

R
Z

Rp-50353

DOCUMENT PUBLIC

***Systèmes d'aide à la décision pour la gestion
des hydrosystèmes***

Analyse bibliographique de l'état de l'art

Février 2000
BRGM/RP 50353-FR



DOCUMENT PUBLIC

*Systemes d'aide à la décision pour la gestion
des hydrosystèmes*

Analyse bibliographique de l'état de l'art

M-L. Noyer

Février 2000
BRGM/R 50353-FR



Mots clés : Systèmes d'Aide à la Décision, Hydrosystèmes, Gestion intégrée des Ressources en eau, Internet, Etude bibliographique

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Noyer M-L. (2000) - Systèmes d'aide à la décision pour la gestion des hydrosystèmes – Analyse bibliographique de l'état de l'art. Rap. BRGM/RP 50353-FR, 61 p.

© BRGM, 2000, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce travail a été réalisé sur crédits 1999 de la Direction de la Recherche du BRGM, dans le cadre du projet PRR 301 intitulé « Fonctionnement et Gestion des Hydrosystèmes ».

Il s'agissait de clarifier la position actuelle du BRGM dans le domaine des Systèmes d'Aide à la Décision appliqués à la gestion des ressources en eau (souterraines et superficielles) par rapport à l'état de l'art dans le monde et de tenter de cerner des pistes d'orientation pour nos équipes de recherche, sur cette thématique qui intéresse de plus en plus les « décideurs » tels que les collectivités et les élus locaux.

Dans ce but, on a effectué des recherches sur le web (internet) qui ont montré que le thème de l'Aide à la Décision est en expansion depuis 4 ans. Pour autant, une analyse détaillée du résultat de ces recherches montre que :

- peu de références correspondent à nos domaines d'intérêt, même en incluant les eaux de surface en plus des eaux souterraines,
- le terme DSS recouvre des concepts et des réalités extrêmement variables et de complexité croissante : simple modèle numérique des écoulements, SIG associé à un logiciel d'analyses multicritères et/ou à une base de données relationnelles, modèle de simulation associé à un modèle d'optimisation, système avancé faisant appel à des techniques d'intelligence artificielle (algorithmes génétiques, réseaux de neurones, automates cellulaires...),
- même quand on pointe sur un DSS correspondant à notre champ de préoccupations : *outil de gestion intégrée des ressources en eau prenant en compte la dimension socio-économique*, l'information disponible n'est pas nécessairement complète et satisfaisante.

Le chapitre 2 du rapport comporte donc la description de différents DSS à des niveaux de détails variables, en fonction des informations recueillies, par exemple, l'architecture du système, les algorithmes utilisés, les codes numériques utilisés, des exemples d'application, rarement la façon de coupler les outils numériques aux autres...

Il est parfois possible de télécharger des DSS ou des applications, dans ce cas, on l'a signalé au fur et à mesure du rapport. Certains sites sont « actifs » c'est-à-dire mis à jour régulièrement ; d'autres ont été créés à une date donnée avec parfois un programme ambitieux affiché et ne sont plus mis à jour.

Un chapitre (le 4^{ème}) est consacré à un historique détaillé des recherches qui ont été menées au BRGM depuis le début des années 70 dans le domaine de l'aménagement des ressources en eau ; on rappelle quels sont les outils qui ont été développés, les partenariats qui ont été noués et les compétences disponibles.

Le rapport détaille par ailleurs (chap. 3 et 4.2) les méthodes numériques évoquées dans les références internet ainsi que celles qui sont (ou ont été) utilisées dans le groupe BRGM. Il nous paraît clair que si les techniques d'optimisation monocritère ou multicritère sont à notre portée et ont d'ailleurs été pratiquées, à des degrés divers, les techniques avancées faisant appel à l'intelligence artificielle relèvent de compétences qui, à notre connaissance, ne sont pas disponibles dans le groupe (et n'ont sans doute pas à y être).

Nous tenons à remercier J.D. RINAUDO (EAU/RMD) et J.J. SEGUIN (EAU/M2H) pour leur lecture active (et réactive) de ce rapport, accompagnée de commentaires pertinents ainsi que de compléments d'information que nous avons tenté d'intégrer au mieux dans cette version finale.

Sommaire

Introduction	7
1. Définitions	9
2. DSS appliqués aux ressources en eau rencontrés sur le Web	17
2.1. Adresse web – http://www.ise.ufl.edu/cao/water/ <i>dernière mise à jour à date inconnue</i>	17
2.2. Adresse web – http://www.ncl.ac.uk/wrgi/wrsrl <i>dernière mise à jour</i> <i>à date inconnue</i>	19
2.3. Adresse web - http://cci.ct.tudelft.nl/DSS/ <i>dernière mise à jour</i> <i>le 11/09/1995</i>	21
2.4. Adresse web – http://sunburn.uwaterloo.ca/~lfleonvi/artics/art25.html <i>dernière mise à jour en 1995 ou 1996</i>	22
2.5. Adresse web RAISON http://charon.cciw.ca/rmwin/Page2.html <i>dernière</i> <i>mise à jour en 1997</i>	24
2.6. Adresse web – http://h2osparc.wq.ncsu.edu/ <i>dernière mise à jour en</i> <i>novembre 1998</i>	25
2.7. Adresse web - http://www.ids.colostate.edu/ <i>dernière mise à jour</i> <i>à date inconnue</i>	27
2.8. Adresse web - http://es.epa.gov/ncercqa/progress/brillpr.html <i>dernière</i> <i>mise à jour en Juillet 1999</i>	29
2.9. Adresse web - http://www.riverside.com/dss/dssintro.html <i>dernière mise</i> <i>à jour après 1997</i>	30
2.10. Adresse web http://gwrp.cciw.ca/ <i>dernière mise à jour à date inconnue</i>	31
2.11. Adresse web http://publish.uwo.ca/~jmalczew/gida.htm <i>dernière mise à</i> <i>jour à date inconnue</i>	32

2.12. Adresse web : http://dss.cba.uni.edu/tour/dsstour.html dernière mise à jour en avril 99.....	35
3. Techniques numériques évoquées	37
3.1. Optimisation globale	37
3.2. Techniques faisant appel à l'Intelligence Artificielle	39
3.3. Divers	41
4. Etat de l'art dans le groupe BRGM.....	43
4.1. Historique.....	43
4.2. Description des techniques utilisées et hyperliens en rapport.....	46
4.3. Conclusion	50
Conclusion générale.....	51
Annexes.....	53

Introduction

Les recherches sur les systèmes d'aide à la décision (SAD) ou decision support systems (DSS) en anglais, ont d'abord été menées dans la littérature écrite publiée facilement accessible au BRGM. Elles ont fait apparaître peu de références intéressantes dans le domaine des ressources en eau, à l'exception d'un numéro spécial de *Journal of Hydrology (special issue about DSS - vol 177, no 3-4, avril 1996)* qui détaille en particulier le système WATERWARE et le Colorado DSS par ailleurs présentés sur le World Wide Web (cf § 2.2. et 2.9.).

La bibliographie a donc été réalisée essentiellement grâce à l'Internet, ce qui présente le double avantage de disposer des résultats les plus récents et de tester le « dynamisme » des sites visités, en suivant leurs mises à jour successives ou en constatant que certains d'entre eux sont plus ou moins « en sommeil » et n'ont pas été mis à jour depuis des années...

Une recherche systématique sur le Web avec Alta Vista et à l'aide des mots-clés « decision support system » et « water » ne ramène que 160 pages web entre 1990 et 1996 mais plus de 3000 entre 1996 et 1999. Il est donc clair que le sujet est en expansion depuis 4 ans ; pour autant, et bien qu'il soit impossible de regarder en détail 3000 pages web et qu'il ait été nécessaire de mieux cerner la recherche, il s'avère finalement que :

- peu de références correspondent à nos domaines d'intérêt, même en incluant les eaux de surface en plus des eaux souterraines,
- le terme DSS recouvre des concepts et des réalités extrêmement variables et de complexité croissante : simple modèle numérique des écoulements, SIG associé à un logiciel d'analyses multicritères et/ou à une base de données relationnelles, modèle de simulation associé à un modèle d'optimisation, système avancé faisant appel à des techniques d'intelligence artificielle (algorithmes génétiques, réseaux de neurones...),
- même quand on pointe sur un DSS correspondant à notre champ de préoccupations : outil de gestion intégrée des ressources en eau prenant en compte la dimension socio-économique, l'information disponible n'est pas nécessairement satisfaisante et ne correspond pas toujours à ce qu'on cherche.

Ceci dit, le rapport analyse en détail les sites repérés sur le web et présentant a priori un intérêt pour les travaux menés au BRGM dans le domaine de la gestion des hydrosystèmes,

On trouvera donc dans ce rapport :

- au chapitre 1, une description des différentes réalités que recouvre le concept « d'aide à la décision »,
- au chapitre 2, une analyse détaillée, mais bien entendu non exhaustive, des sites repérés sur le web,
- au chapitre 3, une description des techniques numériques évoquées au chapitre 2,
- au chapitre 4, un historique des recherches menées dans le groupe BRGM sur cette thématique et un résumé de la situation actuelle en termes de méthodes, logiciels, applications pratiques, compétences et partenariats.

Les adresses web sont systématiquement indiquées dans le texte afin que le lecteur qui souhaite approfondir le sujet puisse visiter les sites correspondants au fur et à mesure de sa lecture.

1. Définitions

Il est nécessaire de définir ce qu'on entend par Système d'Aide à la Décision (SAD) ou Decision Support System (DSS) en anglais ; en effet, cette appellation recouvre des réalités très différentes selon les auteurs et/ou les disciplines ; actuellement, on peut même parler d'un effet de « mode » qui entraîne l'utilisation du terme SAD ou DSS pour tout et n'importe quoi.

Ainsi, dans le domaine des hydrosystèmes, ce terme peut être utilisé pour désigner un modèle numérique des écoulements, un Système d'Information Géographique (SIG) associé à un logiciel d'analyses multicritères et/ou à une base de données relationnelles, un SIG associé à un modèle numérique (par ex. le système SeaUS à ANTEA)...etc

Au chapitre suivant, on présente les résultats des recherches effectuées sur le web entre juillet et octobre 1999 : on constatera que tous ces types de « DSS » sont représentés.

On trouvera ci-après quelques définitions :

- A l'adresse web <http://www.dssresources.com/papers/whatisadss> D.J. Power, auteur du « DSS Tour » (cf § 2.12) rappelle que le terme DSS couvre une grande variété de systèmes, d'outils et de technologies et écrit : *certaines personnes pensent que le terme DSS est daté et qu'il a été remplacé par un nouveau type de système appelé processus analytique en réseau (On Line Analytical Processing = OLAP, cf glossaire en annexe, extrait de celui qu'on trouve à l'adresse <http://DSSResources.COM/glossary>) ; pour d'autres l'état de l'art en matière de DSS est représenté par les systèmes basés sur l'acquisition de connaissances (creating knowledge) ; les spécialistes de recherche opérationnelle considèrent que les « vrais » DSS sont associés à des modèles de simulation et d'optimisation.*

De son point de vue, l'auteur estime que le terme de DSS est adapté à beaucoup de types de systèmes d'information qui aident à la prise de décision : *dès qu'un logiciel sur PC peut aider un manager à prendre une décision, ce programme sera certainement appelé DSS ; les systèmes d'information pour exécutifs (Executive Information Systems = EIS), les systèmes d'aide aux exécutifs (Executive Support Systems = ESS), les systèmes d'information géographique (GIS), les processus analytiques en réseau (OLAP), les systèmes d'accès à la connaissance (knowledge discovery systems) et les groupes de DSS peuvent tous être regroupés dans la catégorie des DSS (cf glossaire en annexe).*

Dans sa « brève histoire des DSS » (<http://dssresources.com/history/dsshistory.html>), D.J. Power rappelle que le concept de DSS est apparu à partir de deux principaux domaines de recherche : les études théoriques sur la prise de décision organisationnelle menées au Carnegie Institute of Technology au début des années 1960 et les travaux techniques sur les systèmes de calculateurs interactifs menées au Massachusetts Institute of Technology à la même époque.

Les concepts de DSS (SIAD = Système Interactif d'Aide à la Décision) ont été développés indépendamment en France par une équipe de HEC travaillant sur le projet SCARABEE (commencé en 1969 et achevé en 1974).

Au début des années 1990, l'utilisation des banques de données (data warehousing) et des processus analytiques en réseau (OLAP) a élargi le domaine des DSS à l'ensemble d'une entreprise.

De nos jours, les sciences cognitives, en particulier les recherches en *Behavioral Decision Making* ont procuré de l'information descriptive utilisée dans la conception de DSS ; les autres disciplines qui interviennent sont les techniques d'intelligence artificielle, les interactions homme-machine, les méthodes de simulation, l'ingénierie des logiciels, les télécommunications et les réseaux, les sciences de l'information en général.

• A l'adresse <http://www.ihe.nl/hi/iresear.htm>, (dernière mise à jour en août 1997) on trouve le site web du programme de recherche « Hydroinformatics », de l'IHE de Delft (International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering). Ce programme est axé sur le développement de modèles mathématiques et de technologies de l'information avancées et sur leur application à des problèmes d'hydrologie, d'hydraulique et d'environnement, avec intégration des aspects sociologiques, économiques et politiques.

Il est donc destiné à fournir des DSS (au sens complet du terme) à des ingénieurs, des gestionnaires de l'eau et des agences gouvernementales. Il propose une revue de ses axes de recherche :

1. L'« hydroinformatique » est basée sur la reconnaissance de la nature post-symbolique de la pensée et de l'expérience dans notre société post-moderne (prééminence de l'utilisation de signes plutôt que de symboles). La ligne de recherche est axée d'une part sur l'utilisation des réseaux en vue de promouvoir la prise de décisions en collaboration, d'autre part sur l'évolution des équations à partir des données hydrauliques par utilisation d'algorithmes évolutifs (génétiques cf § 3.2.) ; difficultés mathématiques rencontrées ; discipline en cours d'évolution.
 - Existence de références papier à consulter éventuellement.
2. Dans de nombreuses sciences (de l'analyse financière à la physique nucléaire) on est passé peu à peu à l'idée d'utiliser une logique tolérant les contradictions (inconsistency-tolerant). Tout système d'information avec plus d'une source d'information doit permettre les conflits entre ses sources ; les logiques que les mathématiques modernes procurent et qui permettent de tolérer les contradictions, doivent être incorporées dans les systèmes experts de la prochaine génération.
 - Destiné à mettre au point des outils aptes à traiter des processus socio-techniques dans un environnement réel.

3. Il est nécessaire d'améliorer différents algorithmes déterministes pour la simulation des processus physiques, en particulier pour le traitement et la discrétisation spatio-temporelle des données (classique de notre point de vue...).
 - Les techniques d'optimisation sont explorées dans le cas où une représentation analytique de la fonction objectif n'est pas connue.
 - Un certain nombre de techniques de recherche d'un extremum (ou de plusieurs) ont été testées sur le calage de modèles hydrologiques (rainfall-runoff). Tous les algorithmes ont été implémentés dans un prototype sur PC appelé GLOBE.
 - Existence de références papier à consulter éventuellement.

4. Une ligne de recherche est axée sur les réseaux de neurones et les algorithmes évolutifs (génétiques) qui possèdent la capacité « d'apprendre » c'est-à-dire d'évoluer en fonction des modifications dans les données d'entrée (cf § 3.2.). Un aspect de la recherche porte sur les possibilités d'application des réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks = ANN) en hydroinformatique. Par exemple en modélisation les processus de précipitations-ruissellement ; les résultats montrent que les ANN sont capables d'identifier des relations entre hauteurs de précipitations et débits de ruissellement.
 - Les méthodes traditionnelles de traitement numérique en mécanique des fluides conduisent à des modèles qui sont des entités distinctes des données du monde réel qu'elles utilisent ; l'hydroinformatique vise de plus en plus à utiliser les données pour faire évoluer les modèles.
 - Les recherches futures (en cours ?) porteront sur les interactions avec les modèles de simulation déterministes existants.
 - Existence de références papier à consulter éventuellement.

