

L'eau, une énergie renouvelable, à préserver et à mieux gérer.

Jacques Sainte Marie, chercheur Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement)/Laboratoire Jacques-Louis Lions, Équipe-projet INRIA, ANGE (Numerical Analysis, Geophysics and Ecology).

avec la collaboration de Marie-Odile Bristeau, chercheur INRIA et Edwige Godlewski, Professeur Laboratoire Jacques Louis Lions

Enjeux environnementaux

Alors que les préoccupations associées à la modélisation des écosystèmes, à la préservation de l'environnement et au développement durable ont une urgence particulière, d'importantes questions, qui relèvent des mathématiques appliquées, se posent dans des domaines tels que l'impact et la prévention des catastrophes naturelles, la gestion des ressources en eau, la biogéochimie des eaux et leur évolution, l'impact des écoulements sur les sols et les structures. Et les connaissances actuelles tant au niveau de la modélisation que de la simulation numérique ne permettent de répondre que très imparfaitement à ces problématiques.

Comme le montre l'énumération ci-dessus, ce champ est très vaste. Pour ces problèmes souvent multi-physiques et multi-échelles, la difficulté est d'isoler un problème précis pour lequel le formalisme mathématique peut apporter une plus-value. Le problème de la captation du CO₂ dans les océans illustre cette complexité. Il s'agit d'un phénomène couplant hydrodynamique, biologie, chimie et faisant intervenir l'atmosphère et les variations climatiques. Il est caractérisé par des couplages souvent mal connus, un nombre énorme d'espèces et de réactions à considérer avec des constantes de temps très différentes, une grande variabilité spatiale/temporelle et des mesures expérimentales partielles et peu nombreuses.

La taille et la complexité des problèmes rencontrés ne doivent pas être un frein à l'implication des mathématiciens dans ces disciplines. Mais étant donnée la difficulté d'y isoler des problèmes de taille et de complexité réduites, il doit s'agir d'un investissement de long terme.

Énergies marines

Parmi les secteurs d'activité en plein essor, citons celui des énergies renouvelables ou décarbonnées. Dans le domaine marin, de nombreux systèmes sont proposés pour récupérer l'énergie des vagues, des marées et des courants marins afin de produire de l'électricité. Citons par exemple les hydroliennes, divers systèmes de bouées transformant les variations de la surface libre en électricité ou encore des turbines actionnées par l'énergie des vagues. Il s'agit de systèmes assurant une production souvent modeste par rapport à des centrales thermiques ou nucléaires mais de taille réduite et pouvant être installés facilement.

L'optimisation de ces systèmes (dispositif, forme, positionnement, faible coût d'installation, durabilité, ...) est une thématique originale et complexe qui nécessite des outils numériques performants.

Divers systèmes sont actuellement proposés et implantés mais leur optimisation est pour l'instant le talon d'Achille de ces dispositifs. Alors que dans l'aménagement d'un port, on cherche à minimiser l'agitation générée par la houle, on cherche ici à maximiser l'énergie des vagues. Un point important de cette thématique est l'optimisation de la bathymétrie d'un domaine géométrique afin, par exemple, de focaliser la houle et maximiser le rendement d'un dispositif houlomoteur.

Écologie - biodiversité

Le couplage de modèles biologiques avec l'hydrodynamique ajoute l'advection et la diffusion des quantités considérées aux termes de réaction décrivant la croissance ou la décroissance des concentrations de ces quantités. L'analyse et la simulation des modèles ainsi obtenus est complexe, les non-linéarités sont

importantes et les constantes de temps de la biologie et de l'hydrodynamique très différentes. Au sein de cette thématique très vaste, voici deux sujets que l'on décrit plus précisément.

▶ **Les écosystèmes lacustres**

Contrairement aux océans, les lacs sont des systèmes de taille plus réduite, relativement fermés (variations relatives du volume assez faibles). Ils se prêtent donc mieux à une modélisation mathématique et ce d'autant plus que l'on peut isoler la dynamique de certains groupes d'espèces. Il s'agit de modéliser la réponse d'un lac aux forçages atmosphériques, aux évolutions climatiques ou aux éventuelles pollutions. Si on connaît bon nombre de mécanismes élémentaires responsables de cette dynamique, leur interaction dans un milieu hétérogène dans l'espace et variable dans le temps est mal maîtrisée. Citons par exemple la prédiction des phénomènes d'eutrophysation, le développement de bactéries nocives telles les cyanobactéries ou encore les phénomènes d'upwellings [2, 4].

