



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Royaume du Maroc



Académie Hassan II
des Sciences et Techniques

MADEV 17

Rabat, Maroc, 16-19 octobre 2017

Compte rendu des conférences de Mathématiques Appliquées à objectifs de Développement 16 au 19 octobre 2017





Thème 1 : Mathématiques appliquées au contrôle de systèmes réels

J.M. Coron et A. EL Jai

La session sur les mathématiques appliquées et contrôle des systèmes réels a été intéressante à plusieurs titres. Elle a suscité un nombre incroyable de propositions de conférences montrant la vitalité scientifique dans ce domaine, essentiellement au Maroc au sein du réseau TDS ; bon nombre de ces propositions (22) ont été présentées sous forme de posters. Par ailleurs les conférences qui ont été données concernent aussi bien des aspects théoriques pour le développement d'outils d'aide à la décision, que certaines applications résultant du contrôle de problèmes réels (aide à la thérapie du cancer, imagerie médicale, concentrateur solaire, ...). La session a suscité, malgré l'heure tardive, un grand nombre de questions et d'échanges ; elle s'est prolongée de plus d'une heure par rapport au timing prévu.

En bref, les résumés des conférences présentées sont les suivants :

Jean-Michel Coron (UPMC, Paris, France) a présenté des méthodes pour contrôler et stabiliser des systèmes, notamment quand les non linéarités sont importantes pour ces deux problèmes. Ces méthodes ont été illustrées sur différents systèmes mécaniques tant en dimension finie (mécanique du solide) qu'en dimension infinie (mécanique des fluides).

Azgal Abichou (École polytechnique de Tunisie, Tunis, Tunisie) a présenté des méthodes pour construire des feedbacks, y compris instationnaires, stabilisant des systèmes de contrôle tant en dimension finie qu'en dimension infinie. Ces méthodes ont été illustrées sur différents problèmes, dont le pilotage de drones et de dirigeable et le forage de puits.

Nihale El Boukhari (Faculté des Sciences de Meknès). Le problème concerne une centrale solaire basée sur des concentrateurs cylindro-paraboliques orientables suivant la position du soleil. Dans ce travail, il s'agit de déterminer le flux optimal de fluide dans le concentrateur focal du miroir solaire cylindro-parabolique. L'approche pour résoudre ce problème s'appuie sur une "discrétisation" du concentrateur solaire, ramenant le problème à une suite de problèmes de contrôles de systèmes bilinéaires. Le résultat obtenu conduit à une température dans le concentrateur voisine de celle assignée et qui optimise le fonctionnement du système.

Soumaya Boujena (Faculté des Sciences Ain Chock, de Casablanca). Ce travail présente une approche pour la construction d'une image 3D, dans une imagerie médicale. La construction d'une image médicale est inévitablement entachée de bruits qui dégrade l'image et peut-être le diagnostic qui s'en suit. Il s'en suit qu'une étape de diminution du bruit est nécessaire. Pour cela un modèle basé sur une équation différentielle non linéaire est proposé pour agir comme un filtre réduisant le bruit entachant l'image. De ce modèle découle un algorithme de reconstruction en 3D.

Youssef Ouknine (Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech). We consider the optimal stopping problem with non-linear f -expectation (induced by a BSDE) without making any regularity assumptions on the pay-off process ξ . We show that the value family can be aggregated by an optional process Y . We characterize the process Y as the Ef -Snell envelope of ξ . We also establish an infinitesimal characterization of the value process Y in terms of a Reflected BSDE with ξ as the obstacle. This characterization is established by first showing existence and uniqueness for the Reflected BSDE with irregular obstacle and also a comparison theorem.



Fouzia Segueni (Université d'Oran, Algérie) et Abdennebi Omrane (UMR Espace-Dev, Cayenne, Université de Guyane) ont présenté une étude pour l'identification des paramètres dans un problème de pollution; l'approche utilisée est celle des sentinelles développée par J.L.Lions. Ce problème apparaît dans l'analyse et le contrôle de problèmes environnementaux, à données manquantes. Ainsi l'approche par sentinelles permet une identification indépendante des données inconnues.

Dans le problème présenté, la donnée manquante est celle de l'état initial. Il est alors démontré que la sentinelle, non sensible aux données initiales, équivaut à un problème de non-contrôlabilité, résolu par une approche variationnelle.

Smahane Saadi (Faculté des Sciences Ben'Msik, Casablanca) a présenté un travail d'aide mathématique à la décision thérapeutique pour le traitement du cancer. Dans cette conférence elle a montré comment la médecine commence timidement à faire appel aux mathématiques pour certains problèmes d'aide à la décision. Le rapprochement entre ces deux disciplines est de plus en plus d'actualité. Dans le cas du cancer, en décrivant le modèle mathématique de la dynamique des cellules tumorales, ainsi que leurs interactions avec les autres cellules et le protocole thérapeutique, on détermine la stratégie de traitement optimal sur une durée de temps finie.