5. On est de plus en plus conscient que de nombreux processus peuvent être approchés d'un point de vue « orienté objet ». La maintenance, la réutilisation, l'extension et l'intégration de logiciels se font plus facilement sur la base d'une conception et d'un codage orientés objet.
 - De même les processus physiques, chimiques et biologiques liés aux problèmes d'hydraulique et d'environnement peuvent être considérés comme des objets en relation.
 - Un des objectifs de l'hydroinformatique est d'appliquer les technologies orientées objet au développement de nouveaux modèles de simulation et aussi à la définition de structures de tâches en vue de fiabiliser la construction, le calage, la validation et la mise en application de modèles numériques existants.

Pas d'information sur les évolutions éventuelles depuis Août 97.

• A l'adresse <http://bamboo.mluri.sari.ac.uk/~jo/litrev/chap5.html> se trouve le site web du Macaulay Land use research institute, orienté « gestion des forêts et de l'écosystème » mais où se trouvent quelques généralités utiles sur les DSS :

La définition suivante est proposée : *le domaine de l'aide à la décision est le développement d'approches pour mettre en application la technologie des systèmes d'information afin d'accroître l'efficacité des preneurs de décision dans des situations où l'ordinateur peut soutenir et rehausser le jugement humain dans la réalisation de tâches qui comportent des éléments ne pouvant être spécifiés à l'avance.*

1. Les DSS doivent fournir *une intégration de l'information et des boucles de rétroaction pour appuyer la nature exploratoire du processus de découverte scientifique.* « L'intégration de l'information » implique la capacité de hiérarchiser l'information sans en distordre le contenu technique, de manipuler l'information temporelle et de prendre en compte l'information spatiale tout au long de l'analyse et du processus de prise de décision.
2. Importance des techniques de visualisation : les VRMS (Visual Resource Management System) doivent être capables de prédire et d'évaluer les impacts résultant d'alternatives potentielles de gestion, de façon interactive à travers un dialogue avec l'utilisateur.
3. Une autre nécessité est l'inter-opérabilité définie comme la capacité d'organiser et de transférer de l'information entre des modèles scientifiques et des composants fonctionnels du système intégré. C'est la capacité pour les modèles individuels de contribuer à la résolution d'un problème plus vaste que leur champ d'action propre.
4. L'importance de l'utilisation d'un langage orienté objet est soulignée ici aussi, en particulier des langages utilisés dans le domaine de l'Intelligence Artificielle (C++, Smalltalk et LISP).
5. Dimension temporelle : un modèle pour lequel il faut prendre en compte des pas de temps différents pour chaque processus à simuler est difficile à construire et même quand il est possible de hiérarchiser les pas de temps de la composante la plus rapide à la plus lente, il peut y avoir beaucoup de pas de temps de calcul inutiles (sans changement significatif de l'état des composantes prises en compte). Possibilité d'éviter cet inconvénient à l'aide du Discrete Event formalism (non commenté, référence donnée).
6. Dimension spatiale : la capacité de transférer des résultats de modélisation à d'autres échelles sans dégrader l'information est nécessaire.
7. Beaucoup de DSS actuels se focalisent sur la résolution d'un problème mais l'objectif principal d'un DSS devrait être de fournir aux preneurs de décisions des outils pour explorer, conceptualiser et analyser des stratégies décisionnelles et ceci de façon interactive. Un utilisateur de DSS devrait avoir la possibilité de :
 - analyser la situation en fonction de son style et de ses connaissances personnelles,
 - construire et comparer différents modèles « quantitatifs »,
 - adapter ces modèles à des conditions variables,

- évaluer les différents aspects de ses activités en utilisant une palette de moyens différents.
 - Par conséquent, un DSS réellement « intégré » ne pourrait être utilisé que par une équipe de planification disposant d'une expertise étendue à toutes les disciplines en jeu dans le problème à traiter. Il est nécessaire d'éduquer les preneurs de décisions et autres utilisateurs potentiels de DSS à comment utiliser au mieux un tel système.
8. Ensuite sont présentées les caractéristiques de quelques DSS dans le domaine de la sylviculture : FORPLAN, TERRA-Vision, RELMdss, SYLVATICA... que nous ne détaillerons pas ici.

D'après les auteurs, un DSS dans le domaine de la sylviculture doit comporter les éléments suivants :

- un SIG pour créer, manipuler et analyser les données spatiales,
- un système de gestion par base de données (Data Base Management System = DBMS) pour traiter les données numériques associées globalement aux forêts ou individuellement aux arbres,
- des modèles de simulation décrivant les schémas d'évolution des forêts sous différentes sollicitations,
- un système hypertexte (Hypertext System = HS) pour structurer l'information sur le système étudié et fournir l'accès à cette information,
- un système de gestion basé sur la connaissance (Knowledge Based Management System = KBMS) pour fournir des opinions et des conseils à l'aide de consultations d'experts dans différents domaines,
- des systèmes didacticiels pour « veiller » sur l'utilisateur et lui procurer des guides et des aides,
- un interface utilisateur graphique (Graphical User Interface = GUI) pour faire le lien entre l'utilisateur et les différents éléments du système.

Cette description est aisément transposable à tout type de DSS, en particulier ceux concernant la gestion des ressources en eau. Au chapitre suivant, on présente ceux d'entre eux que nous avons trouvés sur le web.

- A la lecture de la première version de ce rapport, J.D. Rinaudo nous a proposé un classement des DSS en fonction de leur finalité. Nous rapportons ci-après l'essentiel de ses remarques :

« Si j'essaie de classifier les quelques DSS que je connais en fonction de leur objectif, j'obtiens les quatre catégories suivantes :

1-ceux dont l'objectif est d'aider à connaître l'état du système à gérer. Ce type d'outils permet au décideur d'organiser une information complexe (en la hiérarchisant, en l'agrégeant, en la spatialisant, etc) afin de faciliter la prise de décision. Le DSS permet alors au(x) décideur(s) de mieux connaître l'état du système qu'il gère en lui fournissant un tableau de bord. Par contre, il ne fournit aucune indication sur la ou les actions à mettre en œuvre, ni ne permet de

hiérarchiser différentes actions possibles : le corps de règles d'action est exogène au DSS (les règles dépendent du décideur).

Dans le domaine de l'eau, un exemple d'un tel DSS serait les « tableaux de bord » mis en place au niveau des bassins versant en France et qui fournissent des indications en temps réel sur les débits en certains points des rivières, la qualité de l'eau, les niveaux piézométriques dans les nappes d'accompagnement, etc. Un tel tableau de bord sert aux différents acteurs impliqués dans la gestion de l'eau dans le bassin de l'Adour en France. Le même type d'outil a été mis en place dans les grands périmètres irrigués au Pakistan pour aider le gestionnaire à prendre des décisions relatives à la régulation des canaux (connaissance de niveaux d'eau dans les canaux, de débit) ;

2- ceux dont l'objectif est d'aider le décideur à choisir une action parmi un ensemble prédéterminé d'actions sur la base de la connaissance de l'état présent du système. Cela recoupe la plupart des systèmes experts qui associent (i) un système de gestion de l'information et (ii) un corps de règles d'action, qui, à la différence de la catégorie précédente, est endogène à l'outil d'aide à la décision (ce qui veut dire que les règles sont imposées à l'utilisateur). Ce corps de règle peut consister en une série de valeurs seuils avec des décisions associées (ex. règles d'ouvertures des vannes de petits barrages en fonction du débit mesuré dans les rivières qu'ils ré-alimentent), des coefficients de pondération (analyse multicritère), etc ;

3- ceux dont l'objectif est d'aider le décideur à prévoir les conséquences de plusieurs actions possibles. Il s'agit de tous les outils de simulation qui permettent de prédire l'état futur du système complexe géré. Les exemples relatifs à la gestion des hydrosystèmes sont nombreux en hydrologie, hydraulique, économie, etc. Les modèles de nature différente peuvent être couplés. Ce type de démarche peut permettre au décideur de hiérarchiser différents scénarios, ou d'identifier (avec un module d'optimisation) un scénario optimal selon des critères spécifiés. Dans le premier cas, on aide le décideur à identifier la meilleure des solutions au sein d'un ensemble qu'il propose, dans le second cas, on l'aide à identifier la meilleure solution en fonction des critères qu'il spécifie ;

4- ceux dont l'objectif est d'aider les acteurs associés à la décision à construire une représentation commune du système à gérer (ce qui est appelé Group Decision Support System dans ton lexique). Ce type d'outils est utile lorsque plusieurs acteurs participent de manière concertée aux décisions de gestion de la ressource en eau et lorsque le système à gérer est un système rendu complexe par la nature des interactions qui existent entre les acteurs entre eux et avec la ressource en eau.

Dans le cas de la gestion des bassins versant en France, tous les acteurs associés à la gestion du système complexe (rivière + nappe par exemple) n'ont pas la même perception des liens qui existent entre les différentes variables physiques, donc a fortiori des liens entre leurs actions et l'état de la ressource, voire des liens entre les acteurs entre eux. Une représentation dynamique de ces

liens représente un outil d'aide à la décision dans la mesure où il permet à tous les acteurs de percevoir de la même manière l'impact (qualitatif) d'une action / décision discutée. On s'approche alors d'outils d'aide à la négociation.

J'ai travaillé sur des outils de ce type auparavant (modèles multi-agents). Certains collègues du Cemagref ou du Cirad les appliquent à des problèmes de choix de mode de gestion de ressources naturelles. Un modèle informatique est d'abord construit. Il permet de simuler l'impact qualitatif de scénarios de gestion. Le modèle est ensuite transcrit sous forme de jeu de rôle, et utilise avec les acteurs pour leur faire prendre conscience des liens de causalités entre leurs actions, celles des autres acteurs et l'état de la ressource naturelle.

En fait, si l'on superpose la grille d'analyse orientée « outil » (qui est celle du rapport) à celle orientée « objectif », on doit converger vers la même typologie :

- le type 1 mobilise des bases de données, des SIG (et plus rarement des méthodes de "data mining") ;*
- le type 2, des bases de données couplées à de l'analyse multicritère, bases de données relationnelles ;*
- le type 3 des modèles numériques de simulation variés ;*
- le type 4 des représentations de système complexe qui vont du croquis sur tableau blanc au modèles écrits en langages orienté objet (modèles multi-agents, automates cellulaires, etc.) »*

2. DSS appliqués aux ressources en eau rencontrés sur le Web

Dans ce chapitre, on a rassemblé les caractéristiques des DSS rencontrés sur le web qui paraissent, d'une manière ou d'une autre, présenter un intérêt pour nos activités. Il faut bien noter que les paragraphes suivants constituent une traduction aussi fidèle que possible des pages web et non pas notre propre avis sur les DSS en question (à l'exception cependant parfois de quelques remarques sur la clarté ou l'intérêt des textes) et que nous n'avons bien évidemment pas été en mesure de vérifier les assertions des auteurs. Une suite logique de ce travail consisterait justement à tester les DSS téléchargeables qui paraissent présenter un intérêt pour nos études.

On trouvera dans ce chapitre la description de différents DSS à des niveaux de détails variables, par exemple, l'architecture du système, les algorithmes utilisés, les codes numériques utilisés, des exemples d'application, *rarement la façon de coupler les outils numériques aux autres...*

Il est parfois possible de télécharger des DSS ou des applications, dans ce cas, on l'a signalé au fur et à mesure du rapport.

Certains sites sont « actifs » c'est-à-dire mis à jour régulièrement ; d'autres ont été créés à une date donnée avec parfois un programme ambitieux affiché et ne sont plus mis à jour.

On trouvera également dans ce chapitre des sites de compagnies industrielles construisant des DSS, des sites de cas d'étude disponibles sur le web (la plupart sont des prototypes, peu concernent les sciences de la terre sans parler de l'eau).

2.1. ADRESSE WEB – HTTP://WWW.ISE.UFL.EDU/CAO/WATER/ DERNIERE MISE A JOUR A DATE INCONNUE

Organisme : University of Florida, Center for Applied Optimization

Decision modeling for alternative water supply strategies: St. Johns river water management district (SJRWMD)

Modèles de décision utilisant une approche combinée simulation/optimization pour déterminer des stratégies à moindre coût permettant de satisfaire les demandes en eau (urbaine et agricole) projetées à l'année 2010 tout en limitant les impacts environnementaux à un niveau minimal.

Prise en compte de zones à risques c'est-à-dire où les impacts d'un accroissement des prélèvements destinés à satisfaire la demande en eau (projetée à l'horizon 2010) risquent d'excéder les limites admissibles.

Les limites admissibles à prendre en compte sont d'ordre

- physique : impact sur la végétation indigène (en particulier les zones humides), sur les niveaux et débits des sources et rivières, sur la charge de la nappe et la qualité de l'eau souterraine (risque d'intrusion saline),

- réglementaire : impact sur les utilisateurs de l'eau.

De plus, il faut intégrer les contraintes représentées par l'absence dans certaines zones de ressource alternative permettant de réaliser le projet.

L'objectif du modèle est le développement et le test de schémas alternatifs d'approvisionnement en eau qui permettent de corriger ou d'éviter les impacts négatifs qu'aurait un accroissement systématique des prélèvements dans l'aquifère, tout en intégrant les contraintes existantes et en minimisant les coûts.

Le modèle de décision utilise la programmation linéaire ou mixte entière et incorpore une matrice des réponses unitaires pour simuler la réponse de l'aquifère aux variations de prélèvements : utilisation du modèle de simulation hydrodynamique MODFLOW, écriture des formulations d'optimisation à l'aide du langage GAMS (General Algebraic Modeling System décrit à l'adresse web <http://www.gams.com/>), résolution par le solveur GAMS/CPLEX (<http://www.gams.com/solvers/cplex/main.htm>)

L'optimisation fait intervenir les prélèvements actuels et les ressources alternatives envisageables en 2010 telles que eau de surface (lac Griffin ou rivière St. Johns), eau retraitée pour l'irrigation, sources de qualité moindre, recharge artificielle...

Le modèle identifie les meilleures combinaisons de ressources existantes et potentielles ainsi que leur taux d'utilisation optimale et les charges (fixes et unitaires) associées à leur mise en oeuvre. Il intègre les préoccupations et contraintes liées aux zones à risque.

Méthode : *programmation linéaire et mixte entière (LP optimization models and MIP decision models, cf § 3.1.)* pour ne conserver que les alternatives qui minimisent l'impact sur l'environnement ainsi que les coûts.

Historique et fonctionnement du modèle :

a) un premier modèle combinant simulation par MODFLOW et optimisation par LP (programmation linéaire) dont l'objectif était : développer des stratégies d'exploitation de l'aquifère qui maximisent les prélèvements sur les puits existants en minimisant les impacts environnementaux (intrusion saline, perte de charge). Le modèle cherche à satisfaire les demandes urbaines et agricoles en déterminant les puits qui doivent être utilisés, leur débit, le montant des déficits éventuels et les contraintes environnementales à respecter.

Les déficits sont les quantités d'eau qui ne peuvent pas être extraites de l'aquifère si l'on respecte les contraintes hydrodynamiques (débit minimum des sources, rabattement maximal admissible de la nappe...). Ils permettent d'identifier les zones à risque.

Les déficits interviennent comme des pénalités dans la fonction objectif à minimiser.

La réponse de l'aquifère aux variations de prélèvements est approchée dans le modèle d'optimisation par LP à l'aide de la matrice des réponse unitaires (cf § 4.2.) pour un scénario donné. Cette matrice est constituée des coefficients d'influence individuels des puits qui quantifient la variation de charge de l'aquifère ou de débit des sources due à une variation de prélèvement en un puits unique. Les coefficients d'influence sont obtenus à partir des résultats du code de simulation hydrodynamique (MODFLOW dans ce cas). Ensuite, en vertu du principe de superposition, on obtient la réponse globale de l'aquifère en sommant les réponses distinctes aux sollicitations de chaque puits.