▶ **Culture de micro-algues**

Depuis plusieurs années et dans divers pays, on expérimente des bassins à haut rendement où l'on optimise la croissance d'algues pour en extraire un biocarburant [1, 3]. En effet, certaines espèces de microalgues à forte teneur en lipides, pourraient conduire à la production de biocarburants dits de 3^{ème} génération. Elles offrent, par rapport à la culture de plantes supérieures (par exemple les oléagineux), des rendements potentiellement beaucoup plus grands, typiquement un ordre de grandeur. La modélisation de l'hydrodynamique des bassins et de son couplage avec la biologie est une des clés de la réussite de tels projets. En effet, soumis à une alternance jour/nuit et à un gradient d'intensité lumineuse qui dépend des variations de leur position par rapport à la surface libre, les microalgues mettent en place des phénomènes de photoadaptation complexes. L'optimisation du régime hydrodynamique du bassin permet donc de maximiser la croissance des microalgues cultivées et donc le rendement du bassin tout en réduisant la dépense énergétique associée, par exemple, l'énergie de la roue à aubes générant l'agitation du bassin, voir image ci-dessous.



Conclusion

En géosciences, avec la multitude des phénomènes physiques dont on souhaite rendre compte, de nouveaux modèles sont régulièrement présentés. Il est nécessaire d'envisager la pertinence d'un modèle à la fois sous l'angle de sa capacité à reproduire des données expérimentales mais aussi sous celui de la façon dont il est dérivé et de ses propriétés (compatibilité thermo- mécanique,...). Il est vain de chercher à développer des techniques d'analyse numérique robustes pour un modèle ne satisfaisant pas, au niveau continu, des propriétés minimales de stabilité.

Les modèles proposés ou bien ceux auxquels on s'intéresse doivent rester de complexité raisonnable par rapport aux mesures in situ ou expérimentales permettant de les valider. Cette complexité raisonnable est également primordiale dès lors que l'on s'intéresse à la simulation d'écoulements réels donc avec de grandes échelles spatiales et temporelles. Beaucoup de techniques numériques, validées sur des modèles 1D s'avèrent inutilisables en pratique sur des problèmes 3D car trop coûteuses en temps de calcul.

A noter qu'une fois ces modèles validés, on cherche souvent à exploiter leur caractère prédictif et pas seulement explicatif. Dans ce contexte, on est amené à s'intéresser à la résolution de problèmes inverses par exemple l'assimilation de données. Et pour des systèmes ayant une dominante hyperbolique nonlinéaire, peu diffusifs et admettant des solutions irrégulières, de nombreuses questions scientifiques sont ouvertes.

Les problématiques scientifiques décrites dans cet article sont clairement pluridisciplinaires et nécessitent des interactions fortes entre mathématiciens, géophysiciens, hydrauliciens et acteurs de terrain. La rencontre entre ces différents acteurs n'est pas toujours naturelle et l'existence de programmes ou de structures transdisciplinaires (appels à projets, GdR) doit donc être encouragée. Notons à ce sujet, le GdR "TransSNat" <http://transnat.univ-rennes1.fr/>, 2009 et le GdR "EGRIN" <http://gdr-egrin.math.cnrs.fr/>, 2013.

- (1) H. Hadiyanto, Steven Elmore, Tom Van Gerven, and Andrzej Stankiewicz, **Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (hrap) design**, *Chemical Engineering Journal* 217 (2013), no. 0, 231 – 239.
- (2) Salençon M.-J. and J.-M. Thébault, **Modélisation d'écosystème lacustre.**, Masson, 1997.
- (3) B. Sialve, N. Bernet, and O. Bernard, **Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable**, *Biotechnology Advances* 27 (2009), no. 4, 409–416.
- (4) D.B. Van de Waal, J. Verspagen, J. Finke, V. Vournazou, A. Immers, W. Kardinaal, L. Tonk, S. Becker, E. Van Donk, P. Visser, and J. Huisman, **Reversal in competitive dominance of a toxic versus non-toxic cyanobacterium in response to rising CO₂**, *ISME J (Journal of Microbial Ecology)* 5 (2011), no. 9, 1438–1450.