

UNE APPROCHE MULTI-AGENTS POUR SIMULER LES INTERACTIONS ENTRE DES ACTEURS HÉTÉROGÈNES DE L'INFILTRATION ET DU RUISSELLEMENT D'EAU SUR UNE SURFACE DE SOL.

E. Perrier ⁽¹⁾, C.Cambier ⁽²⁾.

INTRODUCTION

La restitution des débits d'eau ruissellée à l'exutoire d'une parcelle, d'un versant, ou d'un bassin versant, en fonction d'une chronique de pluies simulées ou naturelles, peut être obtenue grâce à des modèles hydrologiques globaux ou distribués spatialement [1]. Il peut s'agir simplement d'obtenir par calage un nombre minimum de paramètres conceptuels et intégrateurs dont la signification physique et la détermination expérimentale restent difficiles. Mais il apparaît de plus en plus nécessaire de prendre en compte le rôle spécifique de différents agents naturels intervenant de façon déterministe dans le cycle de l'eau (types divers d'organisations du sol en profondeur ou en surface, zones variées de végétation, réseaux d'écoulement privilégiés, aménagements anthropiques...etc), et plus encore, leur structuration dans l'espace, afin d'aboutir un jour à des modèles explicatifs et transposables. Les structures naturelles sont généralement assez bien décrites et cartographiées [2][3], leur fonctionnement hydrique local décrit par différents spécialistes, mais l'intégration de ces connaissances multidisciplinaires se heurte à beaucoup de difficultés techniques liées à la diversité des échelles d'étude, à la complexité des organisations géométriques rencontrées, et à l'hétérogénéité des différents fonctionnements coexistants.

Dans cet exposé, nous reconsidérons d'abord un travail que nous avons effectué de façon classique sur la simulation des écoulements d'eau sur une surface topographique, à l'échelle spatiale d'une parcelle, et à l'échelle temporelle d'une pluie; puis nous en discutons les limites (§I). Une voie de modélisation semble s'ouvrir, autour de nouvelles méthodes informatiques, basées sur la création d'univers peuplés d'entités individuelles hétérogènes schématisant les objets du monde réel [4][5], univers dont le fonctionnement global résulte de la représentation des interactions entre ses différentes composantes (§II). C'est cette voie dont nous voulons explorer les potentialités en testant quelques idées originales de simulation (§III).

I. UNE PREMIÈRE APPROCHE: SIM-SURF, UN MODÈLE GLOBAL DISTRIBUÉ SPATIALEMENT

Modélisation du ruissellement sur une parcelle

Le développement du programme de simulation SIM-SURF[6] a été effectué par rapport à un protocole expérimental bien précis, visant à déterminer l'aptitude au ruissellement d'une parcelle suivant ses états de surface (végétation, type d'organisations superficielles du sol), définis par une typologie appropriée: une parcelle de 10mx10m est subdivisée en 100 zones carrées; sur chaque carré élémentaire, on mesure le micro-relief, le type de sol en surface, les caractéristiques de la végétation; à la suite d'une pluie artificielle contrôlée, on mesure le ruissellement à l'exutoire de la parcelle. Ces expériences ont permis de relier le coefficient de ruissellement (eau ruisselée / eau apportée) aux pourcentages de la surface totale occupée par les différents types d'états de surface rencontrés. Des corrélations statistiques ayant été trouvées, nous avons ensuite, par simulation, recherché des processus déterministes explicatifs et aussi testé l'influence de la répartition spatiale des différentes zones contributives les unes par rapport aux autres.

(1) Laboratoire d'Informatique Appliquée - ORSTOM - 32, avenue Henri Varagnat -F 93143 Bondy Cedex.

Tel: (16 1) 48 03 56 89 Fax: (16 1) 48 47 30 88- Email: perrier@modele.bondy.orstom.fr

(2) Laboratoire d'Informatique du littoral, Université du Littoral, BP 1022, 59375 Dunkerque.