Résolution de l'optimisation LP par la méthode dual-simplex (cf § 4.2.).

b) nouveau modèle (decision making model) dont l'objectif est de développer des scénarios alternatifs incluant de nouvelles ressources et prenant en compte les résultats du modèle d'optimisation par LP, les ressources alternatives et les coûts.

L'optimization est réalisée par programmation entière mixte (MIP) incorporant des variables binaires pour les décisions concernant les ressources alternatives et des fonctions continues représentant les coûts (fixes et unitaires), les débits requis et les impacts environnementaux.

Résolution par la méthode « branch and bound strategy » (cf § 3.1.).

2.2. ADRESSE WEB – [HTTP://WWW.NCL.AC.UK/WRGI/WRSRL](http://www.ncl.ac.uk/wrgi/wrsrl) DERNIERE MISE A JOUR A DATE INCONNUE

Organisme : University of Newcastle - Water Resources Systems Research Laboratory (WRSRL)

Deux branches d'activité principales : Advanced Modelling Systems and Decision Support Systems. L'activité en DSS résulte de l'intégration des différentes composantes suivantes : modèles hydrologiques et hydrodynamiques développés au WRSRL, GIS, bases de données, procédures d'optimisation et systèmes experts.

Participation du WRSRL à deux principaux projets de DSS : WATERWARE (gestion intégrée d'un bassin fluvial), NELUP pour la gestion de l'utilisation de la terre (Land Use Planning). Un 3ème projet est en cours dans le cadre du programme européen MEDALUS (MEditerranean Desertification And Land USE).

• **WATERWARE** programme de recherche international (3 universités, un institut de recherche et 2 compagnies commerciales dont ESS cf § 3.3.) destiné à développer un DSS pour la gestion intégrée d'un bassin fluvial permettant de :

- déterminer les limites de développement,
- évaluer l'impact d'une nouvelle législation sur l'environnement,
- décider quelles nouvelles ressources devaient être recherchées, où et quand,
- estimer les impacts environnementaux,
- formuler des stratégies pour contrôler la pollution de la rivière et de la nappe.

Ce système informatique de la 5ème génération a la capacité non seulement de prédire les effets de différents scénarios mais aussi d'offrir des conseils d'expert sur les décisions à prendre et les choix à faire.

Les modélisations hydrodynamiques servent à prédire les effets des scénarios ; *l'intelligence artificielle est fournie par un mélange de techniques d'optimisation et de systèmes experts. Ces derniers assistent l'utilisateur pour évaluer les options, tirer les conclusions et déterminer les actions appropriées.*

Architecture du système : il comprend un SIG, une base de données géo-référencée, un éditeur générique de réseau fluvial, couplés à un nombre croissant de composants analytiques pour le contrôle de la pollution de l'aquifère, le contrôle de la pollution du réseau superficiel, la prévision de la demande, la planification des ressources en eau et la prise en compte des processus hydro(géo)logiques. De nouveaux composants tels que les estuaires sont en train d'être ajoutés : pourvu que les nouveaux éléments soient compatibles avec les interfaces génériques, il n'y a pas de limitation aux évolutions du système.

Les liens entre composants sont largement transparents pour l'utilisateur ; les ecommunications se font à l'aide d'une interface conviviale (utilisation d'hypertexte) et l'activation d'icônes.

Composants

a) SIG : il contient toutes les données spatiales (images satellites, MNT, cartes digitalisées de la géologie, des propriétés des sols, etc...) sur lesquelles les différentes limites, le réseau de rivières, les routes, etc.. peuvent être superposés.

b) Bases de données : elles comportent des données statiques (types de tâches), lentement évolutives (processus utilisés, configuration des tâches) ou dynamiques (grandeurs physiques) couplées au SIG par géo-référencement.

c) Contrôle de la pollution de l'aquifère : modèle aux différences finies pour la simulation de l'écoulement et du transport, 2D par défaut, peut être remplacé par un modèle 3D plus sophistiqué TRACE si nécessaire.

(adresse web - <http://www.ncl.ac.uk/wrgi/wrsrl/gwms/gwms.html>)

Le module de décision est basé sur un processus à 3 phases (cf § 3.2.) :

- *un système expert localise les sites potentiels pour l'implantation de forages de dépollution,*
- *un réseau de neurones évalue les performances de différentes combinaisons de forages,*
- *un algorithme génétique sélectionne les solutions les plus avantageuses pour arriver au niveau de contamination résiduel supposé acceptable.*

d) Contrôle de la pollution de surface : le DSS contient un modèle stochastique 1D de simulation de la qualité des rivières basé sur TOMCAT largement utilisé en Grande-Bretagne. Le module de décision prend en compte les résultats du modèle stochastique à l'aide d'une combinaison de techniques heuristiques et de programmation linéaire pour

identifier la solution la moins coûteuse permettant d'obtenir les normes de qualité prescrites, il est capable de sélectionner les technologies appropriées à chaque effluent pour arriver au résultat. Alternativement, le module décisionnel peut quantifier l'amélioration qu'il est possible d'apporter à la qualité des rivières à budget constant donné.

e) Préviation de la demande en eau : les demandes pour l'irrigation sont estimées à l'aide du modèle CRPWAT de l'ONU qui a été refondu en "*rule-based inference module*" (cf § 3.2.) pour le système expert de WATERWARE.

Etant donné les différents types de culture, des systèmes experts emboîtés permettent de quantifier les paramètres tels que l'efficacité du processus d'irrigation ou les facteurs agro-économiques (coûts des engrais...). Une approche similaire est adoptée pour estimer la demande prévisible pour les autres besoins (domestique...).

f) Processus hydrologiques : le composant contient un modèle de ruissellement au pas de temps journalier qui est utilisé principalement pour générer des séries de débits pour les affluents non jaugés.

Pour une modélisation plus sophistiquée des processus, le modèle SHETRAN peut être utilisé (adresse web – <http://www.ncl.ac.uk/wrgi/wrsrl/rbms/rbms.html>)

g) Planification des ressources en eau : un *modèle générique* (cf § 3.2.) a été développé pour représenter la dynamique du système au pas de temps journalier ; il opère par bilan entre ressources et demandes et indique la fréquence des ruptures d'approvisionnement, donnant ainsi une idée de la fiabilité du système d'attribution des ressources.

Le système a été testé sur le bassin de la Tamise en Angleterre, puis appliqué avec succès au bassin du Rio Lerma au Mexique ainsi qu'aux Territoires Occupés en Palestine.

2.3. ADRESSE WEB - [HTTP://CCI.CT.TUDELFT.NL/DSSI](http://CCI.CT.TUDELFT.NL/DSSI) DERNIERE MISE A JOUR LE 11/09/1995

Organisme : Delft University of Technology - Faculty for Civil Engineering

Le programme **Decision support systems for Water Management** se décompose en 3 projets principaux :

a) *Model integration and coupling* (intégration de modèles et couplage) - les modèles de simulation forment avec les bases de données le coeur d'un DSS. L'accroissement de la puissance informatique a permis de résoudre des problèmes de plus en plus complexes, d'où accroissement de la complexité des modèles numériques.

Modélisation des interactions entre rivière et aquifère à l'aide de codes différents : MODFLOW de l'USGS pour la modélisation de l'aquifère et DUFLOW modèle d'écoulement dans un réseau linéaire ouvert (rivières) développé en Hollande.

Problèmes qui se posent :

- échange de données entre les deux modèles, réalisé à l'aide d'un format commun (NetCDF = Network Common Data Format, interface développée par Unidata en C et FORTRAN), également proposition de plusieurs autres formats : HTML du WWW ou Mosaic du NCSA (National Center for Super computing Applications)
- échelles de temps différentes entre les écoulements de surface et souterrains (classique...).

Les deux modèles sont *loosely coupled* c'est-à-dire qu'ils échangent des informations par fichiers externes.

Dans MODFLOW l'interaction aquifère/rivière (infiltration depuis la rivière seulement) est simulée par un terme source dans l'équation de bilan ; les niveaux dans la rivière doivent être fournis en entrée de MODFLOW.

DUFLOW le modèle de surface est basé sur les équations 1D décrivant l'écoulement transitoire dans un réseau de chenaux.

Adoption du format NetCDF interfacé avec le format HDF (Hierarchical Data Format) du NCSA ; NetCDF est un format auto documenté, indépendant de la plateforme de calcul, accessible à travers un réseau constitué de machines différentes sous différents systèmes d'exploitation ; il permet à des programmes C ou FORTRAN d'accéder aux mêmes fichiers de la même façon.

Objectif annoncé : intégrer l'ensemble des deux codes faiblement couplés dans un DSS. (Pas d'information sur les réalisations depuis 1995).

b) *Object adaptive software environments* - la complexité de construction d'un DSS est principalement liée aux contraintes externes du problème posé ; recherche en cours sur le lien entre les structures "douces" (soft) d'analyse de décision et les modèles de calcul numériques "durs"(hard).

Notion de "decision support environnement" (DE) pour la gestion des ressources en eau (pas vraiment clair).

c) *Management* - but du projet : trouver les critères sur lesquels les décisions en matière de gestion des eaux seront prises.

2.4. ADRESSE WEB –

[HTTP://SUNBURN.UWATERLOO.CA/~LFLEONV/ARTICS/ART25.HTML](http://SUNBURN.UWATERLOO.CA/~LFLEONV/ARTICS/ART25.HTML)
DERNIERE MISE A JOUR EN 1995 OU 1996

Organisme : University of Waterloo, Civil Engineering, Ontario, Canada

Organismes associés : National Water Research Institute, Burlington, Ontario

University of Guelph, Computer Science, Guelph, Ontario

Description de l'état d'avancement d'un projet de recherche dont le produit final souhaité serait un DSS intégrant la modélisation des pollutions diffuses dans les eaux de surface.

Les auteurs rappellent que les pollutions diffuses (NSP = Non point Source Pollution) constituent un important axe de recherche pour le développement de modèles et techniques de modélisation. En effet, contrairement aux pollutions ponctuelles où une masse connue de polluant est déchargée à partir d'une source connue, les pollutions diffuses sont constituées par un ensemble de petites entrées de contaminant relâchées depuis de nombreuses sources réparties dans tout le bassin versant. La difficulté de modélisation des NSP tient à l'identification des sources et la quantification de la charge.

Les approches de modélisation de la pollution diffuse agricole dans les eaux de surface, qu'elles utilisent des modèles globaux ou distribués, considèrent toutes que le mode dominant de transport des polluants (sédiments, engrais, pesticides..) est le ruissellement qui dépend fortement de l'intensité des précipitations (orages...)

- Depuis le début des années 1970, un grand nombre de modèles de NSP ont été développés. Pour cette recherche, le modèle AGNPS (AGricultural NonPoint Source pollution model) développé par le United States Department of Agriculture a été retenu. Ce modèle prend en compte un seul orage à précipitation uniforme. Les bassins versants (BV) modélisés avec AGNPS doivent être divisés en cellules de travail carrées homogènes, ce qui permet de prendre en compte l'hétérogénéité du milieu. L'hydrologie est calculée par la *Soil Conservation Service (SCS) curve number approach*. L'USLE (Universal Soil Loss Equation) est utilisée pour prédire l'érosion du sol selon 5 différentes tailles de particules soit sable, limon, argile, petits agrégats et gros agrégats.

- Par ailleurs, le projet envisage d'utiliser le SIG dénommé RAISON (Regional Analysis by Intelligent Systems ON microcomputers) comme base de développement d'un véritable SDSS (Spatial Decision Support System) en vue d'une meilleure gestion des BV.

It is expected that further development will allow it to become a powerful SDSS that will be part of the many research tools needed for better watershed management and planning. While there are some similarities to GIS, the RAISON system differs significantly as it emphasizes decision support and expert systems that are impossible to achieve with traditional GIS. (cf description de RAISON au § 2.5.).

Une caractéristique importante de RAISON est sa capacité à intégrer des outils de modélisation dans le système, à l'aide d'interfaces qui interagissent avec les modèles existants et interceptent les entrées et sorties pour les connecter à la base de données dans le système.

La communication avec RAISON se fait à l'aide de DDE (Dynamic Data Exchange). La plupart des fonctions utilisées par l'interface sont disponibles sous forme de DLL (Dynamic-Link Library) bibliothèque de modules chargés et linkés à l'application au moment de l'exécution.

- Approche "intégrale" envisagée = couplage du modèle AGNPS avec le SIG RAISON. L'interface interactive est destinée à préparer les données, initialiser les simulations par le modèle numérique et analyser les résultats du modèle à l'aide d'outils graphiques et statistiques.

- Pour lancer les exécutions du code AGNPS, les données stockées dans la base de données doivent être exportées dans un fichier ASCII sous un format lisible par le modèle numérique.

L'interface comporte 3 procédures pour écrire le fichier ASCII, faire un run de AGNPS ou activer un shell DOS pour contrôler le modèle. Les résultats sont ensuite extraits d'un fichier ASCII temporaire puis stockés dans la base de données unique.

Des exemples de la barre d'outils et des outputs sont montrés sur le web ainsi que des illustrations de la structure de l'intégration.

Le papier ne présente qu'un résultat partiel de recherche dont le principal objectif est de créer un système intégré de modélisation de NSP dans les eaux de surface. Ceci sera accompli à travers le couplage de modèles distribués à l'intérieur de RAISON comme DSS :

This will be achieved through the linkage of distributed models within RAISON as the decision support system. Having an integral tool that will provide ease of use, analysis tools and graphic displays, all under a common framework of a decision support system, is by itself a major improvement in NSP modeling.

Aucune information sur l'atteinte des objectifs depuis 1995 ou 1996.

Le même auteur (Luis Leon) travaille sur un interface similaire avec RAISON : pour le modèle WATFLOOD, de l'université de Waterloo (Ontario) lequel est constitué d'un ensemble de programmes pour prédire les inondations dans les BV ayant des temps de réponse de une heure à quelques semaines. Des simulations continues peuvent être réalisées par enchaînement de plusieurs événements orageux (jusqu'à 36). WATFLOOD fait un usage optimal des données de télédétection : les données radar de précipitations et de couverture du sol peuvent être directement incorporées dans la modélisation hydrologique.

2.5. ADRESSE WEB RAISON

[HTTP://CHARON.CCIW.CA/RMWIN/PAGE2.HTML](http://CHARON.CCIW.CA/RMWIN/PAGE2.HTML) DERNIERE MISE A JOUR EN 1997

RAISON (Regional Analysis by Intelligent Systems ON microcomputers) est développé au National Water Research Institute, Burlington, Ontario, Canada.

La version Windows est à la fois un SIG et un outil de recherche avec des capacités de système-expert.

Il présente un cadre générique qui intègre données, texte, cartes, objets..

Il procure une bibliothèque d'outils conviviaux incluant un système de gestion de bases de données, des systèmes de cartographie, d'édition de graphiques, de statistiques et un système expert utilisant la logique floue (*knowledge rulebase expert system ; rulebase with fuzzy logic and built-in inference engine*).

La version pour Windows a évolué depuis la première version DOS en 1986. RAISON a été revu en 1992 par un panel d'experts internationaux et est couramment utilisé par de nombreuses agences environnementales dans le monde.

Les nouvelles options en cours de test comportent : analyse discriminante et en composantes principales ; outils avancés d'intelligence artificielle tels que réseaux de neurones, algorithmes génétiques et *causal belief networks* (cf § 3.2.).

RAISON accepte des fichiers venant de dbase III , Paradox, Access 2.0, EXCEL 6.0, Lotus 1-2-3, SPANS, ARC/INFO, MapInfo, Btrieve et peut se connecter à ORACLE et aux autres serveurs SQL.

2.6. ADRESSE WEB – HTTP://H2OSPARC.WQ.NCSU.EDU/ DERNIERE MISE A JOUR EN NOVEMBRE 1998

Organisme : North Carolina State University - Water Quality Group

• **WATERSHEDSS** (WATER Soil and HydroEnvironmental Decision Support System) Encore un DSS pour le contrôle de la pollution diffuse (*nonpoint sourcepollution*).

