

Descriptif et enjeux

La préservation de l'environnement, la prévention et la maîtrise des impacts des risques naturels sont au cœur d'enjeux socio-économiques majeurs. L'importance de ces risques naturels (mais aussi les risques technologiques) a été souligné dans la déclaration du G-Science 2012 (qui regroupe 15 académies des sciences) et a été évalué à 200 milliards de \$ par an ! ¹

Les écoulements non stratifiés ou gravitaires (dans lesquels la gravité intervient) interviennent dans de nombreuses catastrophes naturelles (inondations, coulée de boue, de lave, tsunami) mais aussi pour décrire des phénomènes moins violents mais importants sur la qualité de l'eau et des sols.

L'obtention de bons modèles adaptés aux phénomènes physiques étudiés, simulés efficacement et validés est un enjeu important pour la communauté des mathématiciens appliqués. C'est l'objectif que se fixe le GdR EGRIN.

État de l'art

La modélisation (obtention de systèmes d'équations, dérivation de modèles simplifiés, justification des liens entre différentes approches) et les méthodes numériques adaptées ont fait des progrès spectaculaires dans les dernières années. Citons par exemple les schémas « équilibrés » qui permettent de préserver les états d'équilibres (lac au repos par exemple) ou la positivité de la hauteur d'eau, propriétés physiquement évidentes, mais que les schémas numériques « usuels » ne vérifient pas en général, ce qui est, outre les inconvénients pour l'analyse mathématique de ces méthodes, très gênant pour l'utilisation de ces codes (problèmes d'instabilités) et la confiance que l'on peut apporter aux résultats de simulations numériques (susceptibles de fournir des résultats physiquement non réalistes). Ces avancées ne sont pourtant qu'assez peu connues en dehors de la communauté mathématique et très rarement implémentées dans les codes opérationnels, ceux utilisés pour la prédiction et l'évaluation des risques.

Notons également que, dans de nombreux cas, l'évaluation des risques est basée principalement sur l'analyse statistique d'événements passés, ce qui ne permet pas d'anticiper des situations radicalement nouvelles. Par exemple, les services de prévisions d'inondations sont basés sur la mesure des crues passées, ce qui ne permet pas de tenir compte par exemple de l'évolution de l'aménagement du territoire (les sols urbanisés n'ayant pas les mêmes caractéristiques que les sols agricoles, plus perméables) ou des risques liés à des constructions humaines (rupture de barrage hydraulique par exemple) ou des événements météo extrêmes, liés au changement climatique. La prévision d'une crue centenaire basée uniquement sur les événements passés (assez rares heureusement par définition) pour lesquels les données sont donc peu nombreuses (et alors que la situation a fortement évoluée) paraît donc assez peu fiable. Les simulations numériques décrivant directement le phénomène en y intégrant la situation (voire imaginer des situations futures pour évaluer l'impact de changement dans la carte d'occupation des sols par ex.) permettent d'apporter des réponses complémentaires. Pour les événements rares/extrêmes, soulignons l'importance de bâtir des scénarii réalistes avec les acteurs de terrain (géophysiciens, hydrologues,...) permettant de réaliser des simulations a priori.

Problématiques mathématiques

La réalisation de simulations fiables pose de nombreuses questions de modélisation (comment choisir le « bon » modèle souvent connu de façon empirique et validé dans un cadre restreint, comment intégrer la

¹ Voir par exemple la présentation par Ghislain de Marsily sur le site de l'académie
www.canalacademie.com/ida9022-15-Academies-des-sciences-adressent-une-declaration-commune-au-G20.html

complexité extrême des situations, par exemple d'un point de vue géométrique, de la variabilité (spatiale) des paramètres des modèles qui sont d'ailleurs très souvent connus que d'une façon très imprécise), d'analyse mathématique (e.g. justifier des asymptotiques pour dériver de modèles simplifiés) ou numériques (pour approcher les solutions en préservant leurs propriétés).

On pourrait classer les problématiques en trois grands domaines :

- statistiques (par ex. échantillon préférentiel & système de particules en interaction),
- analyse EDP et modélisation (par ex multi-échelle),
- algorithmique et numérique (multigrille, ondelettes),

qui permettent de réduire **de façon spectaculaire les coûts de calculs des simulations numériques**, indispensables pour l'évaluation des risques par rapport à une approche « directe ». Typiquement faire du Monte Carlo sur le modèle le plus compliqué et la géométrie la plus fine s'avère en pratique impossible car on ne dispose pas des données et si on les avait, les coûts seraient prohibitifs : prévoir une crue après qu'elle se soit produite perd de son intérêt. Il ne s'agit pas de dire qu'il n'y a pas besoin de grands moyens de calcul (de taille diverses : laboratoires, mésocentres, centres nationaux et européens sont utiles) mais qu'il est nécessaire et souhaitable de les utiliser de façon adaptée/optimisée.