Simulations

Le simulateur représente un maillage carré calqué sur l'expérience. Les attributs de chaque zone sont une altitude, un type de sol, la nature du couvert. A chaque pas de temps, et pour chaque zone, on considère la quantité apportée par la pluie; une certaine proportion est interceptée par la végétation si la zone est recouverte, le reste s'infiltré ou ruisselle. Pour calculer la quantité d'eau infiltrée, on résout en chaque point une équation différentielle (équation de Darcy généralisée) tenant compte des caractéristiques hydriques du sol en ce point, suivant une condition limite en surface donnée soit par l'intensité de la pluie soit par la hauteur de la lame d'eau recouvrant une zone saturée lorsque de l'eau ruisselée s'y accumule. L'eau ruisselée sur une zone est redirigée vers les zones voisines dans la direction de la zone la plus basse. Les chemins de l'eau sont calculés et visualisés (Fig.1).

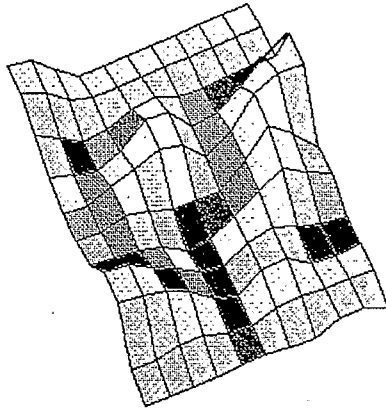


Figure 1: Visualisation des chemins d'eau ruisselée et des points d'accumulation d'eau sur une parcelle soumise à une simulation de pluie.

Le coefficient de ruissellement est calculé en fonction de la quantité d'eau arrivant à l'exutoire et tend à se stabiliser au bout d'un temps suffisamment long. Il dépend des états de surface régissant en particulier les capacités d'infiltration du sol, il peut varier suivant la configuration spatiale de la parcelle. Par exemple, lorsque des zones très imperméables alternent avec des zones très perméables, le ruissellement local généré sur les premières peut disparaître par infiltration dans les deuxièmes, et le ruissellement global s'écarte plus ou moins de la somme des ruissellement élémentaires.

Limitations du modèle

Ce modèle, quoique très simple car négligeant plusieurs processus (évaporation, érosion, transferts latéraux en profondeur, échanges avec la nappe...), est néanmoins coûteux en temps de calcul. Ceci est dû à la résolution de l'équation de Darcy en tout point, et donc à une représentation très fine du processus d'infiltration comparée au traitement du ruissellement proprement dit. En effet, la vitesse des écoulements d'eau est négligée. Elle est souvent prise en compte dans d'autres modèles en calculant un temps de parcours sur un chemin d'eau identifié une fois pour toutes en fonction du relief, et en sommant les ruissellements locaux suivant des zones isochrones supposées contribuer au ruissellement global au même instant. Nous avons choisi une modélisation différente; chaque quantité d'eau ruisselée est reportée à chaque pas de temps sur une zone voisine et non pas ajoutée directement au ruissellement global, ce qui permet de rendre compte d'une autre composante de la dynamique réelle, que nous jugeons essentielle.

Mais le routage de l'eau ruisselée en fonction de la topographie locale s'est avéré plus complexe que prévu. Par exemple, des minimums locaux du relief peuvent rendre tout déplacement momentanément impossible, générer une "mare" ou zone d'accumulation d'eau, cette mare peut s'étendre puis déborder, certains chemins d'eau étant alors modifiés: une zone x dont le ruissellement était dirigé dans la mare de la zone voisine y ($x \rightarrow y$) peut soudain être inondée à son tour et l'eau stagne ($x \rightarrow x$), ou bien la mare peut déborder ($y \rightarrow x$). Lorsque plusieurs zones contiguës sont inondées par une mare, la mise à niveau des hauteurs d'eau discrètes réparties sur chaque zone pose des problèmes algorithmiques, résolus tant bien que mal pour l'instant de façon à respecter le bilan de masse d'eau global.

Par ailleurs, le simulateur suppose connaître la valeur de chaque variable en chaque zone. Un extension de l'échelle d'étude poserait le problème de compatibilité entre la densité des mesures expérimentales possibles et la taille de la maille du modèle, car il est à prévoir que la réalité et le modèle ne partagent plus comme ici une échelle commune a priori.