Abdou Sene (Université Gaston-Berger, Saint-Louis, Sénégal) a présenté comment l'approche Lyapunov peut être utilisée efficacement pour stabiliser des systèmes modélisés par des équations aux dérivées partielles. Il a illustré l'intérêt de cette approche sur la stabilisation des équations de Saint-Venant (qui régissent l'écoulement de l'eau dans les rivières) et les équations de Navier-Stokes des fluides incompressibles.

Thème 2 : Mathématiques appliquées et Epidémiologie

G. Sallet et A.Sene

L'exposé plénier, prévu en début de session par Gauthier Sallet et Abdou Sène, est devenu la conférence inaugurale, en raison de l'absence du ministre Sénégalais de l'enseignement supérieur et de la recherche Mary-Teuw Niane, retenu par le séminaire inter-gouvernemental Franco-Sénégalais.

Mathématiques appliquées et épidémiologie mathématique en Afrique : les problèmes, les défis, les verrous.

Cet exposé a fait le point sur la situation de la recherche en épidémiologie mathématique en Afrique. Certains défis et verrous ont été présentés ceux-ci étant abordés de façon plus précise dans la session proprement dite. Cet exposé a suscité de nombreuses questions. Certaines de celle-ci ont obtenu une réponse détaillée dans la session.

La session proprement dite comprenait sept exposés sur des sujets fondamentaux. Chaque exposé a permis de faire le point sur les défis et les verrous spécifiques à l'Afrique. De nouvelles pistes de recherche ont été présentées.

Le problème de la spatialisation des modèles a été abordé par l'exposé de Julien Arino (Canada université du Manitoba, Center for Disease Modelling) : Métapopulations en Epidémiologie.



Le contrôle des moustiques, vecteurs de maladie a été traité par Yves Dumont (France, CIRAD) : contrôle des vecteurs (moustiques) et applications. Cet exposé a fait une revue des modèles de population vectorielle ainsi que leurs principaux défauts. De nouvelles voies de recherche ont été présentées avec l'objectif d'améliorer les stratégies de lutte anti-vectorielles.

Les problèmes d'estimation des paramètres inconnus dans les modèles épidémiologiques ont été abordés par l'exposé d'Abderrahman Iggidr (France/Maroc INRIA) : Utilisation des observateurs en épidémiologie (Théorie du contrôle et épidémiologie). En illustration un modèle intra-hôte du paludisme à *Plasmodium falciparum* incorporant le phénomène de séquestration a été présenté permettant d'illustrer le problème de l'observabilité ainsi que l'identification des paramètres inconnus.

L'épidémiologie animale et celle des plantes présentent des caractéristiques différentes de l'épidémiologie humaine. L'amélioration de l'élevage et de l'agriculture est un défi que doit relever l'Afrique. L'exposé de Suzanne Touzeau (France, INRA) : Epidémiologie mathématique : applications en élevage et en culture, a donné quelques modèles pertinents ainsi que leurs structures particulières, les différenciant des modèles de l'épidémiologie humaine.

Les modèles épidémiologiques sont complexes et leur simulation est une partie importante de la recherche. Les schémas numériques de certains modèles épidémiologiques peuvent conduire à des incohérences. Par exemple une perte de périodicité ou une perte d'équilibre. L'exposé de Jean Lubuma (Congo-Afrique du Sud) : schémas numériques non standard et modèles épidémiologiques montre comment on peut bâtir des algorithmes qui engendrent un système discret qui conserve les propriétés dynamiques du système original.

Le rôle du coût économique de contrôle d'une maladie infectieuse ne peut être ignoré et il est important vis à vis des décideurs en santé publique. L'exposé de Rachid Ouifki (Maroc/Afrique du sud SACEMA) : Modélisation de la Trypanosomiase illustre ce problème. L'impact du climat sur la dynamique des glossines ainsi que la transmission de la maladie aux humains et au bétail (y compris l'impact économique : production de lait, vente de viande ...) est abordé.

Le mouvement des populations joue un rôle crucial dans le déroulement d'une épidémie. L'exposé Diene Ngom (Sénégal) : Be-Codis, un modèle pour prédire la propagation d'une maladie transmissible entre pays. Application à l'épidémie d'Ebola de 2014-2015 aborde précisément cette problématique. Le mouvement des populations, les mesures de prévention ainsi que les paramètres inhérents à chaque pays sont pris en compte.

Thème 3 : Mathématiques appliquées à l'exploitation des ressources marines

JC Poggiale et D.Thiao

La session «Mathématiques appliquées et ressources marines » s'est tenue le mercredi 18 octobre de 14 : 30 à 19 : 00, où 10 exposés ont été présentés pour faire le point sur des problèmes mathématiques en lien avec l'exploitation de ressources biologiques en milieu marin.

Les ressources biologiques marines en Afrique sont sources de nombreux emplois et constituent un enjeu alimentaire important pour les années à venir. Les problématiques associées sont d'ordre écologique, économique et social. La gestion durable de ces ressources nécessite de résoudre des problèmes très variés (optimisation de rendements, estimations de stocks, gestion de la compétition entre flottilles), ce qui s'appuie sur une meilleure compréhension de la dynamique de la ressource dans



son environnement naturel (cycle de vie, comportement, courantologie, interactions biotiques et abiotiques) et sur la définition de paramètres économiques et sociaux pour définir des critères objectifs dans un souci de gestion durable.