Objectifs :

- transférer l'information sur la qualité de l'eau et le traitement de la terre aux gestionnaires de bassins versants/bassins hydrographiques (*watersheds*) et les assister dans la prise de décisions appropriées pour l'atteinte d'objectifs de qualité de l'eau,
- évaluer les sources, les impacts et les options de gestion potentielles pour le contrôle de la pollution diffuse dans un bassin versant, à partir d'informations fournies par les utilisateurs.

WATERSHEDSS comporte 6 **composants** :

- une interface utilisateur hypertexte similaire à un système expert (*expert system like*) qui sert de cadre au DSS pour l'évaluation du BV,
- un composant éducatif contenant des informations détaillées et des références sur les pollutions diffuses (NPS),
- une bibliographie annotée sur les types de pollutions diffuses,
- une base de données sur les meilleures pratiques agricole de gestion (*Best Management Practice = BMP*)
- un SIG couplé à un modèle de qualité de l'eau,
- une feuille de calcul du bilan de pollution (*pollutant budget spreadsheet*).

Il s'agit de déterminer les BMP ; en fonction des données disponibles sur le BV, il est parfois possible de développer un plan de traitement du sol qui aidera à réduire un problème particulier de qualité de l'eau.

Ne concerne que les eaux de surface (estuaires, lacs/réservoirs, rivières, cours d'eau non pérennes, zones humides).

Si les problèmes de mauvaise qualité sont dus à des engrais, des sédiments ou des pesticides, *possibilité d'utiliser l'outil de modélisation : un SIG couplé au modèle d'écoulement de polluant distribué spatialement AGNPS* (cf 2.4.). Possibilité de faire

une comparaison détaillée des effets des différentes utilisations du sol, des différentes caractéristiques du paysage, et des scénarios de gestion sur la qualité de l'eau.

La feuille de calcul du bilan de pollution permet de calculer des "coefficients d'export" approximatifs pour un polluant donné (azote ou phosphore) ; calcul à partir des surfaces telles que superficies cultivées en blé, en maïs, bâties... Ne permet pas de calculer un montant exact de "nutrient" atteignant la ressource en eau mais plutôt d'estimer l'importance relative des différents types d'utilisation du sol dans l'impact sur la qualité de l'eau.

Case studies : St. Alban's bay (Vermont) et Rock Creek (Idaho) Rural Clean Water Program projects. Le RCWP est un programme fédéral destiné à contrôler la pollution agricole diffuse dans les BV ruraux de façon à améliorer la qualité (a débuté en 1980 avec expérience de 10 à 15 ans ; offrait des participations aux coûts ainsi qu'une assistance technique aux volontaires pour l'implantation de BMP).

21 projets de bassin versant financés par le RCWP pour 64 M\$, représentant un large panel de problèmes de pollution.

a) St. Alban's bay (Vermont) :

Problèmes de qualité de l'eau dus à des pollutions diffuses : excès de charge de phosphore, bactéries venant des rejets animaux et sédiments ; l'excès de phosphore a résulté en une prolifération des algues entre autres désagréments...

Objectifs de qualité de l'eau : améliorer en réduisant les bactéries, les sédiments, le phosphore et l'azote entrant dans la baie.

Documenter les changements dans la qualité des tributaires résultant de BMP agricoles dans le BV de la baie.

Insistance sur l'aspect quantitatif des objectifs d'améliorations ; les objectifs devaient être "réalistes, spécifiques et mesurables" sous forme de pourcentages désirés de réduction du niveau de polluants ou % désiré d'accroissement de la participation des producteurs à l'implantation de BMP (implanter au moins 75 % des schémas de BMP dans les zones critiques de façon à réduire dans des mêmes zones la charge en phosphore d'au moins 75% et celle en sédiment d'au moins 85%, lesquelles zones critiques sont définies comme les fermes apportant des quantités excessives de fumier et de coliformes fécaux aux voies d'eau).

La méthodologie pour la mesure de l'évolution de la qualité de l'eau dans la baie et l'ensemble du BV suite à la mise en place de BMP a pris la forme d'un programme de suivi intensif : suivi sur le long terme de la qualité de l'eau dans 4 ruisseaux affluents drainant les terres essentiellement agricoles ; études intensives à court terme de la gestion des engrais par BMP, de la circulation dans la baie, de l'influence des zones humides ; suivi intensif de l'activité agricole et du mode d'utilisation de la terre (utilisation du SIG ARC/INFO pour gestion et analyse de ces données)

b) Rock Creek (Idaho) :

Il s'agit de l'un des cours d'eau les plus dégradés du fait de pollutions ponctuelles et diffuses. Les pollutions ponctuelles ont été virtuellement éliminées dès la fin des années 70 mais pas les autres (charges élevées en sédiment et polluant agricole).

Possibilité de télécharger l'application à l'adresse web suivante (pas toujours accessible : firewall intermittent ?) http://h2osparc.wq.ncsu.edu/GIS_AGNPS.html

• **Outil de modélisation GRASS-AGNPS pour WATERSHEDSS :**

Les utilisateurs ayant les cartes GRASS (cf ci-après) appropriées peuvent simuler les différentes charges en engrais, sédiments, pesticides associées à différents scénarios de gestion et d'utilisation du sol en faisant tourner le générateur de fichiers puis le modèle AGNPS inclus dans l'outil.

GRASS est le SIG. Le générateur de fichier prépare les 22 paramètres requis pour chaque cellule des 8 à 11 cartes qui constituent les couches du SIG GRASS, ainsi que des paramètres pour le modèle AGNPS.

Les différentes couches du GIS sont présentées sous forme de cartes soit : limites de la zone, topographie, type d'utilisation du sol, pourcentage de sable dans le sol, % d'argile, type de gestion du sol....etc

Les sorties du modèle GRASS-AGNPS sont des cartes zonées avec la charge en polluant par maille (4 niveaux de charge) ou une table récapitulative pour chaque cellule sélectionnée.

Possibilité de télécharger les sources de GRASS et AGNPS

Manuel de l'utilisateur à l'adresse http://h2osparc.wq.ncsu.edu/grass_manual.html

Description :

a) GRASS (Geographic Resource Analysis Support System) est un ensemble de programmes intégrés pour l'analyse et la modélisation de données spatiales, la visualisation de l'information, la digitalisation, le traitement d'images, la production de cartes, mis au point par le US Army Corp. of Engineers (Construction Engineering Research Laboratory). C'est donc un SIG dont les sources sont dans le domaine public. Le système GRASS est largement utilisé et a fait preuve de sa fiabilité ; un ensemble de bibliothèques est fourni avec GRASS qui peuvent être incorporées directement dans un GUI (Graphical User Interface) pour réaliser les analyses spatiales.

b) Description de AGNPS (cf § 2.4.).

2.7. ADRESSE WEB - HTTP://WWW.IDS.COLOSTATE.EDU/ DERNIERE MISE A JOUR A DATE INCONNUE

Organisme : Colorado State University – Integrated Decision Support Group (IDS)

Sa vocation est de combiner des techniques de modélisation avancées avec l'ingénierie du logiciel pour **créer des DSS pour la gestion de l'eau et des ressources naturelles**. Le groupe IDS fait partie du Water Center de l'université du Colorado.

Il définit un DSS comme « une combinaison de modèles d'ingénierie avancée, de techniques d'analyse, de données complexes, de Système d'Information Géographique (GIS) et d'Interface Utilisateur Graphique (GUI) ».

Le groupe IDS a développé plusieurs projets parmi lesquels :

- **CSUID** (Colorado State University Irrigation and Drainage system) qualifié de « DSS pour le design et la gestion de systèmes d'irrigation et de drainage combinés » en zone aride et semi-aride.

Ecrit pour fonctionner sur une station de travail SUN sous UNIX, il fait appel à un GUI (interface graphique) développé en C combiné à des bibliothèques graphiques (OSF/Motif). *Ses autres caractéristiques ne sont pas décrites.*

- **IPDSS** (Integrated Planning Decision Support System) qualifié de DSS pour l'évaluation des risques naturels (affaissement, inondation...) dans le cadre de la planification urbaine et des plans d'occupation du sol. Il est construit pour prendre en compte des informations d'ordre topographique, géologique, géotechnique, hydrologique et évaluer les risques naturels en intégrant le risque maximum probable en précipitation et sismicité comme facteurs déclenchants (triggering) pour des scénarios de sensibilité. Les aspects considérés dans l'analyse de vulnérabilité sont la sensibilité de l'écosystème, la vulnérabilité économique et la vulnérabilité de l'infrastructure sociale.

Une interface permettant de programmer des applications permet aussi l'intégration du SIG et des modèles environnementaux. Cette intégration procure une interface commune pour partager et transférer l'information entre les différents composants à l'aide d'un module C (*non décrit*). L'architecture IPDSS est implantée sur une station de travail SUN/SPARC sous UNIX.

Pour faciliter l'utilisation des données, le système IPDSS fait appel au SIG GRASS à l'aide d'une interface standardisée (*non décrite*) ; il permet à l'utilisateur de choisir des critères et des objectifs à minimiser ou maximiser. L'utilisateur peut créer ses propres applications à l'aide des fonctionnalités de IPDSS *sans avoir à écrire du code.*

- **WetScape** (WETland landSCAPE and hydrology model) est un DSS pour la sélection, l'évaluation et la planification de zones humides (créées et/ou restaurées) dans le cadre de BMP (Best Management Plans).

WetScape procure des facilités d'analyse en vue de décisions portant sur la gestion des ressources en eau de surface à l'échelle du bassin versant en prenant particulièrement en compte les zones humides et leur rôle dans l'amélioration de la qualité de l'eau et la préservation de la vie sauvage, sachant que la restauration de zones humides utiles à l'écosystème ne peut être effectuée qu'en mettant en balance les besoins en eau des espèces vivant dans les zones humides (wildlife) avec ceux des autres utilisateurs (municipalités, agriculture).

Les développements en plusieurs phases entre 1993 et 1996 (terminés ?) ont comporté la phase NRWS (Natural Resource Workstation) développé au départ pour la mise en valeur des zones humides dans la zone nord du bassin de la rivière San Joaquin (Californie) et le développement d'un module additionnel spécialement destiné à l'analyse de ces zones. La dernière version décrite (ultérieure à 1996) comprend les outils suivants :

- un GUI basé sur OSF/Motif,
- un SIG basé sur GRASS (cf § 2.6.),
- différents modules d'analyse, chacun avec son GUI, développés pour explorer les caractéristiques topographiques, classer les zones selon divers critères, examiner les caractéristiques hydrologiques ainsi que celles des zones humides à créer ou restaurer et enfin développer et analyser des stratégies potentielles d'aménagement du bassin. Certains modules sont en cours de développement dans la version sur le WEB.

L'accès aux différents modules est possible à travers l'interface principale qui supporte aussi un ensemble d'opérations génériques.

2.8. ADRESSE WEB -

[HTTP://ES.EPA.GOV/NCERQA/PROGRESS/BRILLPR.HTML](http://es.epa.gov/ncerqa/progress/brillpr.html)
DERNIERE MISE A JOUR EN JUILLET 1999

Organisme : NCERQA (National Center for Environmental Research and Quality Assurance) de l'EPA (US Environmental Protection Agency)

- Document présenté : « Advancement of Environmental Decision Support Systems through High Performance Computing Communication (HPCC) ».

- Durée du projet : octobre 1996 à octobre 1999 (donc devrait être achevé).

- Objectif affiché : surmonter les limitations couramment rencontrées en terme de ressource de calcul, en utilisant un environnement très performant (HPCC) pour amener un DSS au niveau d'un véritable « *joint-cognitive system* » (voir § 3.1.). La complexité des problèmes à appréhender dans le cadre de la mise au point d'un DSS en gestion de l'environnement fait que peu de réalisations correspondent à cette description, en particulier du fait du temps de calcul des modèles numériques impliqués et de la difficulté de prendre en compte le comportement complexe des phénomènes dans les approches d'optimisation traditionnelles.

Les approches non traditionnelles telles que *les algorithmes génétiques (Genetic Algorithms = GA)* et les « *simulated annealing* » (SA), cf § 3.2., peuvent être utilisées à la place mais leur demande en puissance de calcul limite leur possibilités pratiques.

L'objectif de l'étude est donc d'explorer comment un environnement informatique performant peut aider à surmonter ces difficultés.

- Réalisations présentées à fin 98 : trois voies ont été explorées :

- résolution de problèmes d'environnement complexes avec optimisation, dans un environnement informatique distribué (calcul parallèle). Au cours de la dernière année du projet, il est envisagé de tester la parallélisation d'un GA sur un cas test ; le GA sera implanté sur un réseau de 7 à 30 machines ; une réduction des temps de calcul par un facteur de 200 est attendue (à suivre ?) ;
- amélioration des techniques d'optimisation en vue d'analyses multiobjectifs (cf § 4.2.). L'auteur indique avoir exploré des modifications des GA en vue d'optimisation multiobjectifs ; une nouvelle approche appelée *Neighborhood Constraint Method (NCM)* a été développée dans ce but. La comparaison des résultats avec ceux de GA habituels suggère que cette méthode est plus performante pour la résolution de problèmes dans le domaine environnemental ;
- développement d'un prototype d'architecture pour un DSS en gestion de la qualité de l'air appelé SDT (Strategy Development Tool) présenté à l'adresse web : <http://www4.ncsu.edu/~dlgillson/project/> ; il a été axé sur le développement de stratégies de contrôle de l'ozone troposphérique, lequel polluant n'est pas directement émis par des sources mais formé au cours de réactions chimiques dans l'atmosphère ; la chimie fortement non linéaire de la formation de l'ozone rend difficile l'utilisation des techniques traditionnelles d'optimisation (programmation linéaire, non linéaire, en nombre entiers) dans le but de définir les stratégies. Le SDT offre 4 options principales : analyse de la stratégie en contrôle, développement de stratégies interactives, tests des performances de la stratégie, développement de stratégies basées sur optimisation.

Le SDT est une composante expérimentale du DSS environnemental (EDSS) du North Carolina Supercomputer Center (NCSC) lequel est décrit sur le site web suivant : <http://www.iceis.mcnc.org/EDSS> dernière mise à jour mars 1998.

NSCS Environmental Programs permet le **téléchargement gratuit** de la plupart de ses produits dont EDSS, à l'adresse <http://www.iceis.mcnc.org/products/index.html>

2.9. ADRESSE WEB -

**[HTTP://WWW.RIVERSIDE.COM/DSS/DSSINTRO.HTML](http://WWW.RIVERSIDE.COM/DSS/DSSINTRO.HTML) DERNIERE
MISE A JOUR APRES 1997**

Organisme : Riverside Technology, Inc. (RTI), Colorado.

Cet organisme est une société de services qui développe et implémente des systèmes informatiques évolués en particulier dans le domaine des ressources en eau (superficielles et souterraines) en utilisant des technologies telles que les suivantes :

- GIS (ARC/INFO, ArcView, ArcCAD, GPS, télédétection, ESRI MapObjects ...)
- bases de données relationnelles (Microsoft Access, Informix, Oracle) et interfaces avec le web,
- langages de programmation tels que C++, C, Java, Visual Basic et FORTRAN,
- intégration des systèmes en particulier pour la mise au point de DSS.

RTI est impliqué dans le développement de plusieurs DSS tels que le Colorado's DSS (CDSS), un DSS pour le bassin de la rivière Columbia à Portland (Oregon), un autre pour la gestion des crues en temps réel pour la Trinity River Authority (Texas).

Et depuis janvier 1999, des extensions aux travaux réalisés pour le CDSS en vue de la mise au point du Rio Grande DSS.

CDSS : web site <http://cdss.state.co.us/ftp/ftp.html> (non accessible en permanence, mis à jour régulièrement, dernière mise à jour en octobre 1999)

En 1994, RTI a été sélectionné par l'état du Colorado pour mettre au point un DSS dans le but de gérer les eaux de la rivière Colorado ; depuis cette date, RTI poursuit les développements et améliorations sur le système.