II. UNE RECHERCHE MÉTHODOLOGIQUE: INTERACTION ENTRE DES AGENTS HYDROLOGIQUES HÉTÉROGÈNES DÉFINIS LOCALEMENT AU SEIN DE DIFFÉRENTS NIVEAUX DE SPATIALISATION

Objets spatiaux hétérogènes individualisés sur plusieurs niveaux d'étude

De façon générale, dans une étude de terrain, les différents acteurs du cycle hydrologique sont étudiés par des chercheurs de diverses disciplines: les différents types de végétation naturelles ou cultivées, les propriétés du sol en surface ou en profondeur, la pluie ou le relief, les réseaux hydrographiques...etc., sont identifiés à différentes échelles, et décrits le plus souvent par des objets naturels ou conceptuels dont les limites ne se superposent pas. Les résultats de ces études multi-disciplinaires sont souvent enregistrées dans des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) sous forme de documents cartographiques de nature, format et échelle variées. Le besoin, de plus en plus affirmé [7], de prendre en compte de telles données dans ce que nous appellerons un modèle hydrologique déterministe distribué (nous venons, §I, d'en décrire un exemple simplifié), pose un problème minimal de cohabitation entre différents niveaux d'analyse spatialisée.

Il est communément de règle de discrétiser le continuum spatial modélisé en un maillage de zones homogènes, après avoir superposé différentes partitions de l'espace (ex: cartes des sols, cartes des états de surface et de végétation) et différentes informations géoréférencées linéaires ou ponctuelles (cartes des réseaux d'écoulement, modèles numériques de terrain ou courbes de niveau topographique). Le choix du pas de discrétisation spatiale du modèle impose alors d'estimer bon nombre de données manquantes à partir des données disponibles, utilisant des procédures diverses d'agrégation ou au contraire d'interpolation. Cette étape préalable à la mise en route d'une simulation est source de nombreuses approximations nécessaires. Il est possible d'utiliser des maillages irréguliers basés sur un découpage privilégié de l'espace (ex: versants dans un modèle à l'échelle d'un bassin versant). Il est aussi possible d'intensifier le maillage localement pour tenir compte à moindres frais numériques de différenciations locales marquées. Cependant dans tous les cas, il s'agit de définir un jeu de variables exhaustives sur chaque maille du modèle. En termes informatiques, il s'agit de définir sur chaque maille un attribut pour chaque type de données considérées. Dans notre cas, lorsqu'une parcelle d'étude était plantée d'un seul arbre au feuillage plus ou moins abondant, nous avons affecté à chaque zone un attribut "recouvert par feuillage ou non" et un attribut "tronc ou non" (le feuillage interceptant la pluie, et une partie de cette pluie s'écoulant le long du tronc jusqu'en sous-sol, ceci quasiment indépendamment des caractéristiques hydriques du sol en place)

Notre projet est de représenter les objets spatiaux tels qu'ils ont pu être observés ou définis par les naturalistes, et de faire communiquer les différentes données sans en altérer la nature. Par exemple, l'arbre précédent pourrait rester défini comme un seul objet; il est par compte nécessaire de connaître les zones du sol qu'il abrite et pour lesquelles l'apport d'eau de pluie sera modifié, ainsi que, si les circulations d'eau en sous-sol nous intéressent, les zones profondes qu'il peut alimenter en eau interceptée, ou dans lesquelles il peut puiser de l'eau grâce à ses racines. Autrement dit il est nécessaire de définir des liens de voisinage et de communications entre les niveaux. De la même façon, si des objets "sol" sont définis par des zones géométriques quelconques, et le ruissellement local calculé sur chaque zone supposée homogène, le routage du ruissellement vers les zones voisines suppose de définir les liens de voisinages caractérisant l'environnement local de chaque objet. Une programmation "orientée-objet" [8]devrait faciliter une telle approche.

Notre recherche consistera donc d'abord à définir des objets informatiques représentant les objets réels à partir de données de type SIG, et à représenter les liens de voisinage ou d'interaction dans l'ensemble des objets représentés. Ces liens agiront verticalement et/ou horizontalement, c'est-à-dire entre plusieurs niveaux d'information, et/ou au sein d'un même niveau. Nous commencerons par un seul niveau de spatialisation, par exemple le niveau topographique intervenant dans le report des quantités d'eau ruissellées localement, puis par adjonction successive de nouveaux objets selon les phénomènes étudiés,

introduisant des objets sols pour modéliser l'infiltration, des objets végétation si l'interception de pluie ou l'évaporation est prise en compte...etc., en cherchant à régler à chaque ajout un problème d'interaction sans modifier la nature des objets préexistants.

