (2002) Expression of the *Pycnoporus cinnabarinus* laccase gene in *Aspergillus niger* and characterization of the recombinant enzyme, *European Journal of Biochemistry* 269, 602-609
- Ricq, N, Barbati, S, Ambrosio, M. Optimization of the degradation of sewage sludge by wet air oxidation (2001) Study of the Reaction Mechanism on Cellulose Model Compound. *Analisis*, 29, 872-877
- Robert, R, Barbati, S, Ricq, N, Ambrosio, M. (2002) Intermediates in Wet Oxidation of Cellulose: Identification of Hydroxyl radical and characterization of Hydrogen peroxide. *Water res.*, 36, 4821-4829
- Rumeau, D., Bécuwe-Linka, N., Beyly, A., Louwagie, M., Garin, J. & Peltier, G. (2005) New subunits NDH-M, N and O encoded by nuclear genes, are essential for plastid Ndh complex functioning in higher plants. *Plant Cell* 17, 219-232
- Souley B, Barbati S, Ambrosio M, Tordo P. (2001) Kinetic and Mechanism of Wet Air Oxidation. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40, 1798-1804

Urios, L., Cueff-Gauchard, V., Pignet, P., Postec, A., Fardeau, M.L., Ollivier, B. & Barbier, G. (2004) *Thermosipho atlanticus* sp. nov., a novel member of the *Thermotogales* isolated from a Mid-Atlantic Ridge. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 54, 1953-1957

Brevets

Alves A., Record E., Lomascolo A., Sigoillot J-C., Asther M., Wösten H. (2004). Procédé de surproduction d'une protéine recombinante par des souches monocaryotiques de *Pycnoporus cinnabarinus*. 15 janvier 2004, FR 04/00366. Demande internationale PCT/FR05/00093 pour l'Union Européenne, US et Japon.

Barbati S., Fontanier V. and Ambrosio M. (2006). FR Patent Registration N° 0601481.

Bernard, L., Desplats, C., Mus, F., Cuiné, S., Cournac, L. & Peltier G. Demande de brevet d'invention CEA n°0410715. Production d'H₂ par expression hétérologue d'une NAD(P)H déshydrogénase de type II chez *Chlamydomonas*. Demande internationale PCT N° PCT/FR2005/002511

Levasseur A., Saloheimo M., Navarro D., Andberg M., Monot F., Nakari-Setälä T., Asther M., Record E. (2006). Fusion proteins between plant-wall degrading enzymes and a swollenin and their uses. Union Européenne EP06290562.5 du 6 avril 2006.