Sur le plan technique, les sciences de la pêche visent à développer des méthodes d'estimation des stocks et de leurs dynamiques ainsi que des méthodes de calcul de captures pour une exploitation optimale et durable. Les mathématiques offrent des concepts et un cadre de pensée qui favorise largement ces développements méthodologiques. Au cours de la session, il y a eu des exposés qui ont porté tant sur l'estimation des stocks et leur dynamique que sur l'optimisation des captures, en tenant compte de facteurs variés (variabilité spatio-temporelle de l'environnement, contraintes économiques, variabilité des prix des ressources, etc.).

L'exposé introductif visait à poser le cadre général et présenter quelques éléments historiques et quelques challenges actuels, en citant quelques méthodes utilisées, leurs limites et les extensions possibles. A la suite de cet exposé, neuf présentations ont permis d'illustrer à partir de situations concrètes en Afrique (Maroc, Sénégal, Mauritanie, Afrique du Sud) comment les mathématiques permettaient d'améliorer notre compréhension du fonctionnement de ces systèmes complexes que constituent les environnements naturels des ressources en interaction avec les flottilles.

Estimation des stocks

L'estimation des stocks est sans doute l'un des problèmes les plus difficiles dans la gestion durable de la pêche, compte-tenu de la difficulté d'observation en milieu naturel. La première approche consiste à inférer la biomasse du stock et sa structure en taille/âge à partir des captures par les pêcheurs. Compte-tenu des biais évidents et incontournables de cette approche, qui nécessite d'ailleurs des hypothèses fortes sur la distribution spatiale de la ressource (homogénéité, etc.), elle est aujourd'hui complétée par la modélisation mathématique et informatique, ainsi que par le développement d'autres méthodes d'observation des ressources en milieu naturel. L'exposé de Najib Charouki a notamment montré comment ces méthodes permettent d'estimer les stocks sur les côtes marocaines. L'exposé de Djiga Thiao a illustré comment les mathématiques permettent de proposer des stratégies d'observation et d'analyse des données dans le cas de pêcheries sénégalaises.

Modélisation

La modélisation mathématique et informatique est depuis longtemps une composante essentielle de l'halieutique. Elle continue aujourd'hui d'offrir des voies de réflexion et d'intégration de la complexité des systèmes halieutiques. Elle s'étend de modèles relativement simples qui se focalisent sur quelques facteurs (variabilité spatiale, variabilité des prix de vente des ressources, variabilité des comportements des ressources) à des modèles appelés End-to-End qui s'engagent dans la voie d'une gestion fondée sur une approche écosystémique (Ecosystem-Based Management). Les exposés de Christophe Lett et de Vamara Koné ont par exemple montré comment le couplage entre modèles physique (modèle ROMS) et des modèles lagrangien de transport de particules, permettent de comprendre la dispersion larvaire de petits pélagiques en Afrique du Sud et apportent des éléments de réflexion importants pour une meilleure compréhension du cycle de vie de ces espèces (anchois et sardines notamment). Les exposés d'Ali Moussaoui, de Sidy Ly et de Rachid Mchich ont montré comment les méthodes d'agrégation des variables, en réduisant la complexité des modèles développés, permettent d'apporter des éléments sur l'impact des comportements d'espèces de poissons, du comportement des flottilles pour optimiser les captures et de la dynamique des prix des ressources sur la dynamique d'interaction ressources – flottilles. Enfin, l'exposé de Chakib Jerry a illustré l'apport de la théorie du contrôle optimal sur l'analyse des captures permettant un rendement optimal durable dans le cadre de pêcheries marocaines sur des petits pélagiques.

Estimation des paramètres des modèles



L'apport des modèles dans les processus d'aide à la décision pour une gestion durable nécessite évidemment une paramétrisation raisonnable et une bonne connaissance des gammes de valeurs des paramètres utilisés. L'exposé de Beyah Meisse a illustré comment les mathématiques, et notamment la théorie des probabilités, permettaient de développer des approches efficaces pour une estimation solide des paramètres d'un modèle de dynamique de population de poulpes exploitée en Mauritanie.

Conclusion

Thème 4 : Mathématiques appliquées à la production, la dynamique et la diversité des peuplements végétaux

P.Couteron et M.Tchuenté

1. Présentation générale de la session

Cette session avait pour objectif général de présenter les problématiques de modélisation abordées, en référence à l'Afrique, dans un champ thématique, très vaste, correspondant aux peuplements végétaux. Ce dernier est défini par le rôle central joué par la croissance de plantes, ayant des interactions entre elles (logique de peuplement) ou avec leur environnement, biotique comme abiotique. Ce champ apparaît comme jeune et en construction en Afrique du point de vue de la modélisation dynamique. Les approches principales ayant été jusqu'à maintenant surtout inductives et basées sur les statistiques. La formulation de modèles, selon un schéma hypothético-déductif, est plus rare, quoique se développant par rapport à des thématiques diverses, selon des formalismes variés.

La session visait donc, au travers du choix des conférenciers invités, à illustrer la diversité des thématiques concernées (cultures, forêts, agroforêts, savanes, paysages, bassins-versants, ...) et des formalismes utilisés : modèles matriciels, statistiques, systèmes d'équations différentielles ordinaires, équations aux dérivées partielles. Ceci, avec l'objectif d'identifier les verrous concernant l'utilisation des modèles pour le développement, de cerner des questions de recherche transversales, et de susciter d'éventuelles futures collaborations parmi les équipes représentées dans l'assistance.

La présentation introductive s'est attachée à rappeler ces objectifs et à introduire les grands enjeux de développement pour lesquels les peuplements végétaux sont centraux : agriculture et sécurité alimentaire, biodiversité végétale, ressources et service écosystémiques des forêts. Les enjeux liés à l'agriculture ont été illustrés par des conférences traitant des modèles d'interactions plantes-insectes (conférence d'Yves Dumont), plantes-vecteurs-maladies-vectorielles (Michael Chapwanya) et plantes-pathogènes (Patrice Takam Soh). Ceux liés aux végétations non cultivées et aux forêts ont été évoqués au travers de la dynamique des populations d'espèces exploitées dans les forêts tropicales humides (Vivien Rossi). Elles ont aussi été illustrées au travers des grandes incertitudes concernant l'étendue réelle des types de végétations africaines, et des quantités de biomasse et de carbone afférentes. Ces certitudes appellent la modélisation de la dynamique de la végétation et de sa biomasse à des échelles biogéographiques, aux interfaces entre forêts-savanes (conférence d'Alexis Tchuinté-Tamen) et savanes-désert (Mustapha Tlidi).



2. Questions, commentaires et réponses :

- Suite à la présentation introductive

Un commentaire concernant le problème de présenter des cartes mentionnant des frontières d'états non consensuelles a été formulé dans l'assistance. Il faut cependant mentionner que les cartes présentées durant la session reprenaient des travaux publiés par d'autres auteurs, qu'il est techniquement, voire même déontologiquement, difficiles de modifier.

Question posée : Est-ce que des modèles de réaction-diffusion ne peuvent pas rendre compte de l'établissement des patrons de végétation évoqués, dans le cas des environnements marqués par l'aridité?

Réponse : si, tout à fait. D'ailleurs ce sont les formalismes les plus utilisés dans la littérature dévolue au sujet. La question de la pertinence d'un opérateur de diffusion étant cependant discutable dans le cas de la végétation, nous avons évoqué une autre ligne de modélisation qui sera détaillé dans la présentation à venir du Dr Mustapha Tlidi.

- Suite à la présentation d'Yves Dumont

Questions posées : 1- "Comment était préservé la positivité du système". 2- A t-il été possible d'estimer les bassins d'attraction?

Réponses : 1- La positivité est établie dans l'article Angelov et al. 2017 (Applied Mathematical Modelling , 52 : 437-457). 2 – En toute rigueur, cela reste une question à étudier, mais la référence précédente répond partiellement à cette question, grâce à une propriété des systèmes monotones.

- Suite à la présentation de Michael Chapwanya

Questions posées : 1- Comme la méthode n'a été présentée que pour les équations différentielles ordinaires, est-ce que la méthode non-standard des différences finies a aussi été utilisée pour résoudre les équations différentielles partielles? 2- Quelles sont les différences de modélisation entre les termes de "mortalité naturelle des plantes" et de "récolte sanitaire"?

Réponses : 1- Oui, effectivement, et le schéma non-standard utilisé est en cours de publication. 2- Les deux termes sont représentés par deux paramètres différents dans le modèle. La récolte sanitaire est la suppression physique des plantes infectées, et il a pu être établi que la vitesse de l'infection décroît avec l'augmentation de cette récolte.

- Suite à la présentation de Patrice Takam-Soh

Commentaire : on a une forme d'analyse de survie relativement originale, car les covariables dépendent du temps, ce qui n'est pas classique.

- Suite à la présentation d'Alexis Tchuinté-Tamen

Questions posées : 1- est-ce qu'en considérant la ressource en eau du sol, le modèle prend en compte la topographie? 2 - Est-ce qu'on considère aussi les effets d'érosion liés à cela?

Réponses : Le modèle présenté est minimal et se restreint aux interactions entre deux variables d'état (herbacées et ligneux) en présence de feux. La version du modèle la plus récente utilise une variable climatique, les précipitations totales annuelles, pour paramétrer la croissance des composantes herbacées et ligneuses de la végétation. Ceci revient à supposer un substrat homogène et à ne pas prendre en compte explicitement la ressource en eau du sol et l'influence de la topographie sur cette dernière. L'érosion n'est pas abordée. L'intérêt de l'approche est de prédire de façon conforme à l'expérience, les physionomies végétales attendues le long d'un gradient climatique, sous la forme d'états stables, pour certains alternatifs (cf. le diagramme de bifurcations et les simulations présentées).

- Suite à la présentation de Vivien Rossi



Question : Les simulateurs forestiers de ce type montrent souvent des variations excessives au travers des premières rotations d'exploitation. Est-ce le cas?

Réponse : le modèle est de type Markov non-homogène (les transitions dépendent de l'état de la forêt) et ses résultats sont devenus plus stables et réalistes au-delà de la première rotation grâce à une bonne modélisation de la densité-dépendance du recrutement.

- Suite à la présentation de Mustapha Tlidi

Commentaire fait par un auditeur : "l'auto-réplication peut être aussi obtenue au travers de l'approche par automate cellulaire". Question posée : quel est le rôle des conditions initiales dans l'obtention de l'auto-réplication des taches de végétation?

Réponse : dans le domaine de paramètres qui est favorable à leur existence, les taches de végétation sont ce qui s'appelle en physique des "structures localisées". Leurs localisations dépendent des conditions initiales. Dans le sous-domaine de paramètres menant

Thème 5 : Mathématiques Appliquées et Santé

N.Yousfi, Fac Sciences Ben M'Sik

Déroulement de la session

La session a eu lieu le mercredi 18 octobre de 9H à 13H30 à l'Académie des Sciences et Techniques Hassan II, Rabat. Elle a été présidée par Pr. Abdeslam Boutayeb et Pr. Noura Yousfi.

La conférence plénière d'ouverture, intitulée : « Trade-offs between Oncolytic Potency and Reduced Virus Tumor-specificity in Oncolytic Virotherapy. A Mathematical Modelling Approach » a été animée par le Pr. Rachid OUIFKI de l'Université de Pretoria, Afrique du sud. La présentation a duré 45 minutes et une discussion très intéressante s'en est suivie. Par la suite, sept conférences « invités » se sont déroulées dans l'ordre suivant :

Nom du Conférencier	Titre de la conférence	Affiliation
M. Ch-Chaoui	Mathematical modeling of immune response against cancer evolution by tools of kinetic theory	Faculté polydisciplinaire de Khouribga, Maroc
A.Lakmeche	Chronic Myeloid Leukemia	Sidi Bel Abbès, Algérie
M. Lamlili	A Mathematical Model with optimal control for the impact of fish consumption and mortality heart disease in Morocco	Faculté des Sciences Oujda, Université Mohamed premier, Maroc



W. Boutayeb	The interaction between glucose, insulin, alpha-cells and glucagon : A mathematical model	Faculté des Sciences Oujda, Université Mohamed premier, Maroc
K. Hattaf	Modeling cell-to-cell transmission and adaptive immune response in HIV	CRMF de Casablanca, Maroc

Thème 6: Session mathématiques Appliquées et Economie

La session économie a eu lieu le mardi 17 octobre au matin à l'académie du Royaume du Maroc (notes prises par Pierre-Jean Cottalorda)

Odile Macchi, Membre de l'Académie des sciences de France, a introduit cette session, mentionnant son principal organisateur Adrien Nguyen, économiste, qui avait invité la plupart des orateurs mais était malheureusement empêché pour des raisons familiales.

Gaël Giraud : GEMMES, a dynamical system model for development, economics and climate

Gaël Giraud, économiste en chef de l'Agence Française de Développement, a ouvert la session par une magnifique synthèse sur la faillite des modèles économiques mondiaux actuels et par la proposition d'un modèle réaliste tenant compte des déséquilibres. Il a montré que les modèles économiques théoriques actuellement utilisés par de nombreuses administrations ne permettent pas de prédire quoi que ce soit car malheureusement ils s'appuient sur une hypothèse d'équilibre tout-à-fait irréaliste. Son impressionnante démonstration partait de deux observations paradoxales :

Le crédit bancaire a une influence majeure sur le taux d'emploi, or on peut assister à une très forte expansion monétaire sans tensions inflationnistes

L'accroissement de la dette devrait augmenter le spread, mais on assiste (aux USA depuis 2008) à sa baisse

Ces paradoxes sont incompatibles avec les modèles classiques, ceux qu'utilisent quasi-toutes les institutions financières dans le monde. L'orateur a illustré son propos par les nombreux échecs des modèles standards, notamment en Grèce. Les racines de ces échecs se trouvent dans leur irréalisme multiple :

- on y suppose que toutes les variables sont toujours à l'équilibre, ce qui empêche de décrire des trajectoires hors équilibre, alors que des chocs exogènes inexpliqués en font sortir ;
- les anticipations des agents sont supposées rationnelles, ce qui n'est pas sûr du tout ;
- les rendements d'échelle sont supposés décroissants, mais ce n'est pas toujours le cas, dans l'industrie mais aussi le numérique, les énergies vertes, etc. ;
- les modèles comportent une confusion majeure entre banque et institution financière non bancaire, alors que les banques créent de la monnaie ;
- les inégalités sont supposées n'avoir aucune influence sur l'économie, ce qui est faux ;
- l'énergie et les ressources n'ont pas d'impact sur la modélisation comme si on pouvait produire du PIB sans énergie ;
- les boucles de rétroaction climat quand elles existent, sont inoffensives ;
- l'oubli du théorème Sonnenschein–Mantel–Debreu, critique mathématique fondamentale des fondations micro-économiques des modèles macro-économiques. Notamment, au niveau macroéconomique, il y a de l'émergence.