Une approche multi-agents pour représenter les interactions entre des objets autonomes

A chaque objet spatial correspond un fonctionnement hydrique particulier. La partition du sol en entités différenciées doit pouvoir se traduire par différents types de comportement hydrique. Le cycle de l'eau par rapport à la végétation obéit à des lois différentes suivant les unités de végétation identifiées à une échelle donnée. D'autres processus régissent les circulations d'eau sur une surface ou dans des rivières... Chaque objet peut être modélisé comme une entité autonome, aux règles de fonctionnement plus ou moins finement modélisés, suivant des processus plus ou moins bien identifiés physiquement. Des règles ou méthodes décrivant le comportement hydrique de chaque classe objet devraient pouvoir être testées sans modifier le fonctionnement propre des autres objets du milieu.

Le fonctionnement de l'espace ainsi réifié devient un ensemble variable et souvent évolutif d'objets en interaction. Les interactions sont des entrées et sorties d'eau, en provenance de ou en partance vers d'autres objets du système, qui peuvent être des voisins fixes comme dans un réseau d'automates ou des "accointances" multiples et évolutives. Il ne s'agit plus de construire un modèle global prenant en compte tous les paramètres intervenant dans le phénomène étudié, après les avoir distribués spatialement, mais de gérer des communications et interactions entre objets spatiaux individualisés. Cette conception est directement héritée des Systèmes Multi-Agents [9], où des agents perçoivent et agissent de façon autonome dans leur environnement local.

La théorie est séduisante, la mise en oeuvre plus complexe. Nous nous proposons de développer un simulateur prototype, Notre objectif est de tester la faisabilité informatique et la validité d'une telle approche sur des cas extrêmement simplifiés et sans entrer dans le détail des processus physiques mis en jeu.

III. UN SIMULATEUR PROTOTYPE

Nous nous plaçons dans le cas d'un domaine géographique d'étendue quelconque, incluant comme cas d'école la présence à l'état initial d'une mare et d'une portion de fleuve (cf.[4]). Nous simulons l'infiltration et le ruissellement au cours d'une pluie donnée. La pluie tombée se partage en une quantité infiltrée que l'on suppose calculable à partir d'une carte des sols et une quantité d'eau ruissellante. Nous nous intéressons ici seulement à la modélisation des écoulements d'eau en surface et considérons à ce niveau l'eau infiltrée dans le sous-sol comme "perdue". Nous souhaitons être à même de suivre les chemins d'eau, de calculer l'eau ruisselée à l'exutoire du domaine, les modifications de débit du fleuve, les variations de niveau et d'extension spatiale de la mare et du fleuve.

Principes de base

L'idée de modélisation que nous voulons expérimenter se base, non pas sur une discrétisation de l'espace en zones homogènes par rapport à chaque paramètre du modèle, et par rapport aux quantités et flux d'eau qu'elles recèlent, mais sur plusieurs discrétisations "parallèles" et communicantes. L'eau elle-même est discrétisée en une population d'entités élémentaires se mouvant en fonction des informations qui lui sont fournies par son environnement local. Nous représentons la pluie comme la production d'un ensemble d'entités "eau", des agents hydrologiques élémentaires dont nous allons "tracer" le chemin depuis leur création, jusqu'à leur fusion avec d'autres, ou leur disparition dans le sous-sol, dans la mare ou dans le fleuve.

Pluie simulée et éventuelle carte des pluies. Les entités d'eau naissent avec la pluie. En fonction de l'intensité de la pluie (supposée ici constante) et de sa distribution spatiale (supposée ici uniforme), il est possible de générer des entités d'eau définies par une extension spatiale (correspondant à la discrétisation spatiale choisie pour la simulation) et par un volume d'eau (correspondant à la discrétisation temporelle choisie). Ces entités eau tombent sur le sol selon la loi de distribution spatiale choisie, en l'occurrence "au hasard", selon une réalisation aléatoire quelconque d'une distribution uniforme (poissonienne).

Infiltration et carte des sols. Les entités d'eau tombent sur le sol en un point. En adressant une requête à la carte des sols, il est possible de déterminer univoquement la zone touchée, que l'entité eau ait atteint le centre d'une zone ou sa bordure, le tirage au sort du point d'impact devant rétablir à la longue des proportions réalistes d'eau affectée à chaque zone de sol. Les caractéristiques hydriques simplifiées que nous avons affectée à la zone concernée permette de calculer les proportions d'eau s'infiltrant et ruisselant. Ces proportions sont transformées en probabilités: certaines entités d'eau s'infiltrent et donc disparaissent dans ce modèle, d'autres ruissellent.