Pistes et prospectives

Voici quelques verrous identifiés pour la modélisation des écoulements (granulaires) : manque d'une description macroscopique adéquate pour les phénomènes de transition statique-mobile (comment prédire le déclenchement d'une avalanche, d'une coulée de boue), effets anisotropes, variation de densité, de mobilité, mélange de matériaux de taille variable (polydispersion des sédiments), compréhension des mécanismes d'érosion et de déposition. On peut également chercher des alternatives aux équations de type SW, par exemple les modèles multicouche qui permettent de traiter de la stratification des vitesses.

D'un point de numérique, il y a plusieurs difficultés, notamment par exemple :

- pour le « volumique » : coût CPU, instabilité dans le traitement des surfaces libres, adaptation de maillage, problèmes liés à la modélisation (cf plus haut)
- pour le « couche mince » : simulation de modèles multicouches, prise en compte d'effets non hydrostatiques, et des caractéristiques mal décrites par la modélisation (cf plus haut).

Un autre aspect important et une piste prometteuse est l'étude des problèmes inverses associés à ces systèmes hyperboliques, ce qui pourrait ouvrir la voie à de nouvelles techniques de **calibration des paramètres et d'assimilation de données**.

Pour illustrer ces pistes sur un exemple, on peut penser au problème de la description des écoulements sur un sol agricole et l'effet de ces écoulements sur l'évolution de la topographie. Il est illusoire de voir décrire cela directement ; on ne connaît pas la géométrie des sillons dû au travail agricole par exemple qui pourtant ont un effet déterminant sur les écoulements tant que les sillons n'ont pas débordé. Des approches multi-échelles permettent d'intégrer les effets de cette micro-topographie dans des modèles plus macroscopiques (sous forme de frottement anisotrope par exemple). C'était l'objectif du projet ANR interdisciplinaire METHODE. De tels résultats **nécessitent des contacts longs entre communautés scientifiques assez éloignées** (en l'occurrence hydrologues, spécialistes des sciences du sols, mathématiciens et informaticiens).

D'autres études pour intégrer des effets à petites échelles dans des modèles grandes échelles sont envisageables par exemple pour relier les mécanismes d'arrachement de particules du sol par l'impact des gouttes de pluie à des modèles qui sont actuellement tous heuristiques pour les mécanismes d'érosion ou pour proposer de nouvelles lois de frottement qui ne soient pas uniquement empiriques mais qui soient obtenues à partir de la description fine des interactions aux interfaces eau/sol.

La constitution d'équipe pluridisciplinaire ou le soutien au projet pluridisciplinaire, sur le long terme, est indispensable pour apporter des solutions adaptées et atteindre de tels objectifs.

Notons également qu'un aspect très important dans ces questions de risques (naturels) est non seulement de les prévoir mais de chercher les moyens de les éviter, ou si cela n'est pas possible de trouver des moyens d'en limiter l'impact négatif. Ces questions de « gestion des risques » impliquent également des aspects psycho/socio/économiques et vont de ce champ d'étude un cas exemple de **domaine très interdisciplinaire d'étude de systèmes (très) complexes.**

Les interactions avec les SHS doivent donc être développées. C'était l'un des aspects du projet européen FuturICT <http://www.futurict.eu/> dont la déclinaison nationale était le projet Labex HumanICT dont certaines actions ont été mis en place comme le groupe de travail entre P6, P7 et Orléans. Voir le site web : <http://humanict.csregistry.org/>.

Situation internationale

En France, les collègues intéressés par ces sujets sont invités à se joindre au GdR EGRIN, créée en janvier 2013 et dont la liste de diffusion compte déjà 180 membres (70 participants à la 1ère école en avril 2013).

Liste non exhaustive de collègues travaillant sur des sujets connexes à l'étranger :

- Stephane Clain, Universidade do Minho ,Portugal
- Enrique Fernandez-Nieto, Univ. Séville , Espagne
- Randall LeVeque, University of Washington, Seattle, USA
- Sebastian Noelle, RWTH Aachen, Allemagne
- Carlos Pares, Univ. Malaga, Espagne
- Giovanni Russo, Univ. Catania, Italie

Références

1. E. Audusse et al., a fast and stable well-balanced scheme with hydrostatic reconstruction for shallow water flows, SIAM Jal Sci Comp, Vol. 25, No. 6, pp. 2050 ?2065 (2004).
2. F. Bouchut, Nonlinear stability of finite volume methods for hyperbolic conservation laws, and well-balanced schemes for sources, Frontiers in Mathematics series, Birkhäuser, ISBN 3-7643-6665-6, 134 p. (2004)
3. Jean-Frédéric Gerbeau, Benoit Perthame Derivation of Viscous Saint-Venant System for Laminar Shallow Water ; Numerical Validation Rapport INRIA -R4084 (2000)