Dans l'état de présentation sur le web, le système mis au point permet à l'utilisateur d'analyser les données hydrologiques, d'allouer les ressources en eau et de lancer les modèles de simulation hydrologiques, d'étudier les effets de décisions éventuelles. Le CDSS inclut des applications permettant de modéliser les interactions entre la législation de la rivière et les conditions hydrologiques et de déterminer les capacités du système fluvial à satisfaire les futures demandes en tenant compte des critères hydrologiques, d'aménagement (réserve des barrages...) et administratifs.

Les scénarios qui peuvent être testés à l'aide du CDSS font intervenir diverses alternatives/hypothèses telles que échanges entre utilisateurs d'eau, construction de nouveaux réservoirs, prise en compte de nouveaux bénéficiaires, protection des espèces de poissons menacées...

En 1997, RTI a commencé la conversion du système entier de UNIX à des PC en utilisant Java. La conversion est maintenant terminée et de nouvelles applications ont été développées incluant l'outil de la Colorado Water Rights Administration (non décrit).

2.10. ADRESSE WEB [HTTP://GWRP.CCIW.CA/](http://gwrp.cciw.ca/) DERNIERE MISE A JOUR A DATE INCONNUE

serveur maintenu par le Groundwater Assessment and Restoration Project du National Water Research Institute of Environment Canada, situé au Canada Centre for Inland Water (Burlington, Ontario).

A l'adresse <http://gwrp.cciw.ca/expres.html>, on trouve la description du système expert EXPRES (Expert system for Pesticide Regulatory Evaluations and Simulations) pour l'évaluation de la contamination potentielle de l'eau souterraine par des pesticides.

La capacité d'expertise de EXPRES repose sur des bases de données extensives contenant de l'information sur les caractéristique physico-chimiques des pesticides (> 170) et sur les caractéristiques (agricoles, pédologiques, météorologiques, hydrologiques...) de 22 régions du Canada et l'utilisation de modèles chimiques tels

que LEACHM pour estimer le potentiel de contamination d'un aquifère dû à l'application d'un pesticide donné.

(Ce n'est pas un « vrai DSS », juste un système expert).

**2.11. ADRESSE WEB [HTTP://PUBLISH.UWO.CA/~JMALCZEW/GIDA.HTM](http://publish.uwo.ca/~jmalczew/gida.htm)
DERNIERE MISE A JOUR A DATE INCONNUE**

site du Journal of Geographic Information and Decision Analysis (JGIDA)

Ce journal est à parution semestrielle et 6 numéros sont disponibles à cette adresse, datés de juin 1997 à décembre 1999.

Les thèmes abordés incluent les *aspects théoriques, méthodologiques, philosophiques et algorithmiques de la conception et du développement de DSS basés sur de l'information géographique et sur les applications de ces systèmes à la planification agricole et rurale, à la gestion de l'environnement.* () et à la gestion des ressources en eau.

A noter que les articles sur le web ont des références biblio. papier qu'il faudrait peut-être se procurer.

Dans le numéro de juin 1997, on a retenu les 3 articles suivants :

a) A l'adresse : http://publish.uwo.ca/~jmalczew/gida_1/Reitsma/Reitsma.htm
Object-oriented simulation and evaluation of river basin operations (R. F. Reitsma et J.C. Carron, univ. of Colorado).

L'essentiel du propos des auteurs consiste en ceci :

les problèmes de planification des ressources environnementales sont complexes au sens où ils comportent des aspects non seulement techniques mais aussi organisationnels et sociopolitiques qui entretiennent entre eux des relations compliquées. Cette complexité fait que beaucoup de problèmes de gestion de l'environnement sont mal structurés ou mal définis ; la définition d'un problème bien-structuré étant, d'après les auteurs, la suivante :

- l'ensemble des actions alternatives est fini et identifiable,
- les solutions peuvent être déduites de façon consistente d'un modèle qui montre une bonne correspondance (avec le problème à traiter ?),
- l'efficacité des actions alternatives peut être évaluée numériquement.

Puisque les deux derniers critères sont des conditions nécessaires de la programmation multiobjectifs (*multiobjective programming*, cf § 4.2.), d'autres approches moins structurées telles que celles des DSS ont été développées.

Un DSS en environnement est en général construit autour de trois composantes principales :

- information sur l'état de la ressource à tout instant à travers des bases de données relationnelles et des SIG ainsi que des historiques (de la demande en eau, en énergie..., de la ressource),
- information sur les processus ou principes gouvernant le comportement de la ressource au cours du temps, à travers des modèles de simulation,
- outils d'évaluation tels que outils multicritères et *multiattribute preference models* qui s'appuient sur des fonctions « d'utilité » de type algébrique.

Bien que cette architecture conventionnelle procure une base de représentation des composants fonctionnels d'un DSS environnemental qui soit viable, elle pose des problèmes au niveau numérique en ce sens que les différents composants font appel à des logiciels qui utilisent les données de façon différente.

En conséquence, l'architecture traditionnelle d'un DSS est un ensemble de composants logiciels et de modèles de données reliés par une infrastructure complexe de « tuyaux » conducteurs de données.

Les inconvénients en sont évidents au niveau de la gestion des transferts de données entre modules et des coûts de maintenance élevés. De plus les fonctions d'utilité de type algébrique ne sont pas forcément adaptées pour représenter la réalité des intérêts en jeu.

Les hydrosystèmes comportant des rivières et des réservoirs de barrage sont naturellement modélisés comme un réseau d'entités discrètes.

Avec l'avancée récente des techniques de programmation orientée objet, il est beaucoup plus facile de manipuler ce genre de données en réseau ; de plus les objets qui représentent les différentes entités du réseau physique échantent de l'information entre eux qui peut être de type physique (flux d'eau en entrée ou en sortie) ou d'un autre type (socio-économique, organisationnel...).

Alors qu'auparavant des modèles de données et des structures de contrôle compliquées étaient nécessaires pour gérer à la fois l'état des systèmes et leur dynamique, l'orientation objet permet la mise au point de modèles où la maintenance des deux est assurée par les objets eux-mêmes plutôt que par une structure de contrôle supervisant l'ensemble.

Dans ces conditions, les éléments nécessaires à la construction d'un modèle de bassin de rivière sont les suivants :

- une collection d'objets génériques représentant les différents composants de la rivière (réservoir de barrage, usine hydroélectrique...)
- un interface utilisateur pour la construction interactive du réseau d'objets représentant la rivière comme un tout, le chargement des données, le lancement de l'exécution des modèles, l'examen des résultats...
- un composant de contrôle du processing en parallèle pour gérer la logistique des transitions d'états des objets et de l'échange d'information

- des données représentant l'état initial des objets
- des données représentant les conditions imposées au modèle (ex planning des relargages).

Ce type de modélisation orientée objet peut inclure l'évaluation et la gestion ; la distinction entre modélisation des processus physiques et modélisation de l'évaluation de la planification disparaît ; pendant que les objets effectuent des transitions d'états par échange d'information, ils calculent non seulement les nouveaux états physiques résultants mais aussi évaluent les fonctions d'utilité qui leur sont associées.

La modélisation des processus physique et l'évaluation du schéma de gestion sont réduits à de simples fonctions de transition d'état entre objets divers.

Un cas d'étude portant sur la rivière Colorado et ses aménagements est présenté.

b) A l'adresse : http://publish.uwo.ca/~jmalczew/gida_1/Tkach/Tkach.htm

A new approach to multi-criteria decision making in water resources (R. J. Tkash et S.P. Simonovic, univ. of Manitoba)

Ces auteurs restent attachés à l'utilisation de Méthodes de Décision Multi-Critères (MCDM) pour sélectionner la meilleure stratégie parmi un ensemble d'alternatives dans la planification et la gestion des ressources en eau.

Les critères de choix peuvent être soumis à une variabilité spatiale, le choix d'une solution pouvant avoir un impact positif ou négatif selon le lieu d'application. Or les techniques conventionnelles de MCDM ne permettent pas de tenir compte d'une distribution non uniforme des critères d'évaluation.

Le papier présente une technique de MCDM capable de tenir compte de cette variabilité grâce à l'utilisation d'un SIG ; cette technique est appelée SCP (spatial compromise programming).

L'analyse de stratégies de gestion des inondations dans la vallée de la Red River au Manitoba est présentée comme application de la méthode.

c) A l'adresse : http://publish.uwo.ca/~jmalczew/gida_1/Jankowski/Jankowski.htm

Design considerations for space and time distributed collaborative spatial decision making (P.J. Jankowski et M. Stasik, univ. of Idaho)

Idée de Spatial Understanding and Decision Support System (SUDSS) ou DSS accessible au public, accessible sous Internet ou indépendamment.

Un prototype devrait être développé et testé.

Les numéros postérieurs disponibles au moment des recherches ne comportent pas d'article intéressant ayant trait à l'hydrologie de surface ou à l'hydrodynamique.

**2.12. ADRESSE WEB : HTTP://DSS.CBA.UNI.EDU/TOUR/DSSTOUR.HTML
DERNIERE MISE A JOUR EN AVRIL 99**

« le DSS Web Tour », site de D.J. Power, professor of Information Systems and Management, univ. of Northern Iowa.

(N.B. nouvelle adresse en 2000 : <http://www.dssresources.com/tour>)

Le DSS Web Tour donne des informations sur les sites web traitant de DSS ainsi que les hyperliens pour s'y connecter. Il se décompose en plusieurs parties :

- sites web des compagnies industrielles
- sites web des universités et organismes de recherche
- cas d'études avec DSS
- DSS accessibles sur le web
- articles ayant trait aux DSS en ligne sur le web
- autres sites ayant trait aux DSS

- *Sites des compagnies industrielles* (<http://dss.cba.uni.edu/DJP/Companies.html>)

plus ou moins détaillés et précis selon qu'ils ont une mission réellement informative ou purement publicitaire. Une liste d'adresses est donnée ; il faut se connecter sur le site de chacun et passer pas mal de temps à chercher, parfois pour pas grand'chose. Ce n'est pas la peine d'aller voir quand l'auteur n'a ajouté aucun descriptif au nom du site. Beaucoup de sites orientés vers le business. Certains articles ne peuvent pas être téléchargés.

Un des plus dynamiques, d'après l'auteur du « Tour », est MicroStrategy dont la section DSS se trouve à l'adresse <http://www.microstrategy.com/busintell/Applications/dss.htm>.

- *Sites des universités* (<http://dss.cba.uni.edu/DJP/UniversityLinks.html>) d'après l'auteur, il y a beaucoup de chercheurs en DSS mais peu de sites ; une liste est donnée qui procure quelques articles en ligne et quelques outils. Il inclut certains des sites déjà visités par nous (Delft ...).

- *Site des cas d'études* (<http://power.cba.uni.edu/DJP/DSScatalog.html>) axé sur des exemples publics de DSS dans la littérature académique et sur un nombre restreint de sites web ; la plupart sont des prototypes ; le catalogue sera étendu pour inclure, en particulier, des générateurs de DSS. 18 exemples sont présentés brièvement qui ont trait à différentes disciplines, en particulier transports (aérien, routier, ferroviaire), affaires, gestion de stocks de magasin ; aucun dans le domaine de l'eau mais tout de même 3 en sciences de la terre : DIPMETER ADVISOR pour interpréter des logs de sondage et des mesures de conductivité et en tirer des conclusions sur les structures géologiques, GADS pour l'analyse de sonnées géoréférencées et PROSPECTOR pour aide à l'exploration minière.

- *Site des DSS accessibles sur le web* (<http://dss.cba.uni.edu/dss/online.html>) : aucun ne concerne les sciences de la terre ; certains sites ne sont pas accessibles.

- *Site des articles accessibles* (<http://dss.cba.uni.edu/isworld/dssarticles.html>).

- *Autres sites* (<http://power.cba.uni.edu/DJP/GeneralLinks.html>).

Cet ensemble de sites est énorme : il faudrait des jours pour l'explorer complètement.

Conclusions de l'auteur du « web tour » :

- le nombre de pages à visiter se chiffre en milliers et de nouvelles pages sont ajoutées chaque jour ; maintenir le site DSS Resources (<http://dss.cba.uni.edu/>) est une rude tâche,

- *c'est sur le web et nulle part ailleurs* qu'on trouve l'information sur les DSS aujourd'hui ; la plupart des vendeurs travaillent principalement avec le web.

En complément, on peut aussi visiter le site de ISworld Net à l'adresse <http://power.cba.uni.edu/isworld/dss.html> maintenu par diverses personnes dont le même D.J. Power.

3. Techniques numériques évoquées

Au chapitre 2, différentes techniques ont été évoquées ; dans ce chapitre, on va s'efforcer de les expliciter. Des compléments seront fournis au chapitre 4.2.

3.1. OPTIMISATION GLOBALE

Site à visiter <http://www.ihe.nl/hi/ietc.htm> (Hydroinformatics ressources cf § 1, dernière mise à jour en Février 1997). De ce site partent de nombreux liens intéressants :

- A l'adresse <http://solon.cma.univie.ac.at/~neum/glopt.html> on trouve un site sur les méthodes d'optimisation « globale » c'est-à-dire qui permettent de déterminer le meilleur (dans l'absolu) ensemble de conditions admissibles permettant d'atteindre un objectif. C'est la partie la plus difficile de la programmation non linéaire, elle s'oppose aux méthodes d'optimisation « locale » qui sont plus faciles mais ne permettent d'atteindre que des solutions optimales localement.

Le site contient des références sur les différentes techniques dont certaines ont été citées au § 2 et sur les codes existants correspondants, **certains dans le domaine public** et d'autres commercialisés, répartis entre « global optimization softwares » et « local optimization softwares »

- Une **description** des principales techniques référencées à l'adresse précédente est disponible sur le site des Sandia National Laboratories à l'adresse <http://www.cs.sandia.gov/opt/survey> (dernière mise à jour en Mars 1997), avec pour chaque technique

- un descriptif (overview),
- la description des domaines d'application,
- des exemples de logiciels,
- des références,
- des hyperliens.

Les techniques ainsi passées en revue sont les suivantes (on a gardé les termes anglais dont on ne connaît pas toujours la traduction française appropriée) :

- branch and bound, avec deux applications :
 - Mixed Integer Programming (MIP)
 - interval methods
- clustering methods
- evolutionary algorithms (genetic algorithms, evolutionary programming, genetic programming, voir aussi § 3.2.)
- hybrid methods, soit :
 - Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)
 - Tree annealing

- simulated annealing
- statistical methods (Bayesian approach)
- tabu search.

- Autre site intéressant, celui du Network-Enabled Optimization Center (NEOS) à l'adresse <http://www-fp.mcs.anl.gov/otc>.

La mission de ce centre est de faire connaître aux utilisateurs potentiels dans les administrations, l'industrie, la recherche, les techniques d'optimisation et de les mettre à leur disposition, grâce à l'internet.