Ruissellement et carte topographique. Le routage du ruissellement consiste à gérer un ensemble de déplacements élémentaires. Chaque entité eau non infiltrée se déplace à partir du point d'impact de la pluie suivant les informations locales fournies par la carte du relief. Elle se voit affecter une direction (dans le sens du point le plus bas, vers la zone ou encore la ligne de niveau la plus basse, suivant la nature des informations) et une vitesse de déplacement (dépendant en particulier de la pente dans la direction du déplacement). La position prévue au pas de temps suivant est alors calculée. Notons que les approximations grossières que sont la nature ponctuelle du point d'impact et la nature linéaire des déplacements devrait pouvoir constituer des approximations tout à fait acceptables; prenons l'exemple d'une entité eau caractérisant la pluie tombée au voisinage d'une ligne de crête: elle peut être affectée arbitrairement à un des versants, mais, en termes probabilistes, une entité équivalente sera affectée à l'autre versant à un pas de temps suivant.

Evolution ou apparition d'une carte des objets hydrologiques. Au cours de son déplacement sur la surface topographique,

- une entité eau pourra rencontrer un minimum local. Ceci donnera lieu à la naissance d'une mare. Une mare est un agent hydrologique doté d'un point d'ancrage géographique, et d'un volume d'eau variable. En fonction des informations locales données par la carte du relief, elle peut calculer son extension spatiale.
- une entité eau pourra rencontrer la mare prédéfinie ou une mare nouvellement créée. Dans ce cas elle disparaît, et la mare augmente son volume et son extension.
- une entité eau pourra rencontrer le fleuve, disparaître, et augmenter soit le débit, soit l'extension spatiale du fleuve en fonction du comportement hydrologique propre du fleuve.

Ceci signifie qu'une carte des objets hydrologiques est définie. Cette carte est consultée à chaque déplacement, et mise à jour à la fin de chaque pas de temps. En fait cette carte est aussi consultée au premier déplacement d'une entité eau, i.e. lorsque celle-ci tombe sur le sol, et l'entité peut alors disparaître dès sa création dans la mare ou dans le fleuve. Avant qu'une entité eau en déplacement n'augmente le volume d'une mare, cette dernière interroge son environnement local, et si elle est prête à déborder, l'entité eau est redirigée vers le point de débordement.

Discussion

Il serait théoriquement possible de suivre ainsi le parcours de chaque entité eau de façon "parallèle". Néanmoins, pour des problèmes évidents de possibilités matérielles informatiques, il est prévu de faire fusionner deux entités en mouvement dont les chemins se rencontrent ou se croisent, de les faire disparaître en donnant naissance à une entité de volume plus important.

La simulation consiste à interroger sans cesse un certain nombre de cartes a priori indépendantes. Diverses techniques d'optimisation peuvent être employées. La première consiste à définir les liens de voisinage inter et intra cartes. En effet lorsqu'une entité est momentanément localisée sur une zone topographique, il suffit que cette zone connaisse ses zones voisines pour déterminer la direction du déplacement, il suffit aussi que cette zone soit associée aux objets voisins dans la carte hydrologique pour savoir si une mare où un fleuve risque d'être atteint. De même, si l'on prévoit qu'une entité d'eau ruisselée peut s'infiltrer au cours de son déplacement, il sera nécessaire de connaître les propriétés des zones voisines dans la carte des sols.

Le type de simulation qui vient d'être décrit devrait pouvoir permettre à terme d'incorporer de nouveaux agents hydrologiques pouvant faire obstacle aux déplacements (barrage à l'échelle d'un bassin versant ou murets anti-érosion à l'échelle d'un versant, ...) ou au

contraire le favoriser (fossé, route, ...). Il devrait pouvoir permettre d'introduire plus aisément des agents locaux dont la contribution au fonctionnement global est supposée significative.