A partir de ce constat, Gaël Giraud a présenté le modèle GEMMES développé par l'AFD :

- il combine trois sources majeures d'instabilité : climat, finance et inégalités ;
- il développe des systèmes dynamiques non-linéaires ;

Il en découle des recommandations politiques pour le protocole de la COP21. Gaël Giraud a aussi traité la question de la raréfaction des ressources naturelles, le recyclage n'étant pas une solution définitive, juste un moyen de retarder un peu l'échéance.

La modélisation présente plusieurs traits importants : la rationalité des agents n'est pas parfaite, mais limitée ; elle est « stock-flow consistant » ; elle permet de formaliser l'approche de Minsky à partir d'une relation prédateur/proie de type Lotka-Volterra ; elle inclut la dynamique de la dette ; les « business cycles » y sont endogènes ; enfin il y a plusieurs équilibres de long terme.

De nombreuses extensions sont possibles, par exemple selon des enjeux liés au climat, dont Gaël Giraud a fait une liste complète. En tenant compte du réchauffement climatique, le bassin d'attraction se rétrécit, et devient plus difficile d'accès. Malheureusement la situation actuelle ne correspond pas au bassin d'attraction des 2°C : il faudrait notamment des salaires plus hauts et moins de chômage. Il faudra fournir de gros efforts pour y arriver et ainsi éviter une catastrophe.

Gaël Giraud a ensuite établi un lien entre la modélisation économique et la thermodynamique, en montrant que les modèles classiques violent les 2 premières lois (on ne fait pas de prospérité sans dissipation d'énergie). L'élasticité du PIB par rapport à la dissipation d'énergie serait de 40 à 60% et non 8 à 10%, donc beaucoup plus importante que prévu jusque-là. En outre il met aussi en évidence le « phénomène de la reine rouge » selon lequel, si on extrait trop vite, on épuise les ressources (pincement de potentiel) mais on ne produit pas plus : ce pourrait bien être l'une des raisons majeures d'effondrement des civilisations. Il y aurait un niveau optimal d'entropie à respecter.

Gaël Giraud a conclu sa présentation sur les outils à disposition pour agir contre le dérèglement climatique, la surexploitation des ressources ou encore la croissance des inégalités humaines. Il propose notamment le recours au contrôle optimal à partir de divers éléments : les taxes, les investissements publics, les subventions (pour la puissance publique), puis des paramètres qui encadrent l'activité économique comme le ratio des réserves des banques. En réponse à une question, il suggère également que la théorie de la viabilité pourrait être une étape suivante de modélisation.

Cette présentation extrêmement claire propose un changement de paradigme macroéconomique, seul capable de répondre à des paradoxes persistants et très handicapants, voire catastrophiques, pour le développement humain.

Nerry Christelle MAKOUTCHOUOP : Modélisation bioéconomique du potentiel de diversification des cultures vivrières au Cameroun.

A la suite de crises mondiales dans les années 80, et alors que la Cameroun était l'un des leaders mondiaux dans la production de cacao, il a fallu diversifier les cultures, notamment pour améliorer les conditions de vie des producteurs.

L'objectif du modèle bioéconomique présenté est d'estimer les combinaisons optimales des ressources qui maximisent la production des cultures vivrières.

A partir de la collecte de données dans des jeunes cacaoyères diversifiées, pour trois types de ménages, l'auteur propose une analyse économétrique pour estimer les fonctions de production et



d'utilité, toutes deux de type Cobb-Douglas. Il s'agit ensuite de mettre en place un programme de maximisation de ces utilités, sous les contraintes productives. Les conclusions sont les suivantes :

- l'utilisation optimale des ressources favorise l'obtention de bons rendements en cultures vivrières ;
- le respect des quantités consommées recommandées permet aux trois catégories de ménage d'obtenir une satisfaction maximale.

Dans les questions, il a été noté qu'à la place d'une fonction de production de type Cobb-Douglas on pouvait aussi utiliser une fonction CES.

Mamadou Abdoulaye Konte : Dynamic of Consumption Price Index in Senegal: Does the rainfall matter ?

M. Kone a présenté un travail d'économétrie sur le lien entre la pluviométrie et le niveau général des prix au Sénégal. L'agriculture est principalement de subsistance, et occupe quasi 50% de la population active, représentant 14% du GDP. En lien avec les pluies M. Mamadou Kone propose un modèle discret qu'il estime à partir des méthodologies AR et ECM.

La principale conclusion tient à la place des ressources de pluies qui doivent donc être très sérieusement considérées. Il convient notamment de mettre en œuvre des outils de gestion et stockage de cette ressource pour éviter l'impact des chocs.

Marie-Hélène Durand "How much can we consume? Intergenerational equity, a viability approach"

Mme Durand revient sur le conflit d'intérêt pour le partage des ressources et la création de richesses : il n'y a pas de réciprocité entre les générations, c'est uniquement dans un sens.

Pour cette question de l'équité intergénérationnelle, elle propose une approche très normative et axiomatique pour ne pas empêcher l'amélioration du bien-être des générations futures ni sacrifier la génération actuelle. Le cadre s'énonce ainsi :

- horizon infini (on ne va pas arrêter l'humanité à partir d'une certaine date) : qu'est-ce qu'on peut préserver à l'infini ? Comment répartir ?
- conflit d'intérêt entre les générations.

Cette ancienne question est un peu spéculative mais les motivations sont très concrètes. Elle est formalisée dans Ramsey 1928, puis reprise par Solow et Stiglitz avec le problème de l'épuisement des ressources, enfin par Asheim sous l'énoncé de la « sustainability ». Un planificateur social va mettre en œuvre la solution optimale en répertoriant toutes les trajectoires, pour les comparer et sélectionner la meilleure.

On peut définir trois critères principaux de sélection :

- maximin de Rawls
- « time discounted utilities » et ses variantes, souvent très décriées car fonction du taux d'intérêt. Ainsi un taux d'intérêt très faible avantage les générations futures et inversement.
- « rank discounted utilities » : toute la trajectoire de bien-être est considérée, les utilités étant ordonnées par rang. Cela est difficile à mettre en œuvre.

Toutes ces approches sont conséquentialistes, là où l'approche normative permet de partir de conditions d'équité fixées en amont. Aucune n'est pleinement satisfaisante.

L'auteur définit un modèle d'accumulation de capital avec une ressource épuisable, selon deux conditions : anonymat (aucune génération ne doit être discriminée), efficacité au sens de Pareto.



Marie-Hélène Durand calcule un noyau de viabilité et vérifie que les contraintes en sont toujours respectées. Elle montre qu'on peut calculer de manière algorithmique une fonction d'équité. Cette approche apporte une vraie complémentarité avec la présentation.

Thème 7 : Mathématiques appliquées à l'énergie

F.Lamnabhi-lagarrigue et G.Kenne

Courte introduction par Françoise Lamnabhi-Lagarrigue : « Ce thème concerne la production, le transport et la gestion de l'énergie en tenant compte le plus possible des énergies renouvelables. Il est très critique actuellement partout dans le monde et en particulier en Afrique. Chacun sait que le potentiel d'énergie renouvelable est énorme en Afrique et que, d'un autre côté, la demande en électricité est extrêmement importante. Cependant, la technologie à ce jour est très loin d'être maîtrisée. Les mathématiques permettent et permettront de développer ces technologies. Ce qui, à l'inverse, est aussi remarquable, et en particulier pour nos jeunes chercheurs, c'est la possibilité de lever des problèmes mathématiques fondamentaux, à partir des problématiques physiques complexes, exactement comme cela a été dit ce matin par Gauthier Sallet et Abdou Sene pour le domaine de l'épidémiologie. Donc ce sont ces échanges constants entre mathématiques et contexte réel qui, sans aucun doute, permettront des avancées technologiques puissantes, robustes et économiquement viables. »

Conférence Plénière: Challenges of mastering the energy sector for development in Africa.
Francoise Lamnabhi-Lagarrigue (CNRS-INS2I-L2S, Université Paris Saclay, Centrale Supélec, France) et Godpromesse Kenne (University of Dschang, Cameroon).

Question relative à la formation dans le secteur des énergies renouvelables et la maîtrise de la technologie (modélisation) du matériel dans ce secteur en Afrique.

Éléments de réponse formulés : Il existe déjà des formations en énergie renouvelables en Afrique dans les cycles de Licence et Master. Mais le nombre de ces formations est relativement faible sans doute parce que le secteur des énergies renouvelables n'est pas encore très développé. Les travaux sur la modélisation du matériel du secteur des énergies renouvelables ont aussi commencé et on note des avancés au niveau du dimensionnement des systèmes hybrides. Les contributions des conférences invitées de cette session vont permettre de mieux apprécier l'état d'avancement des travaux dans ce secteur.

Conférences invitées :

1- Distributed generation: renewable energy source integration by Micro-Grids.
Gilney Damm (Université d'Evry Val d'Essonne, France)

La question était de savoir si l'industrie était intéressée par ce travail et si des collaborations avec des partenaires industriels pouvaient être établies.

Éléments de réponse formulés : L'industrie s'intéresse beaucoup au contrôle des réseaux électriques, en particulier l'intégration des sources d'énergie renouvelables et l'utilisation des micro-réseaux insulaires pour atteindre cet objectif. À titre d'exemple, parmi mes 5 doctorants actuels, 4 sont en co-direction avec l'industrie, et le 5ème est dans un sujet prospectif qui est déjà en discussion avec certains



partenaires industriels et devrait intégrer une nouvelle collaboration. De même, nous venons de soumettre un projet européen avec 19 partenaires de 6 pays, dont 5 sont de très grandes entreprises, 9 PME et 5 partenaires universitaires / publics. Les résultats théoriques sont ensuite vérifiés en laboratoire sur bancs d'essai, puis testés dans des démonstrateurs à grande échelle. La plupart des résultats ont été publiés comme articles scientifiques et pour certains des brevets ont été déposés.

- 2- An approach on optimized energy management for standalone PV system with application of validated mathematical models.

Smail Semaoui (Division Photovoltaïque, Centre de Recherche sur les Energies Renouvelables, Alger, Algérie)

Question: *Est-ce qu'il y a une sollicitation de la part des industriels pour ce type d'application ?*

Éléments de réponse formulés : Dans le contexte Algérien, l'orientation est actuellement vers les grandes centrales photovoltaïques connectées aux réseaux électriques de grande puissance. L'approche présentée, destinée beaucoup plus aux systèmes PV autonomes, n'est pas encore soutenue financièrement par les industriels. Cette étude est cependant appuyée par le gouvernement, dans mon Centre de Recherche, car elle requiert beaucoup d'intérêt pour la gestion future de sites isolés.

- 3- Increasing electricity access in remote villages using Photovoltaic/Diesel Hybrid Systems.
Eustace Mbaka Nfah (University of Bamenda, Cameroon)

Question: *N'y a-t'il pas d'autres options ?*

Éléments de réponse formulés : Le but principal de mon travail est d'encourager l'achat et l'installation de composants PVHS (Photovoltaic/Diesel Hybrid Systems). Il s'agit de minimiser les dépenses sur les projets photovoltaïques autonomes en cours au Cameroun. D'autres options d'alimentation existent, telles que la gazéification de la biomasse pour produire du gaz de synthèse qui peut être utilisé pour la production d'électricité. Les digesteurs de biogaz peuvent transformer les déchets de bovins et de porcs en biogaz, qui peuvent être utilisés pour générer de l'électricité en utilisant des générateurs de biogaz. Le défi consisterait à mettre au point des gazéificateurs de biomasse et des digesteurs de biomasse capables de produire suffisamment de gaz de synthèse ou de biogaz pour des générateurs de 2,5 kW à 25 kW. Les jeunes chercheurs africains pourraient s'inspirer des pratiques en Inde, au Népal et au Bangladesh. La principale difficulté est ici le capital nécessaire pour les installations expérimentales.

Question: *Est-ce qu'il y a une sollicitation de la part des industriels pour ce type d'application ?*

Éléments de réponse formulés : Non. Les résultats obtenus pour les émetteurs-récepteurs MTN ont été soumis à l'entreprise après la publication et il n'y a pas de retour d'information. Cependant, les travaux publiés étaient basés sur une approche numérique basée sur les heures annuelles désirées du générateur diesel.

Question : *Y a-t'il une implémentation pratique en vue ?*

Éléments de réponse formulés : Il y a la possibilité de construire un projet pour l'hôpital de district de Tubah, situé dans la sous-division Tubah de la division Mezam dans la région du nord-ouest du Cameroun. Cela fournira l'éclairage dans les salles de patients, les maternités, la salle d'opération et les résidences des médecins pendant les coupures de courant. L'hôpital de district fournit des services de soins de santé à trois villages et à l'Université de Bamenda, qui compte environ 20 000 étudiants.



L'approche de dimensionnement proposée dans cette communication peut être utilisée pour évaluer un PVHS optimal pour cet hôpital. Le financement du projet peut alors être augmenté pour réaliser une installation comme celle actuellement utilisée sur l'île de Kythnos en Grèce.

4- Optimization of absorption systems: case of the refrigerators and heat pumps
René Tchinda (University of Dschang, Cameroon)

Question : *Quelle est la différence entre le coefficient de performance (COP) et l'efficacité ?*

Éléments de réponse formulés : Le coefficient de performance du système d'absorption est l'efficacité de ce système d'absorption.

Question : *Quelles sont les perspectives et surtout les défis mathématiques ?*

Éléments de réponse formulés : L'analyse de la stabilité locale de deux, trois ou quatre sources d'absorption des réfrigérateurs et des pompes à chaleur fonctionnant au coefficient de performance écologique maximal, sera effectuée dans nos futurs travaux. Il serait intéressant de développer le modèle mathématique de gestion de toutes les sources d'énergies dans un pays africain.

5- Solar powered cellular networks: issues, challenges and solutions
Biplab Sikdar (National University of Singapore, Singapore)

Question : *L'impact économique positif de l'introduction de réseaux cellulaires dans des endroits reculés devrait-il être pris en compte lors de la décision d'introduire des réseaux ?*

Éléments de réponse formulés : Il y a certainement un impact positif sur l'économie (par exemple la création d'emplois) lorsque les technologies de l'information et de la communication sont introduites dans une zone. Dans une large mesure, c'est au gouvernement de le reconnaître et de contribuer à promouvoir l'introduction de telles technologies en offrant des incitations appropriées telles que des allègements fiscaux.

Question : *Qu'en est-il du coût d'élimination des vieilles batteries dans le cadre d'optimisation ?*

Éléments de réponse formulés : Ceci doit absolument être ajouté. Le coût de la batterie tel qu'il est inclus dans le cadre d'optimisation peut être interprété de manière à inclure à la fois le coût d'achat et celui de l'élimination.

Question : *Dans quelle mesure les modèles de Markov pour l'irradiation solaire sont-ils appropriés ?*

Éléments de réponse formulés : Il existe un certain nombre de modèles d'irradiation solaire présentant chacun des avantages et des inconvénients. Les modèles de Markov peuvent capter la variabilité, tant que le nombre d'états est suffisant. Mais en augmentant le nombre d'états, on augmente la complexité de calcul.