Le NEOS se compose de 3 éléments :

- un *serveur* permettant de résoudre des problèmes d'optimisation à distance en utilisant le web, non plus seulement comme un moyen d'information mais aussi **comme un moyen de calcul** ; différents moyens d'interfaçage avec le serveur sont disponibles pour soumettre un problème d'optimisation et le faire calculer au NEOS ; différents solveurs sont disponibles dans les méthodes classiques (à l'exception des techniques récentes d'IA apparemment)
- un *guide* sur la technologie de l'optimisation comportant :
 - une description plutôt bien faite des *algorithmes* de résolution, à partir d'un arbre indiquant comment les méthodes se situent l'une par rapport à l'autre et avec pour chacune la formulation mathématique très lisiblement présentée (ce qui est loin d'être le cas général sur le web !)
 - une liste de *logiciels* existant dans le monde pour chaque méthode, en plus des solveurs accessibles par le serveur, avec description des conditions d'accès et du type de machine sur lesquels ils peuvent fonctionner
 - des *cas d'étude* montrant comment l'optimisation aide à résoudre des problèmes pratiques.
- des *outils numériques* (progiciels complets) **téléchargeables** sous réserve d'acquisition d'une licence pour les utilisateurs « commerciaux » ; cette page du site n'a pas l'air d'être régulièrement mise à jour ; pour le moment elle contient deux progiciels :
 - PCx qui est un progiciel de programmation linéaire basé sur une méthode prédicteur-correcteur (interior-point predictor-corrector linear programming package)
 - L-BFGS-B code basé sur une méthode quasi-Newton (limited-memory quasi-Newton code for large-scale bound-constrained or unconstrained optimization)

3.2. TECHNIQUES FAISANT APPEL A L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

• **Systemes experts** : (expert system = ES) ; nous utilisons ci-après une définition donnée par J.J. Seguin : « *Issus des recherches menées en Intelligence Artificielle, les systemes experts sont des applications exploitant les connaissances d'un domaine. Un Systeme Expert est caractérisé par :*

- *une base de connaissances constituée par des faits et des règles*
- *un programme permettant d'appliquer les règles aux faits dans un contexte donné : le moteur d'inférences.*

Pour chaque problème particulier, le moteur d'inférences doit extraire de la base de connaissances les éléments pertinents pour ce problème et doit les organiser en vue de le résoudre. L'expertise du domaine considéré doit être suffisamment formalisée pour qu'elle puisse être exploitée en tant que données par un moteur d'inférence. »

- La première génération des ES sont des systèmes fonctionnant à partir de règles (rules-based systems) souvent empiriques (heuristics, rules of thumb), couramment exprimées sous la forme de déclaration du type IF-THEN...Les règles en question peuvent être utilisées pour activer des bases de données ou des modèles numériques inclus dans le système informatique (on se rapproche alors d'un vrai DSS).
- La génération suivante des ES fait appel aux concepts récents de l'IA qui permettent à un système informatique d'apprendre à partir de son environnement et de reconnaître des schémas dans les données pour développer des règles ou des recommandations (pattern recognition, neural computing : cf ci-après). Les réseaux de neurones artificiels (ANN) permettent au logiciel de produire des règles « empiriques », sans intervention d'un expert humain.
- On utilise de plus en plus la logique floue (fuzzy logic) dans la conception des ES basés sur des règles empiriques, ce qui permet de prendre en compte ces règles à des degrés divers (de « pas du tout » à « complètement »).

• **Joint cognitive approach** : un « joint-cognitive » système est composé d'un preneur de décisions humain et d'un ensemble de ressources informatiques. Les tâches dans le processus de prise de décision peuvent être réparties en 2 catégories : celles qui requièrent une grosse puissance de calcul et celles qui requièrent un jugement humain. L'efficacité d'un DSS peut être renforcée par une allocation appropriée des ressources informatiques et humaines.

Iterative decision making : inhérente à l'approche « joint cognitive » ; en effet, peu de problèmes complexes peuvent être résolus en une seule fois ; le preneur de décisions peut donc procéder par essais et erreurs, à la fois pour avoir une meilleure perception du problème et mieux formuler ses hypothèses de travail afin d'arriver à un résultat satisfaisant.

• **Réseau de neurones** (neural network) : à l'adresse web <http://www.nd.com/index.html> se trouve le site de Neuro Dimension Inc. qui se prétend « leader in neural network software ».

Le principal produit s'appelle NeuroSolutions et c'est le produit de base de NeuroDimension. Ce logiciel combine une interface modulaire à base d'icônes avec l'implantation de procédures d'apprentissage avancées telles que la « recurrent backpropagation » et la « backpropagation through time ». On peut **en télécharger une version de démonstration gratuite** ; on peut aussi acheter le livre hypertexte interactif « Neural and Adaptive Systems: Fundamentals Through Simulations ».

La technologie des réseaux de neurones s'est développée par analogie avec les comportements neuro-biologiques, jusqu'à donner aux ordinateurs la capacité « d'apprendre » à partir des données entrées (cf ci-après : algorithme génétique).

Description : Les réseaux de neurones sont construits à partir d'un grand nombre d'éléments de calcul très simples qui traitent chacun une petite partie d'un plus vaste problème. Un élément (PE = Processing Element) multiplie une valeur d'entrée par une série de poids et effectue une transformation non linéaire sur le résultat avant sortie. La puissance du calcul neuronal vient de l'interconnection massive entre les PEs qui se partagent la charge de calcul et du caractère ajustable des paramètres de pondération. La structure la plus courante est appelée MLP (multilayer perceptron) où les PEs sont associés en couches successives ; la performance d'une telle architecture est mesurée à l'aide d'un critère d'écart entre la sortie et la réponse souhaitée. Un algorithme de rétroaction (backpropagation) est utilisé pour ajuster les poids petit à petit de façon à réduire l'écart. Le réseau est « entraîné » par répétition du processus un grand nombre de fois, afin d'arriver à une solution optimale.

Nous donnons en annexe 3 quelques références communiquées par J.J. Seguin, concernant les applications des réseaux de neurones aux domaines de l'hydraulique, de l'hydrologie et de l'hydrogéologie.

• **Algorithme génétiques** (GA) décrit à l'adresse web précédente et aussi à celle-ci : <http://gal4.ge.uiuc.edu/> site du IlliGAL ou Illinois Genetic Algorithm Laboratory (Prof. David Goldberg).

Les GA ont été développés à partir des années 1960 par J. Holland en tentant d'imiter les méthodes de l'évolution biologique par sélection naturelle. D'ailleurs, la solution à un problème est appelée « chromosome », lequel est constitué de « gènes » qui sont simplement les paramètres à optimiser. Cependant ces méthodes n'ont commencé à se développer qu'à la fin des années 1980.

Description : le concept en est simple :

- créer et maintenir une population de solutions (chromosomes) à un problème donné,
- sélectionner les meilleures solutions pour les recombinaison entre elles,
- utiliser leurs « descendants » pour remplacer les moins bonnes solutions.

La combinaison de la sélection « naturelle » et de l'innovation (par mutation et croisements) conduit généralement à des solutions améliorées.

Un cours est proposé à l'adresse <http://www.engr.uiuc.edu/OCEE/webcourses/ge485/>.

A l'adresse web <http://www.cs.colostate.edu/~genitor/> du groupe de recherche GENITOR de l'université du Colorado, possibilité de **télécharger des publications sur le sujet des GA.**

A l'adresse web <http://www.cs.iastate.edu/~gannadm/homepage.html> on trouve un site intitulé Genetic Algorithms and Neural Network, maintenu par le groupe de recherche en intelligence artificielle de l'université de l'Iowa et qui s'intéresse à une conception évolutive des réseaux de neurones (publications à télécharger, format PostScript).

A voir aussi le site <http://www.usnews.com/usnews/issue/980727/27evol.htm> et l'article « putting evolution to work on the assembly line », bon article de vulgarisation non dénué d'humour où on trouve en particulier des explications sur les différences entre « genetic algorithm » et « genetic programming », expliquées ci-après.

- **Programmation génétique** (genetic programming): alors que les algorithmes génétiques manipulent les « chromosomes » numériques, la PG permet aux programmes eux-mêmes d'évoluer.

La méthode a été inventée par J. Koza du Stanford Computer Center qui travaille sur un réseau de 70 micros tournant chacun à 533 Mhz, consiste à partir de « bribes » aléatoires de code que l'on laisse évoluer (comment ? non expliqué) et qui passe par des états « bizarres » non nécessairement logiques. D'après l'auteur, c'est parce que la programmation génétique n'est ni logique ni rigoureuse, imitant en cela l'évolution biologique et les errances de l'ADN, qu'elle arrive à des solutions « plus subtiles et souples » que celles écrites par un programmeur humain...(?)

3.3. DIVERS

A l'adresse web <http://www.cs.washington.edu/research/jair/home.html> site du Journal of Artificial Intelligence Research qui couvre tous les aspects de ce domaine, **on peut télécharger des publications en format PostScript et/ou PDF.**

D'autres sites, répertoriés comme intéressants par l'un ou l'autre des auteurs cités, par exemple D.J. Power, auteur du « DSS tour » (cf 2.12.) et dont certains ne sont pas ou plus maintenus ; on peut cependant les visiter pour glaner quelques informations complémentaires :

- DecisionNet , à l'adresse <http://www.heinz.cmu.edu/project/dnet/about.htm> censé concrétiser un effort en vue de la diffusion de DSS par le web ; non mis à jour depuis mai 1996 ;
- l'unité de recherche sur les DSS de l'université de Aalborg (au Danemark) à l'adress web <http://www.cs.auc.dk/research/DSS/profile.html>, qui s'intéresse à la théorie et aux méthodes de développement de DSS en prenant en compte une information incertaine ou partielle ; focalisation sur les systemes « normatifs » tels que les réseaux Bayésiens (Bayesian Networks ou Belief Networks) et diagrammes d'influence (Decision Networks ou Influence Diagrams) ; le site semble mis à jour régulièrement ;
- à l'adresse <http://www.sims.monash.edu.au/dsslab> le site du laboratoire de recherche sur les DSS de l'université de Monash (Australie) ; focalisation sur l'analyse des systemes ; dernière mise à jour en avril 1998 ;
- à l'adresse <http://www.ess.co.at> le site de ESS (Environmental Software & Services) compagnie autrichienne qui se présente comme un centre de recherche spécialisé dans le développement et l'implantation de systemes d'information environnementaux intégrés et de DSS « model-based » destinés à une large palette d'applications à la gestion/planification de l'environnement ; ses domaines de recherche sont axés sur les méthodes d'intelligence artificielle, l'analyse multicritère, l'optimisation des systemes complexes (dynamiques, fortement non linéaires...) ; elle a contribué à plusieurs projets de DSS tels que les différentes versions de WATERWARE (cf § 2.2.).

4. Etat de l'art dans le groupe BRGM

Au BRGM, on a commencé dès les années 70 à s'intéresser aux techniques permettant d'orienter le choix des « décideurs » en matière d'exploitation et d'aménagement des ressources en eau ; plusieurs logiciels d'optimisation ont même été développés (cf § 4.1. ci-après). Faute de demande de la part des clients potentiels, ces logiciels n'ont pas eu, malgré leur qualité, l'impact prévu et ont été peu utilisés.

Ce n'est qu'au cours des années 90 que l'intérêt pour ces techniques a été ravivé, au département Eau du BRGM et à ANTEA.

On présente aux paragraphes suivants un bref rappel historique (§ 4.1) et une synthèse sur les techniques/algorithmes utilisés (§ 4.2.). Les références sont listées en annexe 2.

4.1. HISTORIQUE

- De 1973 à 1976, développement par M. Vandenbeusch des logiciels OPPER, MAPPLI, PROLI, PLIBI pour la résolution de problèmes d'aménagement des eaux :
 - OPPER et PROLI : programmes d'optimisation linéaire pour l'implantation optimale de captages permettant l'extraction d'un débit maximal en respectant des limites extrêmes sur les rabattements admissibles en divers points d'un milieu poreux ; calculs en régime permanent et en 2D ; la version standard de PROLI (utilisant l'algorithme du Simplex), permettait la prise en compte de 50 variables et 50 contraintes ; approche par coefficients d'influence opposée à l'approche intégrée (cf § 4.2.) ;
 - MAPPLI : programme d'optimisation d'un problème exprimé sous une forme non linéaire aussi bien pour l'objectif que pour les contraintes, afin de prendre en compte des critères non seulement physiques (tels que débit maximal) mais aussi économiques (prix de l'eau) ; toutefois, la technique de résolution est basée sur une linéarisation du problème ;
 - PLIBI : programme d'optimisation linéaire permettant la prise en compte simultanée de 20 variables binaires, 20 variables réelles, 20 contraintes et une arborescence comportant 100 solutions ; destiné à résoudre les problèmes pour lesquels les coûts unitaires des ouvrages requis par le projet d'aménagement sont importants, l'investissement total devant être minimisé ;
- De 1992 à 1993 développement et tests de CAPUCINE par N. Courtois (prototype) et D. Thiéry :

- le logiciel CAPUCINE (CALcul de Pompages par Utilisation de Coefficients d'INfluence Exernes) est dans sa version 1.1., destiné à être utilisé en aval du code MARTHE pour l'optimisation des débits d'un champ captant ;
 - optimisation d'une fonction objectif unique qui est le bénéfice (différence entre le revenu produit par le débit extrait et le coût du pompage) tout en respectant des contraintes sur les rabattements calculés en divers points de la nappe ; en pratique dans la version 1.1., les contraintes peuvent s'appliquer à des niveaux piézométriques, à des débits d'échange entre la nappe et ses limites ou aux débits prélevés ;
 - programmation linéaire utilisant l'algorithme du Simplex et approche par coefficients d'influence (technique reprise de PROLI) ; en pratique, dans la version 1.1., les influences sont uniquement des débits pompés ou injectés dans la nappe ;
 - fonctionnement en 3D en régime permanent et transitoire ; prise en compte de correction de charge automatique dans les forages (liée au diamètre du forage et à la taille de la maille de calcul) ; prise en compte automatique des pertes de charge linéaires et quadratiques dans les forages ; prise en compte directe des coûts d'exploitation dus à l'énergie de pompage en fonction de la cote réelle de l'eau dans le forage et de la cote au sol ;
 - linéarisation du problème à traiter soit de façon analytique (possible seulement en régime permanent) soit de façon numérique ; méthode itérative et donc nécessité de partir d'une solution initiale « pas trop éloignée de la valeur optimale » ;
- En 1994, dans le cadre du projet S11 de la DR du BRGM, tests effectués par W. Treichel (ANTEA/EAU) sur le logiciel CAPUCINE et essais de variantes au niveau de l'algorithme de calcul ; ensuite, essais de couplage de MARTHE avec un optimiseur « efficace » dans le cadre d'une approche intégrée (cf § 4.2.) :
- d'une part, des tests d'algorithmes de programmation linéaire autres que celui du Simplex sont effectués en conservant la méthode des coefficients d'influence ; création de variantes de CAPUCINE et comparaison des résultats ; les algorithmes testés proviennent de deux sources différentes : la première est la bibliothèque HOPDM, recueil d'algorithmes basés sur la méthode de la barrière, encore appelée du point intérieur (cf § 4.2.) ; la seconde est la bibliothèque OSL d'IBM opérationnelle sur station RISC/6000 seulement ;
 - les résultats montrent que la méthode OSL est la plus rapide (mais utilisable sur un seul type de matériel), que la méthode HOPDM n'est pas très performante pour les matrices pleines, ce qui correspond aux cas testés et que donc finalement la méthode du simplex est la plus efficace pour le type de problèmes traités et sur le matériel disponible (stations DEC ALPHA) ;

- dans un deuxième temps, mise au point d'un programme couplant MARTHE avec un code d'optimisation faisant appel à la bibliothèque HOPDM déjà citée, dans une approche intégrée ; il s'agit d'un couplage « externe » par échange de fichiers entre les deux codes ; l'application de l'approche intégrée aux équations de MARTHE est détaillée dans le rapport ; des exemples d'application sont présentés pour des problèmes de gestion de nappes libres, multi-couches et en régime transitoire : les résultats sont commentés uniquement du point de vue de la convergence du processus d'optimisation (un peu aride) ; programme apparemment resté à l'état de prototype ;
- En 1995, étude d'un cas réel d'aménagement réalisé avec CAPUCINE, en partenariat avec la Lyonnaise des Eaux sur le site de Bordeaux (Thiery & al., 1995) et mise au point du système de gestion GRENAT (Gestion des Ressources en Eau des Nappes Aquifères en Transitoire) :
 - le domaine d'étude comporte 4 formations aquifères (Miocène, Oligocène, Eocène et Crétacé supérieur) ; la partie correspondant au champ captant de la Communauté Urbaine de Bordeaux a été modélisée avec des mailles de 500 m de côté (28 800 mailles sur une superficie de 525 km²) et calée avec MARTHE en régime permanent et transitoire sur 22 années d'historiques de charge (1971 à 1992) ;
 - une optimisation des débits prélevés dans 89 forages a été réalisée avec CAPUCINE dans différentes conditions afin de montrer l'impact de la prise en compte des pertes de charge et des corrections de diamètre des forages sur la répartition optimale des débits et sur le coût de l'énergie nécessaire ;
 - le système de gestion destiné à l'exploitant d'eau a été mis au point afin d'adapter les stratégies de prélèvements aux contraintes et objectifs liés à la ressource ; la mise en pratique de la gestion se fait par l'expression de consignes délivrées par le système et exploitables pour le pilotage du réseau de production et d'exploitation d'eau potable ; le système de gestion a été développé par le LIAC (Laboratoire d'Informatique Avancée de Compiègne) ; il intègre les coefficients d'influence calculés par MARTHE et le logiciel CAPUCINE.
- En parallèle, de 1992 à 1994, des recherches ont eu lieu au BRGM puis à ANTEA sur l'application des méthodes multi-critères multi-objectifs (cf § 4.2.) aux problèmes d'aménagement des ressources en eau ; une publication à WRR (El Magnouni & Treichel, 1994) résume les objectifs et résultats de ces recherches :
 - un modèle de calcul hydrodynamique aux éléments finis est incorporé dans un modèle d'aide à la décision à l'aide de l'approche intégrée (cf ci-dessus et § 4.2.) ; ceci permet en particulier de traiter les non linéarités liées aux aquifères libres de manière itérative ; le calcul est effectué dans le cas d'un aquifère libre monocouche hétérogène en régime permanent seulement ;
 - un problème de programmation linéaire multiobjectif est résolu à chaque itération, les 3 objectifs retenus étant : maximiser le débit total extrait, minimiser les coûts

d'opération et minimiser le risque de non atteinte des objectifs de prélèvement (du fait des incertitudes sur les paramètres physiques) ; les contraintes portent sur les charges, le gradient hydraulique, les débits, les vitesses d'écoulement (en direction et magnitude)... ;

- la formulation multicritère multiobjectif conduit à un ensemble de solutions « équivalentes » (ensemble de Pareto) ; ensuite, un modèle des « préférences » du preneur de décision est incorporé sous la forme d'une fonction d'utilité globale ; une des solutions trouvées par optimisation de cette fonction peut alors être retenue comme réalisant le meilleur compromis en fonction des critères choisis ;
- pour appliquer la méthodologie, brièvement résumée ci-dessus et décrite en détail dans la publication, au problème physique évoqué, les auteurs ont développé le logiciel ADAGES.

Ce logiciel, bien que resté à l'état de prototype du fait du départ de ses concepteurs qui ont tous deux quitté le groupe BRGM, doit toujours être disponible, avec ses sources, à ANTEA.

Nous donnons en annexe 4 quelques références communiquées par J.J. Seguin, concernant des exemples d'utilisation de l'aide multicritère à la décision au sein du groupe BRGM, en particulier à ANTEA.

4.2. DESCRIPTION DES TECHNIQUES UTILISEES ET HYPERLIENS EN RAPPORT

• *Optimisation monocritère*

C'est l'approche la plus simple de l'aide à la décision utilisée dans les logiciels du BRGM tels que OPPER, PROLI, MAPPLI, PLIBI et CAPUCINE dans toutes ses variantes. Elle permet de résoudre un problème d'aménagement en terme de maximisation (ou minimisation) d'une fonction objectif (le débit prélevable pour OPPER, le bénéfice pour CAPUCINE). On cherche à obtenir LE schéma d'aménagement optimal qui satisfasse toutes les contraintes en calculant un extremum de la fonction objectif.

Le transfert d'information entre le logiciel d'optimisation (linéaire, quadratique, non-linéaire ou mixte entière) et le code de calcul hydrodynamique qui simule le comportement du système aquifère peut se faire d'au moins deux façons qui ont toutes deux été tentées au BRGM

- a) l'approche des coefficients d'influence (encore appelée de la matrice des réponses unitaires) décrite ainsi par Treichel (1994) : *la méthode (...) utilise le principe de superposition et la théorie des systèmes linéaires pour décrire le comportement du système aquifère vis-à-vis des stress provoqués par les pompages et les injections. La méthode consiste à calculer d'abord la répartition des potentiels provoquée par un débit unitaire placé dans un endroit prévu pour un éventuel captage. Ensuite les calculs sont répétés autant de fois que le nombre*

d'emplacements envisageables, ce qui permet de construire la matrice, dite des réponses, qui lie les rabattements observés aux points de contrôle avec les débits pompés ou injectés. Le programme d'optimisation fonctionne alors en aval du modèle hydrodynamique (cas de CAPUCINE fonctionnant en aval de MARTHE). Cette méthode demande de respecter le principe de superposition et est donc bien adaptée aux problèmes linéaires

- b) l'approche intégrée (embedding method) décrite ainsi par Treichel (1994) : *elle consiste à intégrer directement le système d'équations linéaires, résultant de l'approximation des lois de comportement par les méthodes des éléments finis ou des différences finies, dans l'ensemble des contraintes d'un programme d'optimisation. (...) La méthode intégrée ne demande pas de simulations préliminaires et en plus elle donne la répartition des potentiels dans l'aquifère sans avoir à faire une simulation supplémentaire après l'optimisation. Les potentiels sont connus directement parce qu'ils sont des variables de décision dans le problème d'optimisation. Cette méthode permet aussi de traiter plus facilement des (problèmes) non linéaires. Cependant Thiéry (1993) fait remarquer que si le modèle hydrodynamique évolue par prise en compte de nouveaux phénomènes (...) l'optimiseur n'est plus opérationnel. Par ailleurs, Thiéry & al. (1995) notent que (cette approche) nécessite énormément de mémoire quand elle est couplée à des modèles hydrodynamiques 3D faisant intervenir plusieurs dizaines de milliers de mailles.*

Dans le cas d'un problème linéaire (ou linéarisable) les deux techniques de résolution les plus utilisées et testées toutes deux au BRGM (cf § 4.1.) sont les suivantes

- a) la méthode du Simplex : voir par exemple l'adresse web du site NEOS (cf § 3.1.) http://www-fp.mcs.anl.gov/otc/Guide/OptWeb/continuous/constrained/linearprog/section2_1_1.html pour une description détaillée ; c'est l'algorithme le plus ancien, le plus classique et le plus éprouvé ;
- b) les méthodes du point intérieur (ou de la barrière) : plus récentes, voir par exemple une description sur le site du NEOS à l'adresse http://www-fp.mcs.anl.gov/otc/Guide/OptWeb/continuous/constrained/linearprog/section2_1_2.html Les tests effectués sur CAPUCINE avec un algorithme basé sur cette méthode ont montré une meilleure performance de la méthode du simplexe pour les exemples traités (cf § 4.1.).

• **Méthodes multicritères multiobjectifs**

On serait là davantage dans le domaine de ce qu'on entend aujourd'hui par l'aide à la décision ; en effet, comme le font remarquer El Magnouni & Treichel (1994), le preneur de décision qui est confronté avec des problèmes pratiques de gestion des eaux souterraines doit en général prendre en compte plus d'un point de vue. Comme les objectifs de gestion, souvent multiples et conflictuels (débit maximum, coût minimum...etc) ne peuvent pas en réalité être aisément représentés par une fonction

objectif unique, les méthodes d'optimisation monocritère ne sont pas toujours aptes à traiter les problèmes de gestion des eaux.

Ce constat est probablement d'autant plus vrai lorsque les critères de décision et les contraintes à considérer font intervenir des facteurs autres que techniques (socio-économiques) comme cela est envisagé dans la mise au point de DSS au sens complet du terme.

Ces méthodes sont évidemment plus lourdes et plus complexes à mettre en oeuvre ; elles sont davantage pratiquées en Europe qu'aux Etats-Unis. Cependant on trouve quelques références aux USA ; les Américains l'appellent « multiobjective optimization » ou « multiobjective programming » (cf adresse web suivante déjà citée au § 3.1. <http://solon.cma.univie.ac.at/~neum/glopt/related.html#multi>).

On peut aussi visiter les sites suivants :

- <http://www.caam.rice.edu/~indra/NBIhomepage.html> qui traite de la méthode Normal-Boundary Intersection (NBI), une technique « nouvelle et prometteuse » pour résoudre les problèmes d'optimisation multicritère non-linéaires ; on peut **télécharger le code correspondant, gratuitement** ;
- <http://mijuno.larc.nasa.gov/dfc/mdo/moo.html> un descriptif général de l'optimisation multiobjectif avec des références ;
- <http://www.orc.ru/~pulsar/optim.html> un site russe sur les nouvelles technologies d'optimisation ;
- <http://nimbus.math.jyu.fi> site finlandais où est développé le système d'optimisation multiobjectifs NIMBUS **que l'on peut tester interactivement sur le web** ; le didacticiel semble assez clair, autant sur l'algorithme que sur la façon d'utiliser le logiciel.

Un des leaders européens dans le domaine de l'optimisation multicritère multiobjectif est le LAMSADE dont l'adresse web est <http://www.lamsade.dauphine.fr> et qui a mis au point les méthodes ELECTRE d'analyse multicritère, décrites à l'adresse <http://www.lamsade.dauphine.fr/logiciel.html>.

Nous insérons ci-après un texte communiqué par J.J. Seguin donnant une définition succincte ainsi que le champ d'application de l'aide multicritère à la décision :

« L'aide multicritère à la décision ou analyse multicritère (Multiple Criteria Decision Making) regroupe un ensemble de méthodes développées pour permettre à un décideur de progresser dans la résolution d'un problème où plusieurs points de vue, parfois contradictoires, sont à prendre en compte.

Dans ce type de problème il n'existe pas en général une solution qui soit la meilleure simultanément pour tous les points de vue. Il ne s'agit donc pas d'un problème d'optimisation au sens de la recherche d'une solution obtenue en minimisant ou en

maximisant une certaine fonction objectif. Dans ces méthodes, l'accent est mis sur le mot aide et sur l'interactivité.

De nombreuses méthodes sont disponibles, parmi lesquelles les méthodes ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) développées depuis une trentaine d'années par B. Roy de l'Université Paris Dauphine (il y a eu successivement ELECTRE I, II, III, IV et ELECTRE TRI). Ces méthodes sont utilisées depuis longtemps dans de nombreux domaines : localisation d'usines, tracé autoroutier, desserte ferroviaire, planification agricole, organisation de la production, procédures de recrutement,...

Dans le domaine de l'environnement ou de l'aménagement du territoire, où leur utilisation est plus récente, les méthodes ELECTRE sont particulièrement bien adaptées à des problèmes impliquant un choix, par exemple choix des sites les plus appropriés pour l'installation d'une décharge, choix d'un aménagement hydraulique (voir par exemple : Méthodes multicritères ELECTRE – Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale - L.Y. Maystre, J. Pictet, J. Simos – 1994 – Presses Polytechniques et Universitaires Romandes).

Les méthodes ELECTRE permettent de réaliser une véritable modélisation des préférences du décideur. L'intérêt de ces méthodes réside dans leur capacité à traiter des problèmes dans lesquels des points de vue contradictoires peuvent coexister. La méthode ELECTRE III par exemple permet de respecter au mieux toutes les nuances de l'information disponible en appliquant le " principe de la majorité des points de vue tempéré par un principe de respect d'une forte minorité éventuelle". Elle permet en outre de travailler avec les données brutes qui peuvent être à la fois qualitatives et quantitatives et de prendre en compte l'incertitude affectant ces données grâce à l'introduction de zones dites de préférence stricte, de préférence faible et d'indifférence. Elle autorise les situations d'ex-aequo et d'incomparabilité. Enfin, le classement réalisé est évalué à l'aide d'un degré de crédibilité. Toutefois, la méthode fonctionne encore avec un jeu de poids affecté aux différents critères mais leur influence reste réduite. La méthode ELECTRE IV quant à elle permet d'éviter le problème du choix d'un système de poids lorsqu'il apparaît difficile de juger l'importance relative des différents critères. »

Une description complémentaire est donnée dans une note interne BRGM non référencée et non datée intitulée « Eléments pour le rapport de l'étude de faisabilité du projet GO » par J.P. Sauty et J.J.Seguin. Une autre note, anonyme, (mai 1999 ?), intitulée « PRD 320 - Outil d'aide à la décision pour la gestion optimale de la ressource en eau - GO » fait état des nombreuses références acquises par BRGM/4S/EAU puis ANTEA dans ce domaine au cours des années 1990 (cf El Magnouni & Treichel, 1994) et rappelées plus haut (§ 4.1.).

On trouve en plus à l'adresse <http://www.lamsade.dauphine.fr/appli/welcome.html> une présentation de l'expérimentation en contexte réel dans différents domaines d'application, des méthodes mises au point au LAMSADE. Le rapport scientifique de 1995 mentionne les contacts avec le groupe BRGM :

- *Les travaux entrepris depuis plusieurs années dans le domaine de l'eau se poursuivent. Les relations avec ANTEA (Groupe BRGM) se sont maintenues par l'intermédiaire de Samir EL MAGNOUNI. Celui-ci, en collaboration avec Lucien DUCKSTEIN (Professeur à l'Université de Tucson, Arizona, USA), qui a séjourné au LAMSADE en 1992 grâce à un poste rouge CNRS, et Wiktor TREICHEL, a comparé différentes méthodes multicritères sur un problème de gestion des eaux souterraines.*

Le résumé des travaux de Duckstein, Treichel & El Magnouni se trouve à l'adresse web suivante <http://www.lamsade.dauphine.fr/resumes/rescah.html> (cahier 114).

4.3. CONCLUSION

Concernant l'optimisation monocritère, on constate que le BRGM dispose d'une pratique en programmation (essentiellement linéaire) et d'un code opérationnel CAPUCINE connectable à MARTHE par la méthode des coefficients d'influence, et utilisant actuellement l'algorithme du Simplex (tout autre algorithme plus performant pouvant être ajouté ou substitué sans difficulté, d'après l'auteur).

Pour ce qui est de l'usage des méthodes multicritères, le groupe BRGM, en particulier ANTEA, a également une pratique de programmation multiobjectif et un certain nombre de contacts auprès des spécialistes (tels que le LAMSADE) ; le départ de plusieurs personnes ayant travaillé avec ces méthodes laisse planer un doute sur la possibilité de récupérer le savoir-faire acquis par le passé dans ce domaine. Cependant, nous n'avons pas pris contact avec ANTEA afin de vérifier ce point.

Conclusion générale

Une recherche systématique sur le Web menée de Juillet à Octobre 1999 a montré que le thème de l'Aide à la Décision (Decision Support System en anglais) dans le domaine de l'eau en général est en forte expansion depuis 4 ans.

Au terme de cette recherche, il s'avère pourtant que peu de références correspondent réellement à nos domaines d'intérêt, même en incluant les ressources en eau de surface en plus des eaux souterraines.

Cependant, et même si le terme de DSS recouvre des réalités extrêmement variables allant d'un simple SIG à un système basé sur un algorithme génétique, les références répertoriées comportent des informations intéressantes quoique différentes selon les cas : architecture du système, algorithme et méthode utilisée, détails sur le(s) logiciel(s) utilisés, exemples d'application... mais rarement toutes ces informations à la fois.

En particulier, le couplage des outils de modélisation des phénomènes physiques aux autres outils (décrivant les processus de prise de décision) est rarement décrit explicitement, excepté pour des cas simples d'optimisation monocritère. Or, cette information était probablement la plus intéressante à recueillir dans le cadre de cette étude.

Il est parfois possible de télécharger des versions de démonstration ou des exemples d'application, ce que nous n'avons pas pu faire dans le cadre de cette recherche ; cependant, les possibilités sont clairement indiquées dans le rapport, au fur et à mesure de la description.

Certains sites sont « actifs » c'est-à-dire mis à jour régulièrement ; d'autres ont été créés à une date donnée avec parfois un programme ambitieux affiché et ne sont plus mis à jour : on peut se demander pourquoi : obstacles rencontrés dans la recherche, en particulier sur le développement de DSS avancés basés sur les techniques d'intelligence artificielle ou bien volonté de ne plus diffuser les résultats sur le net ? Il nous semble qu'il faut faire attention aux phénomènes de « mode » qui semblent avoir attiré bon nombre de chercheurs...

Enfin, on a dans la mesure du possible explicité les méthodes et algorithmes évoqués au cours de la recherche sur le web, ainsi que ceux qui ont déjà été utilisés dans le groupe BRGM ; certains sont à notre portée comme les techniques d'optimisation monocritère ou multicritère, d'autres comme certaines techniques avancées d'IA ne relèvent pas, à notre avis, des compétences disponibles au BRGM.

Annexes

A1 - GLOSSAIRE

extrait de celui de D.J. Power à l'adresse <http://www.dssresources.com/glossary/>

(On a gardé le texte anglais pour plus de précision dans les définitions.)

Business Intelligence - BI is a popularized, umbrella term introduced by Howard Dresner of the Gartner Group in 1989 to describe a set of concepts and methods to improve business decision making by using fact-based support systems. The term is sometimes used interchangeably with briefing books and executive information systems. A Business Intelligence System is a DSS.

Data-driven DSS or Data-oriented DSS - This type of DSS emphasizes access to and manipulation of a time-series of internal company data and sometimes external data. Simple file systems accessed by query and retrieval tools provide the most elementary level of functionality. Data warehouse systems that allow the manipulation of data by computerized tools tailored to a specific task and setting or by more general tools and operators provide additional functionality. Data-driven DSS with On-line Analytical Processing (OLAP) or data mining tools provide the highest level of functionality and decision support that is linked to analysis of large collections of historical data. Early, very limited versions of data-driven DSS were called Retrieval-Only DSS by Bonczek, Holsapple and Whinston (1981).

Data Mining - A class of analytical applications that search for hidden patterns in a data base. Data mining is the process of sifting through large amounts of data to produce data content relationships. This is also known as data surfing. Data mining tools use a variety of techniques including case-based reasoning, data visualization, fuzzy query and analysis, and neural networks. Case-based reasoning tools provide a means to find records similar to a specified record or records. These tools let the user specify the "similarity" of retrieved records. Data visualization tools let the user easily and quickly view graphical displays of information from different perspectives. Check the data mining FAQ at <http://www.rpi.edu/~vanepa2/faq.html>

Data Warehouse - A database designed to support decision making in organizations. It is batch updated and structured for rapid online queries and managerial summaries. Data warehouses contain large amounts of data. A data warehouse is a subject-oriented, integrated, time-variant, nonvolatile collection of data in support of management's decision making process. Check "What is a Data Warehouse" by W.H. Inmon at http://www.cait.wustl.edu/cait/papers/prism/vol1_no1/. According to Ralph Kimball "A data warehouse is a copy of transaction data specifically structured for query and analysis" (see Kimball, R. The Data Warehouse Toolkit: Practical Techniques for Building Dimensional Data Warehouses. 1996. Also, see Greenfield, L. A Definition of Data Warehousing.)

Decision Support Systems (DSS) (Systèmes d'Aide à la Décision) are interactive computer-based systems intended to help decision makers utilize data and models to identify and solve problems and make decisions. The "system must aid a decision maker in solving unprogrammed, unstructured (or "semistructured") problems...the system must possess an interactive query facility, with a query language that ...is ...easy to learn and use (Bonczek, Holsapple & Whinston, 1981; p. 19)". DSS help managers/decision makers use and manipulate data; apply checklists and heuristics; and build and use mathematical models. According to Turban (1990), a DSS has four major characteristics: DSS incorporate both data and models; they are designed to assist managers in their decision processes in semistructured (or unstructured) tasks; they support, rather than replace, managerial judgment; and their objective is to improve the effectiveness of the decisions, not the efficiency with which decisions are being made

DSS Generator - Computer software package that provides tools and capabilities that help a developer quickly and easily build a specific Decision Support System (cf., Sprague and Carlson, 1982, p. 11). Excel is an example of a DSS Generator. Many companies market tools for building DSS and EIS, see [DSS Companies](#) page.

Enterprise-wide DSS - A DSS that supports a large group of managers in a networked client-server environment with a specialized data warehouse as part of the DSS architecture.

Executive Information Systems (EIS) - A computerized system intended to provide current and appropriate information to support executive decision making for managers using a networked workstation. The emphasis is on graphical displays and an easy to use interface that present information from the corporate database. They are tools to provide canned reports or briefing books to top-level executives. They offer strong reporting and drill-down capabilities.

Executive Support Systems (ESS) - An executive information system (EIS) that includes specific decision aiding and/or analysis capabilities.

Expert Systems are man-machine systems with specialized problem-solving expertise. The "expertise" consists of knowledge about a particular domain, understanding of problems within that domain, and "skill" at solving some of these problems.

Graphical User Interface (GUI) - A program interface that uses a computer's graphics capabilities to make the program easier to use. Graphical interfaces use a pointing device to select objects, including icons, menus, text boxes, etc. A GUI includes standard formats for representing text and graphics.

Group Decision Support Systems (GDSS) - An interactive, computer-based system that facilitates solution of unstructured problems by a set of decision-makers working together as a group. It aids groups, especially groups of managers, in analyzing problem situations and in performing group decision making tasks.

Knowledge Engineering (KE) - The engineering discipline that involves integrating knowledge into computer systems in order to solve complex problems normally requiring a high level of human expertise.

Knowledge Management (KM) - KM is the distribution, access and retrieval of unstructured information about "human experiences" between interdependent individuals or among members of a workgroup. Knowledge management involves identifying a group of people who have a need to share knowledge, developing technological support that enables knowledge sharing, and creating a process for transferring and disseminating knowledge.

Knowledge Management Software (KMS) - Software that can store and manage unstructured information in a variety of electronic formats. The software may assist in knowledge capture, categorization, deployment, inquiry, discovery, or communication. Products include electronic document management systems (EDMS). Visit [KMWorld](#).

Metadata or Meta Data - Data about the data in a data warehouse. Metadata provides a directory to help the DSS locate the contents of the data warehouse; it is a guide to mapping data as it is transformed from the operational environment to the data warehouse environment; and it serves as a guide to the algorithms used for summarization of current detailed data. Metadata is semantic information associated with a given variable. Metadata must include business definitions of the data and clear, accurate descriptions of data types, potential values, original source system, data formats, and other characteristics. Metadata defines and describes business data. Examples of metadata include data element descriptions, data type descriptions, attribute/property descriptions, range/domain descriptions, and process/method descriptions. The repository environment encompasses all corporate metadata resources: database catalogs, data dictionaries, and navigation services. Metadata includes things like the name, length, valid values, and description of a data element. Metadata is stored in a data dictionary and repository. It insulates the data warehouse from changes in the schema of operational systems.

Model-driven DSS or Model-oriented DSS - This type of DSS emphasizes access to and manipulation of a model, e.g., statistical, financial, optimization and/or simulation. Simple statistical and analytical tools provide the most elementary level of functionality. Some OLAP systems that allow complex analysis of data may be classified as hybrid DSS systems providing both modeling and data retrieval and data summarization functionality. Data mining is also a hybrid approach to DSS. In general, model-driven DSS use complex financial, simulation, optimization and/or rule (expert) models to provide decision support. Model-driven DSS use data and parameters provided by decision makers to aid decision makers in analyzing a situation, but they are not usually data intensive, that is very large data bases are usually not need for model-driven DSS. Early versions of model-driven DSS were called Computationally Oriented DSS by Bonczek, Holsapple and Whinston (1981).

Multi-dimensional Database (MDBS and MDBMS) - A database that lets users analyze large amounts of data. An MDBS captures and presents data as arrays that can

be arranged in multiple dimensions. Variables are the objects that hold data in a multidimensional database. These are simply arrays of values (usually numeric) that are "dimensioned" by the dimensions in a database. For example, a UNITS variable may be dimensioned by MONTH, PRODUCT, and REGION. This three-dimensional variable or array is often visualized as a cube of data. Multi-dimensional databases can have multiple variables, with common or a unique set of dimensions. This multi-dimensional view of data is especially powerful for OLAP applications.

On-line Analytical Processing (OLAP) - Software for manipulating multidimensional data from a variety of sources that has been stored in a data warehouse. The software can create various views and representations of the data. OLAP software provides fast, consistent, interactive access to shared, multidimensional data. Check the Guide to OLAP Terminology from the OLAP Council

Organizational DSS - A multiparticipant DSS designed to support a decision maker in a setting that has a more elaborate infrastructure than a group (i.e., involving specialized roles, restricted communication patterns, differing authority levels). See enterprise-wide DSS.

ROMC (Representation, Operations, Memory Aids, Mechanism Control) Design Approach - A Systematic approach for developing large-scale DSS, especially user interfaces. It is user-oriented approach for stating system performance requirements (cf., Sprague and Carlson, 1982).

Systems Development Life Cycle (SDLC) - A process by which systems analysts, software engineers, programmers, and end-users build systems. It is a project management tool, used to plan, execute, and control systems development projects. The steps in the cycle include: 1) Determine user requirements; 2) Systems analysis; 3) Overall system design; 4) Detailed system design; 5) Programming; 6) Testing; and 7) Implementation. Each step is concluded by developing a written document that must be reviewed and approved before the next step begins.

Web-based DSS - A computerized system that delivers decision support information or decision support tools to a manager or business analyst using a "thin-client" Web browser like Netscape Navigator or Internet Explorer. The computer server that is hosting the DSS application is linked to the user's computer by a network with the TCP/IP protocol. In many companies, a Web-based DSS is synonymous with an enterprise-wide DSS that is supporting large groups of managers in a networked client-server environment with a specialized data warehouse as part of the DSS architecture.

A2 – REFERENCES DU CHAPITRE 4

- ALTMAN A. & GONDZIO J. (1993) – HOPDM : a higher order primal-dual method for large scale linear programming. *European Journal of Operational Research*, 66, 158-160.
- COURTOIS N. (1993) - Couplage simulation/optimisation. Réalisation d'un programme prototype. *Note technique BRGM n° 93 EAU 23*.
- EL MAGNOUNI S. & TREICHEL W. (1994) – A multicriteria approach to groundwater management. *Water Resources Research*, 30, (6), pp 1881-1895.
- IBM (1992) – Optimization subroutine library. Guide and reference. Release 2.
- THIERY D. (1993) - Optimisation des champs captants. Le logiciel CAPUCINE. Principes et domaine d'application. *Rapport BRGM R 37811*.
- THIERY D., SCHWARTZ J., BERGE J., FOTOOHI F., KONSTANTOPELOS K., LAMBERT M. (1995) – Un système d'aide à la gestion des ressources en eaux souterraines. Application au site de Bordeaux. *Hydrogéologie, n° 1, pp 129-139*.
- TREICHEL W. (1994) – Couplage simulation/optimisation par l'approche intégrée. Quelques tests sur CAPUCINE. *Rapport ANTEA A 01441*.
- VANDENBEUSCH M. (1973 a) - Informatique hydrogéologique. Implantation optimale de captages. Programme OPPER, Orléans, BRGM. *Rapport inédit 73 SGN 161 AME*.
- VANDENBEUSCH M. (1973 b) - Informatique hydrogéologique. Gestion des ressources. Programme d'optimisation PROLI, Orléans, BRGM. *Rapport inédit 73 SGN 443 AME*.
- VANDENBEUSCH M. (1976) - Prise en compte des principaux facteurs hydrodynamiques et économiques. Présentation des programmes MAPPLI et PLIBI, Orléans, BRGM. *Rapport inédit 76 SGN 528 AME*.

A3 – REFERENCES CONCERNANT LES APPLICATIONS DES RESEAUX DE NEURONES (D'APRES J.J. SEGUIN)

• En hydraulique :

Utilisation d'un réseau neuronal pour l'étude de la propagation d'une onde de crue dans un canal. Journal of Hydraulic Research, Vol 31, 1993, n°2

Prévision des consommations d'eau de la banlieue parisienne par la technique des réseaux de neurones. L'eau, l'industrie, les nuisances – N° 155, Mai 1992.

• En hydrologie :

ils s'avèrent plus performants que les méthodes classiques (modèles conceptuels ou modèles ARMA, ARIMA,...) pour la restitution de situations extrêmes et dans des zones climatiques arides ou semi-arides. Ils possèdent un meilleur pouvoir prévisionnel, leur force résidant dans leur capacité de généralisation.

Modélisation de la relation pluie-débit à l'aide des réseaux de neurones artificiels : Revue des Sciences de l'Eau n°3 - 1996

Drought estimation with neural networks. Advances in Engineering Software - Vol 18, 1993

Prévision des crues turbides : apport des méthodes neuronales aux démarches classiques sur l'exemple du forage d'Yport (77) . TSM n°2, 1994

• En hydrogéologie :

ils ont été utilisés

- pour l'interprétation des pompages d'essai :

A neural network approach to the determination of aquifer parameters. Ground Water Vol 30 n°2 - 1992 ,

- pour des problèmes plus complexes d'optimisation sous contraintes :

Optimization of groundwater remediation using artificial neural networks with parallel solute transport modeling - Water Resources Research Vol 30 n°2, 1994 ,

- en combinaison avec d'autres techniques pour estimer les paramètres hydrodynamiques d'un aquifère :

Characterization of aquifer properties using artificial neural networks : neural kriging - Water Resources Research Vol 30 n°2, 1994.

Voir aussi : *Solving problems in Environmental Engineering and Geosciences with artificial neural networks* F.U. Dowla, L. Rogers, MIT Press 1995)

A4 – REFERENCES CONCERNANT LES APPLICATIONS DE L'ANALYSE MULTICRITERE AU SEIN DU GROUPE BRGM (D'APRES J.J. SEGUIN)

• Schémas d'aménagement des eaux

De 1988 à 1991 dans le cadre de travaux portant sur les Schémas d'Aménagement des Eaux, financés par la Recherche Scientifique du BRGM, une réflexion a été menée au département Eau sur l'apport de l'analyse multicritère dans le choix du scénario d'aménagement satisfaisant au mieux tous les critères en jeu (M. Stein, 1989 - *Plans directeurs et schémas d'aménagement des eaux - Guide méthodologique* - Rapport BRGM R 30452).

La méthode ELECTRE III a été appliquée au cas du Schéma d'Aménagement des Eaux du département d'Indre et Loire avec 15 scénarios d'aménagement et 9 critères (techniques, socio-politiques, économiques et financiers) :

Application de l'aide à la décision au schéma d'aménagement des eaux de l'Indre et Loire. M. Stein, R. Stemplowski - Note technique 91 EAU 4S 002 - 1991

Ce travail a fait aussi l'objet d'un DEA :

Application de l'aide à la décision aux schémas d'aménagement des eaux –
R. Stemplowski -1990 (BRGM et Université Paris Dauphine).

• Etudes environnementales

De 1994 à 1997 au sein du groupe BRGM, les méthodes ELECTRE ont été utilisées dans le cadre d'études environnementales, en particulier pour la hiérarchiser des sites pollués .

Aide multicritère à la décision et hiérarchisation de sites pollués . Etude pilote .
Rapport ANTEA 00822.

Hiérarchisation d'une centaine de stations service en fonction des dangers liés à la pollution du sous-sol . Rapport ANTEA 03159

Application de ELECTRE III à la hiérarchisation de dix sites potentiellement pollués. Rapport ANTEA 03307

Contribution à la validation de la méthode nationale d'évaluation et de classement des sites pollués. Rapport ANTEA 05065

Un guide méthodologique a également été rédigé :

Analyse multicritère pour le classement et la hiérarchisation – Guide méthodologique. S. El Magnouni, 1997 . Rapport ANTEA 08274

• **Cartographie décisionnelle**

Dans le domaine de la cartographie décisionnelle, une étude pilote a été réalisée par ANTEA pour le compte du BRGM sur le thème de la vulnérabilité des nappes à la pollution (S. El Magnouni, 1997 – *Cartographie décisionnelle – Application de méthodes multicritères de type ELECTRE (étude pilote)*. Rapport ANTEA A 08276).

La méthode ELECTRE TRI, dédiée aux problèmes d'affectation (de répartition des actions dans des ensembles pré-définis) a été utilisée et comparée aux résultats obtenus avec la méthode DRASTIC (qui agrège par somme pondérée tous les critères en un critère unique).

BRGM
Service Reprographie
Impression et façonnage

BRGM
SERVICE EAU
EAU/M2H

BP 6009 - 45060 ORLEANS Cedex 2 - France - Tél. : (33) 02.38.64.34.34