La simulation sur des milieux virtuels d'étendue variable devrait permettre de discuter la faisabilité et la validité de l'approche suivant l'échelle ainsi que les niveaux critiques où les objets à prendre en compte changent de nature (Ex: passage de l'arbre à la forêt, etc). Elle devrait aussi permettre de conduire des analyses de sensibilité sur les choix d'échelles spatio-temporelles associées une carte particulière ou à un des processus physiques considérés relativement aux choix adoptés pour d'autres composantes du modèle.

Notre réflexion méthodologique prétend dans un premier temps s'appliquer à une échelle quelconque. Chaque application précise posera le problème de la définition des objets identifiés à l'échelle d'étude, et celle des modèles de fonctionnement hydrologique local. La première application concernera des cas d'étude expérimentaux réalisés sous simulation de pluie artificielle, à l'échelle temporelle de l'averse et à l'échelle spatiale d'un versant d'environ 500 m² [10].

CONCLUSION

Nous avons présenté un premier type de modélisation des phénomènes d'infiltration et de ruissellement sur une surface de sol, permettant de calculer le coefficient de ruissellement d'une parcelle en fonction des différents états de surface la recouvrant. On se base sur un maillage de l'espace et la définition en chaque point de tous les paramètres considérés par un modèle global de fonctionnement. Les problèmes algorithmiques rencontrés ainsi que ceux que poserait l'extension à d'autres échelles d'étude ont été le point de départ d'une recherche méthodologique basée sur une modélisation originale. Dans cette deuxième approche, les écoulements d'eau résultent de la dynamique d'un ensemble fini d'entités eau individualisées et autonomes; chaque entité se déplace en fonction des informations qui lui sont fournies par son environnement local et qui sont enregistrées dans des documents de nature et d'échelle variée. Ces concepts "multi-agents" sous-tendent la programmation d'un simulateur prototype dont les principaux aspects ont été exposés en dernière partie. Notre projet démarre actuellement. Notre communication vise à ouvrir la discussion autour de problèmes d'ordre technique et conceptuels, et à l'illustrer par les premières simulations réalisées sur des milieux virtuels .

RÉFÉRENCES

- [1] Abbott M.B., J.C.Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell et J. Rasmussen. An introduction to the european hydrological system- Système Hydrologique Européen, "SHE", 2: structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87, 61-77, 1086.
- [2] Casenave A. et C.Valentin. Les états de surface de la zone sahéenne. Influence sur l'infiltration. Ed. Orstom, coll. Didactiques, 1989.
- [3] Gascuel-Oudoux C., Hubert-Moy L., Robin P. et C. Walter. Quelle échelle est pertinente pour définir les paramètres de fonctionnement d'un modèle hydrologique en milieu agricole intensif? Rapport programme environnement, MMT, 1994.
- [4] Cambier C. SIMDELTA. Un système multi-agents pour simuler la pêche sur le Delta Central du Niger. Thèse Université Paris VI. Informatique. 1994.
- [5] Perrier E., Structure géométrique et fonctionnement hydrique des sols. Simulations exploratoires. Thèse Université Paris VI. Hydrologie, Sciences de la terre. 1994.
- [6] Perrier E., SIMSURF. Simulation numérique et graphique de l'infiltration et du ruissellement sur une surface de sol. Influence du relief et des états de surface. Document Orstom, 1992.
- [7] Zollweg J.A., 1994. Effective use of Geographic Information Systems for rainfall-runoff modeling. PHD dissertation, Cornell University, USA.
- [8] Ferber J., 1990. Conception et programmation par objets. Ed. Hermès, Paris.
- [9] Ferber, J. , 1992. Using reactive Multi-Agent Systems in simulation and problem solving in Distributed Artificial Intelligence. Theory and practice. Ed. Kluwer Acad.
- [10] Planchon O. et M. Estèves. EMIRE: Expérimentation et Modélisation physique de l'Infiltration, du Ruissellement et de l'érosion, Programme Orstom, 1995.

Tendances nouvelles

**EN MODÉLISATION
POUR L'ENVIRONNEMENT**

cité des Sciences et de l'Industrie, Paris
les 15, 16 et 17 janvier 1996

**ACTES DES JOURNÉES DU PROGRAMME
ENVIRONNEMENT, VIE ET SOCIÉTÉS**

COMMUNICATIONS ORALES

**SESSION B : Modélisation des systèmes
complexes, nouveaux modèles, validation
de modèles.**



CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE