

PERSPECTIVES POUR LE DEVELOPPEMENT :

LES NOUVEAUX OUTILS DE RECHERCHE ET LA FORMATION AUX NOUVELLES TECHNOLOGIES

Synthèse effectuée par :

BARRAT Jean-Michel
DEPRAETERE Christian
RANDRIANANDRAINA Noëlle
RASOAVAHINY Justine
RINIE Elisabeth

I. LES NOUVELLES TECHNOLOGIES FACE AUX NOUVEAUX DEFIS

1. RESSOURCES EN EAU, LES NOUVEAUX DEFIS

- 1.1. Instabilité du climat (non stationnarité de la pluie)
- 1.2. Accroissement, modification et diversification rapide des besoins
- 1.3. Détérioration de la qualité des eaux

2. LA REPONSE DES NOUVELLES TECHNOLOGIES

II. EXPOSES SUR LES NOUVELLES TECHNOLOGIES

1. LES NOUVEAUX CAPTEURS

- 1.1. Télétransmission de données hydrologiques par ARGOS et METEOSAT
- 1.2. Télédétection satellitaire, la "vérité" venue du ciel

2. BASES DE DONNEES ET SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

- 2.1 Base de données hydrogéologiques de Madagascar
- 2.2. Bases de données cartographiques et Agences de l'eau : exemple de la collaboration entre l'Institut Géographique National et les Agences de l'eau en France.

3. MODELISATION

4. SYSTEMES D'AIDES A LA DECISION ET SYSTEMES EXPERTS

III. FORMATION ET DIFFUSION DES NOUVELLES TECHNOLOGIES A MADAGASCAR

1. LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE AU CENTRE NATIONAL DE TELEDETECTION ET D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE : UN OUTIL AU SERVICE DU DEVELOPPEMENT.

1.1. Introduction

1.2. Filières de collecte et d'intégration des données

1.3. Les matériels employés

1.3.1. Les différentes gammes d'ordinateurs

1.3.2. Les périphériques de saisie

1.3.3. Les périphériques de sortie

1.3.4. L'utilisation d'un réseau de communication

1.4. Méthodes et outils

1.4.1. Saisie externe

1.4.2. Saisie interne

1.4.3. Assurance - Qualité

1.5. Le CNTIG et ses partenaires

1.5.1. Missions du CNTIG

1.5.2. Equipements

1.5.3. Relations avec ses partenaires

1.6. L'avenir

1.6.1. Pour la technologie

1.6.2. A Madagascar

1.7. Conclusions

2. NOUVELLES TECHNOLOGIES ET FORMATION CONTINUE : LE CAS DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE A MADAGASCAR

IV. SYNTHESE ET RECOMMANDATIONS

1. SYNTHESE

2. RECOMMANDATIONS

2.1. Recommandations techniques

2.2. Recommandations sur la formation

INTRODUCTION

Face aux nouveaux défis que posent l'évaluation et l'exploitation des ressources en eaux, en particulier dans les Pays en voie de Développement (PVD), les nouvelles technologies offrent un arsenal de techniques et de méthodes permettant de solutionner, du moins partiellement, des problèmes qui apparaissent à la fois de plus en plus complexes et de plus en plus urgents.

I. LES NOUVELLES TECHNOLOGIES FACE AUX NOUVEAUX DEFIS

I.1. RESSOURCES EN EAU, LES NOUVEAUX DEFIS

I.1.1. Instabilité du climat (non stationnarité de la pluie)

Les hydrologues ont considéré jusqu'alors le climat, et en particulier la pluie, comme une constante climatique à l'échelle de temps de quelques décennies. Une période dite "normale" de 30 années de relevés pluviométriques était considérée comme suffisante pour donner une représentation fidèle de la variabilité interannuelle. Les bouleversements climatiques actuels, en particulier la sécheresse au Sahel, ont remis en cause cette vision fixiste de la ressource primaire : la pluie.

En fait, le système climatique global de notre planète apparaît comme éminemment instable. Les satellites d'observation de la Terre ont révélé que des phénomènes locaux peuvent avoir des conséquences globales, capables de créer des "accidents" climatiques en divers lieux de la planète. Tel est le cas du phénomène "*el Nino*".

Le phénomène "*el Nino*" qui se manifeste par une modification des courants océaniques dans le Pacifique intertropicale, affecte l'ensemble des climats de la planète. En 1982-1983, par exemple, une sécheresse catastrophique et "rare" affecte une partie de l'Australie, de l'Indonésie, des Philippines, du Mexique, du Sri-Lanka et du Sud de l'Inde alors que ce sont de "vrais déluges" qui se sont abattus sur la Californie, le sud-ouest aride des Etats-Unis, la Louisiane, la Floride et Cuba.

Le satellite GEOSAT, lancé en 1985, a pu scruter le petit Nino de 1986-1987 et a permis de constater que cela se traduit par une modification de la pente du Pacifique. Cet exemple illustre l'intérêt des nouveaux capteurs sur le diagnostic de fonctionnement global du climat de la planète. Le Nino de 1991-1992 est celui qui a été le mieux étudié et le mieux surveillé. Couplés à des réseaux de mesures au sol de plus en plus précis, ces "yeux de l'espace" devraient permettre de mieux comprendre les "accidents" climatiques observés de par le monde. On peut penser que l'accident climatique sec que subit actuellement le Sud malgache n'est qu'un aspect régional de l'instabilité globale du climat

planétaire. Les causes n'étant pas locales, il apparaît nécessaire de développer des modèles climatiques globaux qui seuls seront capables d'appréhender la complexité des interactions à l'échelle planétaire.

Les précipitations apparaissent donc comme éminemment instables. Les moyennes interannuelles doivent davantage être considérées comme des abstractions statistiques que comme des réalités climatiques. La pluie n'est plus conçue comme un phénomène stationnaire, présentant certes une variabilité interannuelle, mais stable à des échelles de temps historiques. Force nous est de constater que cette ressource peut être affectée, soit par des accidents climatiques, soit d'une variation tendancielle, soit par les deux à la fois. On mesure mal encore actuellement les conséquences directes ou indirectes que pourrait avoir la poursuite du réchauffement de la Terre (effet de serre) ou la disparition de la couche d'ozone sur les ressources en eaux.

I.1.2. Accroissement, modification et diversification rapide des besoins

En 1991, on estimait que les besoins en eaux de l'humanité avaient été multipliés par 30 depuis trois siècles. Ces besoins devraient encore augmenter de 30 à 35 % d'ici l'an 2000. Les PVD, en particulier en Afrique, sont confrontés à une urbanisation rapide qui se traduit par des besoins en eaux qui ne peuvent être assurés localement. Ce fait suppose la réalisation d'adductions d'eau que les institutions nationales ou régionales ne peuvent assurer faute de moyens techniques et financiers. Enfin, l'extension des activités industrielles et touristiques et du mode de vie urbain vient concurrencer les demandes traditionnelles de l'agriculture, ce qui peut créer des situations conflictuelles nécessitant la définition de priorités. Ces tendances fortes supposent une évaluation et une gestion de plus en plus rationnelle des ressources en eau, et ceci même dans les régions où la ressource n'apparaît pas encore comme un facteur limitant pour le développement.

Tel est le cas de Madagascar. La Grande Ile bénéficie de ressources en eau importantes : 1500 mm/an de pluies en moyenne sur le territoire, chiffre que l'on peut comparer aux 500 mm de l'Afrique du Sud. Cela représente une disponibilité $250 \text{ m}^3/\text{jour}^{-1}/\text{hab}^{-1}$, ce qui, au regard du reste de l'Afrique est un cas extrêmement favorable. Ce chiffre doit bien évidemment être relativisé : les pluies peuvent être trop abondantes et, de bienfaits devenir des nuisances, voire des catastrophes; elles peuvent également être insuffisantes ou mal réparties dans le temps, enfin elles peuvent s'avérer trop "sales" pour pouvoir être utilisées. Derrière ce chiffre global favorable se cachent donc les problèmes classiques auxquels sont confrontés les hydrologues : trop d'eau ici, pas assez là, trop sale ailleurs. Madagascar est assez typique de cet état de fait : la côte est affectée par les cyclones, le Sud souffre de la sécheresse, enfin sur une large part du territoire, l'érosion transforme les rivières en torrens de boue.

Les zones où les pluies sont inférieures à 500 mm ne représentent que 5% du territoire. Pourtant la sécheresse qui affecte actuellement cette zone montre, pour qui en douterait, que les problèmes de ressources en eaux de ces marges arides peuvent devenir un problème national.

L'établissement d'un schéma directeur d'aménagement des eaux doit être basé sur une connaissance précise de la ressource, y compris de sa variabilité. Elle suppose une définition dans le long terme des objectifs. Seule une telle démarche est capable d'offrir une solution globale et viable : la sécheresse dans le Sud n'est pas conjoncturelle et requiert une solution durable pour la gestion des ressources en eaux de cette région.

1.1.3. Détérioration de la qualité des eaux

La détérioration de la qualité des eaux est liée de façon directe ou indirecte à l'évolution actuelle dans les PVD. L'industrialisation, souvent mal contrôlée, engendre une pollution chimique, qui, lorsqu'elle est couplée avec une pollution organique d'origine urbaine, peut conduire à une péjoration importante de la qualité des eaux dans les zones où elles sont le plus exploitées. Bien que ponctuelles, ces fortes pollutions sont donc susceptibles d'affecter les conditions sanitaires de populations importantes. L'extension rapide des surfaces cultivées, ainsi que la déforestation, qui sont liées à une pression des populations rurales de plus en plus forte sur le milieu naturel, engendre une érosion qui se traduit par un fort accroissement de la charge solide des rivières et son cortège de problèmes d'envasement et de disparition de la faune. Cette détérioration de la qualité des eaux a donc des conséquences humaines et économiques dont le coût, s'il pouvait être chiffré, montrerait qu'elle constitue un exemple typique de mal-développement : les gains objectifs chiffrables se font aux dépens d'une dégradation durable des ressources.

1.2. LA REPOSE DES NOUVELLES TECHNOLOGIES

Instabilités climatiques, bouleversements des besoins, péjoration de la ressource sont autant de facteurs qui contribuent à rendre plus complexe la mise en oeuvre d'une politique globale de la gestion des ressources en eaux. Les nouvelles technologies, appliquées à bon escient, sont un des moyens qui s'offrent aux hydrologues pour trouver réponses à des questions qui de jour en jour se font plus complexes, plus pressantes et cruciales. Ces nouvelles technologies interviennent au niveau de la mesure, de l'inventaire, du diagnostic et des solutions. Ceci peut être ramené à quatre grandes interrogations :

- Quoi et combien?
- Où et quand?
- Comment et pourquoi?
- Que faut-il faire?

On peut rattacher à chacune de ces interrogations différents types de "nouvelles" technologies :

- Les nouveaux capteurs : télétransmission, télédétection.
- Les bases de données et les Systèmes d'Information Géographique.
- La modélisation.
- Les systèmes d'aide à la décision et les systèmes experts.

Les nouvelles technologies se heurtent dans leur utilisation et leur valorisation à trois problèmes :

- **Transfert d'échelle** : soit l'intégration de données connues à des échelles d'espace et de temps différentes. L'effort de recherche en ce sens doit être poursuivi si l'on veut disposer d'outils de modélisation de plus en plus fiables.
- **Evanescence des réseaux de mesures au sol**, en particulier pour les écoulements : le "water assessment", conduit sur l'ensemble des pays d'Afrique, souligne, d'une part, que les réseaux de mesures tendent à se faire de plus en plus lâches, et que d'autre part, les données collectées sont peu fiables.
- **Utilisation non justifiée** : l'utilisation des technologies dites "nouvelles" résulte parfois, si ce n'est dans les termes du moins dans les faits, non d'un impératif objectif, mais de la nécessité d'en souligner l'utilisation, ce qu'en d'autres termes on peut qualifier de "mettre en vitrine". L'intérêt d'un projet est alors davantage d'évaluer en fonction des moyens utilisés qu'en référence aux résultats escomptés, aux délais et au coût.

Confrontée à la nouvelle donne hydrologique mondiale et armée de nouveaux outils, l'hydrologie apparaît comme une discipline en pleine mutation. Du fait de la nécessité de programmes intégrés de développement, l'hydrologie tend à s'ouvrir davantage vers les sciences de l'environnement. Dans sa pratique, même si elle garde une vocation opérationnelle liée à l'entretien de réseaux de mesure, l'hydrologie se doit de dépasser son rôle, certes indispensable, mais passif de fournisseur de données. De part le rôle que les ressources en eau représentent dans le développement et l'importance du facteur eau dans l'évolution des milieux, l'hydrologie doit être en mesure d'expliquer les mécanismes qu'elle étudie. Les exposés qui suivent ont pour but d'illustrer les moyens dont dispose l'hydrologie pour atteindre ses nouveaux objectifs.

II. EXPOSES SUR LES NOUVELLES TECHNOLOGIES

Ces exposés ne peuvent prétendre couvrir l'ensemble des nouvelles technologies pouvant être utilisées par les hydrologues. On pourra regretter qu'il n'y ait pas de présentation sur les traceurs isotopiques en hydrogéologie, les radars météorologiques au

sol ou embarqués, les sondes à neutrons, etc. La liste, si elle se voulait exhaustive, risquerait d'être longue et de s'apparenter à un inventaire à la Prévert...

II.1. LES NOUVEAUX CAPTEURS

II.1.1. Télétransmission de données hydrologiques par ARGOS et METEOSAT

ARGOS est un émetteur-récepteur embarqué sur les satellites NOAA américains. Ces satellites à orbite circulaire couvrent l'ensemble de la Terre. En télétransmission normale, les messages sont reçus et enregistrés au niveau du satellite puis restitués vers les grandes stations de réception qui effectuent le traitement permettant de localiser des messages. Cette technique permet par exemple un suivi des bouées dérivantes ou des bateaux.

Les premières stations de mesures équipées de système ARGOS utilisées en télétransmission directe viennent d'être installées à Madagascar en octobre 1992. Une station de réception est déjà opérationnelle à la Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie.

Télétransmission directe par ARGOS

Le message reçu par le satellite est immédiatement réémis. Le système ARGOS n'est donc utilisé qu'en tant que "miroir" entre balise ARGOS émettrice et la station de réception locale : pour que le message soit transmis, il est nécessaire que l'émetteur et le récepteur soient localisés simultanément dans la zone de visibilité du satellite. ARGOS peut transmettre en direct des messages de toute nature, en particulier des données hydro-météorologiques.

Télésurveillance hydrologique

Le système ARGOS en télétransmission directe permet de faire de la prévision et de l'annonce de crue sur des grands bassins (au moins 50 000 km²). Les caractéristiques de la balise ARGOS font que les hauteurs d'eau sont fournies pour une période de sept heures au pas de temps de 30 minutes. A Madagascar il n'y a pas de transmission possible entre 8 heures et 14 heures (pas de satellites visibles). De plus, le système ARGOS est bien adapté à la télésurveillance dans des zones difficiles d'accès : les données sont accessibles au jour le jour ainsi que des informations sur l'état de la balise émettrice : batterie, remplissage de la cartouche. On ne va sur le terrain que lorsque l'un des paramètres d'état le nécessite. Dans certains cas (niveau de grands barrages par exemple), la transmission peut avoir lieu à des pas de temps supérieurs à la journée, ce qui diminue le coût (la tarification se fait à la journée d'émission).

ARGOS et METEOSAT

METEOSAT est un satellite géostationnaire visible à partir de Madagascar (30°). Il permet également la télétransmission de données à partir de Plate-forme de Collecte de Données (PCD). La visibilité est permanente. Le service est gratuit pour les services météorologiques nationaux à condition qu'un accord existe avec l'OMM. On peut faire de l'annonce de crue : 1 message toutes les heures et 1 message d'alerte au bout de 4 minutes. La technologie METEOSAT est plus coûteuse (si la gratuité ne peut être accordée) et plus complexe que celle d'ARGOS.

Projet d'un réseau de télésurveillance sur les grands fleuves africains (y compris Madagascar)

Proposition a été faite à l'OMM d'équiper les grands fleuves de stations PCD METEOSAT de données hydrométéorologiques. Ce réseau (300 stations ?) serait constitué sur la base de stations préalablement existantes sur des rivières étalonnables. A Madagascar, 4 à 6 stations pourraient être retenues. La gestion des stations serait prise en charge par l'OMM. Il est à signaler que ce réseau serait également utilisé en tant qu'échantillonnage de mesures pour l'interprétation des images satellitaires.

II.1.2. Télédétection satellitaire, la "vérité" venue du ciel!

Parmi ce que l'on qualifie de nouvelles technologies, la télédétection est sans doute celle qui a touché le plus la communauté des Sciences de la Terre. Pourquoi ?

Plusieurs raisons peuvent être invoquées :

- les images satellitaires s'inscrivent dans la perspective d'une vision cartographique ou aérienne du terrain à laquelle les "géoscientifiques" sont habitués.
- les investissements considérables qu'elle nécessite suppose, outre des besoins bien spécifiés, une large diffusion de ces produits servant de vitrine technologique et d'amorce commerciale dans le cadre de contrat haute technologie.
- elle permet de suivre en continu sur de larges zones, les modifications du milieu, ce qu'aucune autre technologie n'est en mesure de faire.

Cette banalisation de la télédétection fait que l'on peut se poser la question de savoir s'il s'agit encore d'"une nouvelle technologie"? L'effet "solution miracle" que toute nouveauté tend à susciter ne semble pas avoir disparu et d'aucuns persistent à croire, en dépit des réserves formelles qui sont d'usage, que la "vérité" vient, ou viendra, du ciel.

L'hydrologie continentale, fort de son pragmatisme hérité de plusieurs décennies de mesures de terrain, ne semble pas avoir succombé à ce "syndrome de la machine enchantée". Certaines applications sont certes probantes : l'utilité des satellites météorologiques dans le domaine de l'hydrologie atmosphérique n'est plus à faire. En revanche, l'hydrologie de surface et l'hydrogéologie n'ont guère utilisé la télédétection que de façon indirecte : par exemple, estimation des pluies au pas de temps mensuels ou décadaire, à partir d'images de satellites météorologiques, ou localisation de réseau de faille intervenant dans la recharge de nappes, à partir d'images de satellites d'observation de la Terre.

Il est toutefois des domaines dans lesquels la télédétection, en particulier avec les satellites d'observation de la Terre du type LANDSAT-TM ou SPOT, peut être utile. Il s'agit en particulier des "états de surface" (végétation, sol, utilisation) qui interviennent au niveau du bilan hydrique : ETP, infiltration, ruissellement. L'utilisation des classifications obtenues à partir d'images satellitaires, en particulier pour les modèles physiques distribués, se heurte à ce que les réponses radiométriques des canaux servant à la classification s'avèrent difficilement interprétables d'un point de vue physique. Prenons l'exemple de l'"indice de végétation" obtenu en combinant deux canaux radiométriques : les spécialistes eux-mêmes ne s'entendent pas sur la signification de cet indice qui d'ailleurs semble dépendre du type de végétation et de la saison végétative. Ne sachant pas ce à quoi il correspond (activité chlorophyllienne, taux de couverture, etc.), l'utiliser pour définir, ne serait-ce que des ordres de grandeur d'ETP ou de taux d'interception, serait une gageure. De plus des "confusions radiométriques" font que des milieux fort différents se retrouvent dans les mêmes classes. A moins de combiner cette approche avec une campagne de terrain couteuse et longue, l'information fournie par l'imagerie satellitaire doit être considérée avec circonspection, sauf s'il s'agit de définir les grands types d'états de surface : forêt, prairie et sol nu par exemple. D'une façon plus générale, l'interprétation en terme physique de l'information radiométrique des images satellitaires suppose une étude préalable permettant un calibrage de la réponse spectral sur un réseau de mesures ou d'observations au sol.

En dépit de ces réserves, il est acquis que l'hydrologie est appelée à utiliser de plus en plus la télédétection, en particulier dans les PVD où de grands travaux d'aménagement restent à faire alors que les réseaux de mesures sont insuffisants. Cette tendance résulte de deux évolutions concomitantes :

- Utilisation de modèles hydrologiques distribués : ceux-ci requièrent une information précise et récente sur la répartition des facteurs intervenant dans les bilans hydrologiques que seule la télédétection est en mesure de fournir. Il existe d'ores et déjà des modèles hydrologiques faisant appel plus ou moins directement à des informations de télédétection.
- Diversification des satellites d'observation de la Terre : on assiste à une multiplication et à une amélioration des capteurs (types, bandes spectrales, résolution, produits, etc) propices à la production d'informations davantage

adaptées à l'hydrologie continentale, quand bien même le capteur n'a pas été conçu explicitement pour ce type d'application. Le satellite ERS1 de l'Agence Spatiale Européenne en est un exemple. Le capteur est un radar permettant une observation de la surface de la Terre de jour comme de nuit (le capteur émet son propre rayonnement) quelle que soit la couverture nuageuse. Conçu pour des applications essentiellement océaniques et plus spécifiquement pour l'observation des zones polaires, il permet toutefois d'obtenir des informations sur l'état hydrique des sols. Il n'y a pour le moment pas de couverture pour Madagascar, aucune station de réception n'étant située dans la région. D'autres images radar sont en revanche disponibles sur la région : ALMAZ (Russe) et JERS1 (Japonais).

Les informations de télédétection ne sont généralement pas directement exploitables par les modèles hydrologiques, soit pour des raisons de format (les images sont de type raster), soit pour des raisons d'échantillonnage (le pas de modélisation hydrologique est différent). L'utilisation de SIG est donc nécessaire pour mettre en forme l'information avant son insertion dans le modèle. Une utilisation opérationnelle de la télédétection en hydrologie doit se concevoir dans le cadre plus large de "chaîne de traitement d'informations hydrologiques" incluant base de données, systèmes d'informations géographiques, modèles et systèmes d'aide à la décision. C'est de la synergie de tous ces outils que naîtront les structures capables de faire face efficacement aux défis du futur, qui sont peut-être pour demain...

II.2. BASES DE DONNEES ET SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

II.2.1 Base de données hydrogéologiques de Madagascar :

Les spécifications techniques permettant de structurer et de consulter la BD seront commentées.

La base de données hydrogéologiques mise en place dans les locaux de la Direction de l'Eau du Ministère de l'Energie et des Mines a pour objectif final de fournir un outil de gestion rationnel et fiable des données concernant les eaux souterraines à Madagascar, afin de faciliter la planification et l'évaluation des programmes et projets relatifs à l'exploitation des ressources en eaux souterraines.

Le premier travail entrepris depuis juin 1992 a consisté à collecter puis à stocker sur support informatique toutes les informations existantes sur les points d'eau, d'en vérifier la validité et d'en réaliser une première exploitation, par l'édition de cartes élémentaires (telles que la localisation des différents points d'eau dans une région, carte piézométrique, carte des teneurs en sels, etc...) et par l'édition de tableaux synthétiques.

Le système de gestion de bases de données (SGBD) utilisé est un logiciel développé par le BRGM qui crée des bases au format standard DBASE III, ce qui autorise une grande portabilité. Outre les fonctions classiques offertes par le SGBD, ce logiciel permet des traitements statistiques, mais surtout permet de tracer des cartes iso-valeurs, des reports de points et valeurs, avec dessin des contours, routes, rivières, préalablement digitalisés par un module intégré à ce logiciel. En outre, des procédures automatiques de vérifications des informations ont été développées afin de faciliter la tâche des gestionnaires de la base.

La saisie des Données peut se faire sous différentes manières : importation de fichiers ASCII ou DBASE, saisie point par point, saisie sous forme de tableur, ou saisie à partir d'un pré-processeur spécialement développé pour l'acquisition des données de forages d'eau.

Il est également possible de verrouiller la base pour n'en autoriser que son exploitation par des utilisateurs dont le niveau requis en connaissance informatique est réduit au minimum, le logiciel étant très convivial avec menus déroulants et aide en ligne.

Une autre base a également été mise en place à la Direction de l'Eau pour gérer les données temporelles (telles variations des niveaux piézométriques, de la qualité des eaux, des débits d'exploitation, etc...). Le processus de son fonctionnement est identique à celui de la base actuelle développée pour les points d'eau (fichiers en format DBASE III, sorties graphiques avec histogrammes et cartes iso-valeurs, tableaux), mais pour l'instant, cette base n'est pas opérationnelle faute d'informations à saisir.

Il est prévu dans un proche avenir d'adjoindre un Système d'Information Géographique (SIG) à ces bases de données de Madagascar, comme cela existe déjà sur le même type de bases développées par le BRGM en France et dans plusieurs autres pays.

II.2.2. Bases de données cartographiques et Agences de l'eau : exemple de la collaboration entre l'Institut Géographique National et les Agences de l'eau en France.

Les bassins versants sont des unités géographiques objectives de gestion des ressources en eaux. C'est à ce titre que les agences de bassins ont été créées en France. L'Institut Géographique National a reçu comme nouvelle attribution la réalisation de BD cartographiques à vocation nationale. La collaboration en cours entre l'IGN et les Agences de bassins illustre les rapports entre BD et SIG à une échelle nationale dans le cadre d'applications hydrologiques.

L'Institut Géographique National

L'Institut Géographique National est un organisme d'état chargé de la représentation géodésique et cartographique sur le territoire métropolitain et les départements d'Outre-Mer. Sa mission s'étend de la prise de vues aériennes jusqu'à l'impression des cartes, en passant par les levés de terrain et la cartographie. Récemment, de nouvelles instructions ministérielles l'ont chargé de la constitution de bases de données localisées. L'utilisation de satellites (NAVSTAR, LANDSAT, SPOT), la mondialisation des calculs de géoïde et d'ellipsoïde, ainsi que l'utilisation de bases de données localisées ont conduit l'IGN à mener une collaboration scientifique étroite avec des organismes nationaux ou étrangers.

Les Agences de l'eau

Les Agences de l'Eau, anciennement Agences Financières de l'eau, sont au nombre de 6 sur le territoire métropolitain et découpent le pays selon les principaux bassins versants :

- Seine-Normandie,
- Pays de Loire,
- Adour-Garonne,
- Rhône-Méditerranée-Corse,
- Rhin-Meuse,
- Artois-Picardie.

Elle sont d'ampleur territoriale variable. Les Agences de l'Eau ont un rôle de gestionnaire de l'eau : surveillance des débits et qualité. Elles perçoivent des taxes de la part des organismes consommateurs d'eau. Elles définissent la réglementation sur l'utilisation de l'eau sans que la police de l'eau soit de leur ressort.

L'évolution du nom, d'Agences financières de bassin vers Agences de l'eau, montre un recentrage de la préoccupation : de la situation administrative et juridique vers l'objectif.

La gestion de l'eau oblige à une manipulation incessante et complexe de données localisées. En effet, alors que les phénomènes de l'eau sont réglés par le relief et la géologie, les relations avec les utilisateurs passent par les structures administratives, départementales puis communales. Les Agences de l'eau se trouvent contraintes à l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) et d'une base de données. D'où la collaboration entre les deux organismes, qui s'est développée dès la conception du produit Base de Données Cartographiques.

La Base de Données Cartographiques

La Base de Données Cartographiques (BDC) de l'Institut Géographique National contient les éléments topographiques nécessaires à une représentation du territoire "à moyenne échelle". C'est dire que l'on peut tirer des cartographies dans des échelles comprises entre le 1:100 000 et le 1:500 000 sans traitements complexes de sélection ou de généralisation.

Cette base de données couvrira, à terme, l'ensemble du territoire français.

Tous les objets sont regroupés par thème :

- réseau routier,
- réseau hydrographique,
- occupation du sol,
- structures administratives,
- orographie,
- réseau de chemin de fer,
- réseau électrique,
- objets isolés.

Un modèle de données définit chaque thème :

- définition des objets, nature, critère de sélection,
- source de la donnée,
- précision géométrique et règle de généralisation,
- définition des qualificatifs associés,
- relations entre objets,
- structuration informatique.

Un manuel de qualité définit les règles de travail et les normes de qualité du produit final.

La constitution de cette base de donnée s'est opérée en trois phases :

- saisie, sur la carte au 1:50 000, de la géométrie des éléments linéaires et ponctuels, recherche à l'aide de sources complémentaires des qualificatifs de description,
- saisie, sur image Spot, des éléments surfaciques, géométrie et codification,
- structuration selon le modèle de données choisi de l'ensemble des informations saisies.

La première phase est achevée sur l'ensemble du territoire, une révision est en cours, les deux autres phases sont en cours d'élaboration.

Les applications Agences de l'eau

La Base de Données Cartographiques est une base topographique ouverte aux données particulières de chaque utilisateur. Il peut modifier le champ de description qualitative, ajouter ses propres objets, ou fractionner les objets existants, moyennant le respect de certaines règles préservant le lien avec la base originelle.

Les Agences de l'eau, dans un premier temps, ont choisi de prendre en compte le réseau hydrographique, l'occupation du sol dans sa composante de l'eau, les limites administratives et l'orographie. Les autres données ne sont utilisées que visuellement, comme "fond de carte" et sont chargées dans une structuration plus simple.

Le réseau hydrographique est un graphe planaire, composé d'objets cours d'eau. Ce sont des objets complexes, composés des objets simples tronçons de cours d'eau qui portent des attributs, tels que largeur, nature des berges, navigabilité, etc... homogènes sur l'ensemble du tronçon. Les objets simples tronçons de cours d'eau sont portés par des lignes géométriques contenant une suite de points (x,y) dans le système cartographique Lambert 2 étendu, avec une précision de 10 m. Les objets cours d'eau sont liés entre eux à leur confluence, sont liés aux zones en eau qu'ils traversent, au thème occupation du sol, enfin aux objets routes et voies ferrées qu'ils franchissent.

Quelques exemples d'exploitation et de développement de la base sont donnés :

- tenir en permanence à jour l'inventaire des lacs et cours d'eau;
- rattacher au réseau hydrographique les points de mesure de débit, de composition de l'eau, de quantité de poissons, etc. L'insertion de ces points dans la base permettrait une analyse des évolutions constatées entre points et une visualisation spatiale de l'ensemble des mesures;
- calculer le bassin versant d'un point donné;
- calculer le bassin versant d'un point donné. Les zones des Agences de l'eau sont découpées en bassins versants élémentaires regroupés selon une arborescence de 4 niveaux. Les normes de découpage sont anciennes et hétérogènes selon les 6 agences. L'Agence de l'eau Rhin-Meuse a défini une norme, maintenant reconnue au niveau européen. Les autres agences doivent refaire leur codification et aimerait se faciliter la tâche par des outils performants. La superposition des données d'hydrographie et d'orographie dans un SIG doté d'un calcul de bassin versant doit permettre d'établir rapidement un nouveau découpage;

- calculer l'impact d'une pollution: L'insertion des points de sortie des bassins versants dans le réseau hydrographique permet de déterminer tous les objets avals topologiquement touchés par une pollution, donc très certainement menacés. La superposition des structures administratives permet de connaître les communes concernées et d'informer les autorités communales chargées des mesures de protection.

La complexité des données topographiques traitées, et celle des traitements dans un gros volume de données nécessite un SIG puissant. L'IGN a choisi Arc-Oracle sur station de travail. Les Agences de l'Eau ont opté pour des SIG différents, fonction de leur matériel et de leurs antécédents informatiques. Le transfert des données d'un SIG à l'autre se fait par un format d'échange. Une norme européenne de format d'échange est en cours d'élaboration. Chaque constructeur de logiciel devra intégrer cette norme dans ses possibilités d'entrée et de sortie des données.

L'ensemble de cette collaboration ne fait que commencer car l'investissement est énorme, tant en constitution des données (données topographiques générales et données spécifiques de l'eau), qu'en établissement de logiciels (insertion de données dans un SIG, ajouts de fonction spécifiques dans les SIG). Les difficultés de communication de deux organismes qui ont un point de vue sur l'eau différent doivent être surmontées.

II.3. MODELISATION

Il convient dès l'abord de relativiser l'intérêt des modèles. Cette réserve n'est pas propre aux modèles hydrologiques : les modèles économiques ont fait la preuve de leur capacité à prévoir le présent mais pas au-delà! L'utilisation de modèle peut même s'avérer néfaste en ce sens qu'elle peut nuire à la "découverte" (heuristique) en réduisant le "champ de vision" :

"Il est peut-être préférable d'avoir d'abord un modèle non-mathématique avec ses imperfections mais qui exprime un point de vue antérieurement négligé, avec l'espoir qu'un jour on pourra lui associer un algorithme correct, que de partir de modèles mathématiques prématurés fondés sur des algorithmes connus, qui risquent de restreindre le champ de vision"

Ludwig Von Bertalanfy, Théorie générale des systèmes, 1973.

Il est assez symptomatique que sous la plume des hydrologues actuels, on trouve de plus en plus le terme de complexité associé à celui d'Hydrologie. L'utilisation de modèles hydrologiques semble donc au moins avoir cette vertu d'avoir fait redécouvrir le caractère complexe de la pluie et des écoulements à ceux qui les mesurent. Ouf! l'hydrologie n'est donc pas simplement une question de mesures.

Qu'est ce qu'un modèle ?

Un modèle est une "représentation simplifiée de la réalité". Cette définition, devenue banale, doit être commentée dans son contexte hydrologique :

- "représentation" : le(s) concepteur(s) du modèle a(ont) une représentation idéalisée du fonctionnement hydrologique formalisable sous la forme d'algorithmes pouvant être intégrés dans un programme informatique. Cette représentation leur permet de transformer l'information pluies (impulsions) en débits (réponses) sur une parcelle, un versant, un bassin versant.
- "simplifiée" : nul concepteur ne peut prétendre, et ne prétendra, avoir une représentation "exhaustive" des processus hydrologiques qu'il modélise, quelle que soit l'échelle de temps et d'espace considérée. Tout l'art de la modélisation consiste à prouver que les simplifications explicites ou implicites ne portent pas atteinte à la robustesse du modèle, ce qui revient à démontrer que les choix des paramètres du modèle ont été judicieux.
- "réalité" : toute considération philosophique mise-à-part, dans le contexte de la modélisation hydrologique, la "réalité" se limite à la compilation des informations quantifiables hydrologiquement pertinentes. On peut distinguer deux types d'informations : celles relatives aux entrées-sorties du système étudié (pluies, débits, ETP, infiltration profonde) et celles portant sur la structure fonctionnelle du système (caractéristiques intervenant dans les fonctions de transfert et de production soit par exemple la forme du bassin, la densité de drainage, la répartition des états de surface, nappes, etc...).

L'hypothèse sous-jacente à tout modèle est que "ce que l'on sait (réalité hydrologique + représentation simplifiée) est représentatif de ce qui est (la "Réalité" absolue indépendante des observations et de l'observateur)" (d'après Moniod 1992).

Pourquoi modéliser ?

Si l'hydrologie n'était qu'une affaire de mesures, il conviendrait de la qualifier d'Hydrométrie. L'interprétation des mesures suppose, ne serait-ce que pour permettre leur validation, une conceptualisation plus ou moins élaborée des relations spatio-temporelles et fonctionnelles qui les lient. Cet aspect conceptuel n'est pas nouveau en Hydrologie : l'hydrogramme unitaire (Shermann 1932), les travaux de Horton (1945) ou le concept des aires contributives (Hewlett 1967) en sont des exemples. En revanche, les possibilités de calcul actuelles permettent de confronter concepts et mesures sous la forme de modèles hydrologiques. Cette démarche s'inscrit tout-à-fait dans le cadre de la méthode expérimentale, le modèle permettant de tester des hypothèses de fonctionnement.

Principes des modèles hydrologiques

Nous ne parlerons pas ici des modèles déterministes pluies-débits dit modèles "boîte noire". Il s'agit d'établir une relation mathématique (essentiellement statistique) entre les entrées et la sortie. Ces modèles "ignorent" le bassin versant et sont à vocation opérationnelle (système d'alerte par exemple).

On assiste depuis environ deux décennies au développement de modèles hydrologiques dont la vocation et la conception sont différentes : il s'agit de modèles comportant une représentation physique, plus ou moins élaborée, du fonctionnement hydrologique avec comme but la compréhension de ce fonctionnement. Cette démarche s'inscrit davantage dans la perspective de recherches hydrologiques. Ces modèles que l'on peut qualifier de "physiques" peuvent se rapporter soit à la phase atmosphérique, soit aux écoulements de surface, soit au fonctionnement des nappes, soit encore à l'ensemble des composants de l'hydrologie continentale. Chaque modèle tend à se rapporter à une certaine échelle d'étude des phénomènes : on parlera alors de modèle-parcelle, de modèle-versant, de modèle-petit bassin, etc.

Une distinction doit être faite également en fonction de la représentation de la variabilité spatiale des paramètres hydrologiques du modèles. Dans les modèles "globaux", les paramètres sont supposés fonctionnellement homogènes sur l'ensemble de l'entité étudiée : une valeur "moyenne" est alors considérée, par exemple pour la densité de drainage, la pente ou l'infiltration. D'autres modèles qualifiés de "distribués" partitionnent la zone étudiée en sous-zones homogènes, chacune ayant ses propres paramètres hydrologiques. Ce type de modèles permet de mieux prendre en compte la variabilité spatiale et la disposition relative des facteurs intervenant dans le fonctionnement hydrologique ; considérons par exemple un bassin composé à 50% de forêt et 50% de prairie ; en fonction de la localisation des deux types de couverture végétale le bassin pourra avoir un fonctionnement différent ; les forêts peuvent être sur les interfluves ou dans le fond de vallée, occuper davantage la tête de vallée ou au contraire s'étendre sur la partie aval du bassin; un modèle distribué est capable de faire la distinction entre ces différents cas de figure. On peut toutefois remarquer que ce type de modèle n'est qu'un assemblage de modèles globaux liés par des fonctions de transfert : la même réserve peut-être appliquée à l'échelle des éléments supposés homogènes du modèle distribué : ne conviendrait-il pas de les subdiviser ? Ces considérations expliquent en partie l'utilisation fréquente de modèles distribués à pas de discrétisation variables et emboîtés dont la taille dépend d'un critère de variance des paramètres hydrologiques.

Enfin, les modèles comportent deux types de fonctions :

- la fonction de transfert : elle représente la structure des flux.
- la fonction de production : elle représente la quantité d'eau intervenant effectivement au niveau de la mesure des flux.

A titre d'exemple, dans le cas simple d'un modèle de crue, l'hydrogramme modélisé peut présenter un temps de montée et un temps de base correct mais représenter un volume d'eau sur ou sous-évalué par rapport aux données observées. En ce cas, la fonction de production du modèle est incorrecte. L'inverse peut se produire : le volume de la crue est correctement modélisé mais pas la forme de l'hydrogramme ce qui suppose une fonction de transfert incorrecte. Dans la pratique, les fonctions de transfert et de production sont liées : dans les modèles, transfert et production sont souvent traités au même pas de temps.

Limites des modèles

La première des limites est liée aux mesures et à leur représentativité lorsqu'elles doivent faire l'objet d'interpolation ou d'extrapolation. Les pluies constituent la principale entrée des modèles, or les problèmes relevant de leurs mesures ne sont pas réglés en particulier pour les fortes intensités. A supposer que les mesures soient justes, se pose le problème de la restitution du champ pluviométrique en particulier pour les pas de temps fins. Il en va de même pour d'autres types de mesures : certains hydrologues remettent en cause l'intérêt des résultats du simulateur de pluie allant jusqu'à le qualifier de modélisation "pot-de-fleur". En effet, l'extrapolation de ces mesures à l'échelle de versant tend à ignorer les mécanismes cumulatifs responsables de dynamiques non-linéaires.

La seconde des limites tient à la nature même des modèles. Comme cela a été suggéré, chaque modèle est conçu dans un certain contexte pour une application plus ou moins spécifique : des critères d'échelle d'étude, de pas de temps (les deux sont plus ou moins liés), de milieux morphoclimatiques, de facteurs considérés, sont figés dans le modèle. Plus un modèle est complexe (nombre de paramètres, structure des fonctions de transfert et de production) plus il tend à être inféodé aux conditions de son élaboration. Dans un article récent, des hydrologues ayant appliqué différents modèles à des données pluies-débits concluaient que les modèles "marchaient" d'autant mieux qu'ils comportaient peu de paramètres.

Il convient de revenir sur le problème de l'"effet d'échelle" déjà mentionné précédemment. Pour certains, cette explication est devenue une sorte de "tarte à la crème hydrologique" (sic Bocquillon 1992) que l'on invoque chaque fois qu'un modèle fonctionne mal hors de son contexte de mise au point. L'idée est que les "transformations fonctionnelles hydrologiques sont fonction de la taille du bassin considéré, ce qui n'est guère étonnant, vu la double complexité du système : complexité du milieu physique et complexité fonctionnelle des dynamiques non linéaires" (d'après Bocquillon 1992). Exprimé en termes plus simples, il est non seulement difficile de définir les éléments pertinents du "système" hydrologique mais il s'avère également délicat d'en connaître les modalités de leurs interactions.

Au regard de ce qui précède, on peut être sceptique sinon circonspect sur l'intérêt des modèles. Il est toutefois possible d'en cerner quelques avantages majeurs :

- Ils permettent une "valorisation/validation" globale des mesures en testant leurs cohérences fonctionnelles.
- Ils apparaissent comme de puissants outils d'analyse critique des concepts hydrologiques. Ils obligent ainsi l'hydrologue à une réflexion globale et formelle sur les processus hydrologiques et leurs relations avec les autres facteurs du milieu.
- L'utilisation de modèles physiques favorise une approche heuristique et didactique de l'hydrologie quand mesures et concepts ne sont pas dissociés.

L'intérêt des modèles au niveau de la recherche/formation apparaît comme évident. En revanche, on peut s'interroger sur la pertinence de modèles physiques complexes dans le contexte opérationnel de projets de développement. Est-ce un luxe, voire un gadget, que les objectifs ne justifient pas? Il est difficile de donner une réponse péremptoire. Leur utilisation peut se justifier dans les cas suivants :

- Un modèle que l'on pense bien adapté existe, ce qui permettrait d'exploiter au mieux les mesures existantes et de minimiser celles restant à faire (réduction du coût et du délai des campagnes de mesures).
- Le fonctionnement hydrologique de la région est mal connu en particulier certains des grands termes du bilan hydrologique des bassins et/ou du bilan hydrique du sol. En ce cas, l'utilisation de modèles offre un cadre de recherche permettant de définir plus rapidement les ordres de grandeur et de mieux cerner les termes devant faire l'objet de mesures plus précises.

Exemple de la prise en compte du relief dans les modèles hydrologiques de surface

A la fois cause et conséquence des processus hydrologiques, le relief a toujours fait l'objet d'une attention particulière de la part des hydrologues. La forme du bassin, la structure du réseau hydrographique, les pentes sont autant de facteurs physiographiques qui ont une influence directe sur la réponse hydrologique des bassins versants. Le relief intervient également de façon indirecte sur la localisation des zones saturées (facteur sol), sur l'ensoleillement et les précipitations (facteur climat), sur la végétation et l'utilisation des terres (facteur état de surface).

Les écoulements superficiels suivent les lignes de plus grande pente, telles qu'elles peuvent être établies à partir du relief. Il est par conséquent possible de définir certaines caractéristiques de la fonction de transfert des écoulements superficiels en établissant un

"modèle de drainage" calculé à partir de la surface topographique. De plus, moyennant quelques hypothèses sur les relations entre formes du terrain et écoulements concentrés, il est possible de déduire à partir de modèle de drainage de la surface par des méthodes automatiques un réseau de rivières dont la validité hydrologique est souvent meilleure que celle du réseau figuré sur les cartes. On obtient ainsi une représentation des écoulements superficiels faisant la distinction entre écoulements diffus sur versant et écoulements concentrés en rivières. Dans le cadre d'une modélisation "toile cirée", c'est-à-dire que l'ensemble du bassin ruisselle, on peut simuler les temps de transfert des écoulements superficiels à l'exutoire pour l'ensemble des "chemins d'eau" du bassin. Cela correspond à une conception hortonnienne du ruissellement. Un outil de simulation baptisé TOPASE (TOPographie Appliquée à la Simulation des Ecoulements) permettant de tester l'effet spécifique des pentes et de la structure du réseau est en cours de développement à l'ORSTOM.

L'observation de terrain a conduit à remettre en cause cette notion de ruissellement généralisé sur l'ensemble du bassin. De cette critique est né le concept des "aires contributives" : en général la capacité d'infiltration des sols est supérieure à l'intensité de la pluie : le ruissellement superficiel n'apparaît que si les sols sont saturés. Ces zones saturées se trouvent aux pieds de versant et dans les fonds de vallée là où la pente est faible (faible drainage hypodermique) et les apports venant de l'amont importants. Ces zones ont une extension variable en fonction de la durée et de l'intensité de l'averse. Le relief apparaît également comme le facteur le plus important et le plus général permettant de localiser les zones "potentiellement" saturables. Il est assez symptomatique que deux chercheurs travaillant indépendamment, l'un professeur d'hydrologie : Keith Beven, Angleterre, l'autre ingénieur forestier : Emmet O'Loughlin, Australie, en soient venus à proposer presque simultanément un indice de saturation potentiel en eau des sols, calculé en fonction des mêmes principes à partir de la topographie. Poursuivant leurs travaux, deux modèles hydrologiques "conceptuels" ont été conçus : TOPMODEL est un modèle global développé par Beven utilisant les valeurs de l'indice dans la fonction de production, TOPOG est un modèle distribué sur petit bassin développé par O'Loughlin permettant de simuler les effets de la déforestation sur les écoulements superficiels.

II.4. SYSTEMES D'AIDES A LA DECISION ET SYSTEMES EXPERTS : exemple du SIAD HYDRAM de gestion d'hydro-aménagement.

Principes généraux des SIAD et des SE

Les systèmes interactifs d'aide à la décision (SIAD) sont parmi les plus complexes des systèmes informatiques. Contrôlés par l'utilisateur, reposant souvent sur des modèles non standards et destinés à résoudre des problèmes de décision peu ou pas structurés a priori, ils représentent une partie mal connue de l'informatique opérationnelle, cette branche étant encore en plein devenir et le fait de quelques spécialistes.

Les SIAD sont basés sur le principe des systèmes-experts (SE). Un système-expert propose une représentation de l'"expertise" sous la forme d'une "base de connaissance". La constitution de cette base de connaissance procède d'une approche particulière, celle du "cogniticien". Ce dernier doit mettre en termes informatiquement opérationnels les connaissances souvent informelles d'"experts-humains" ayant acquis une grande "expérience" dans leur domaine de compétence. Cette base de connaissance repose davantage sur la représentation des objets du système que sur son fonctionnement. De ce fait, la réalisation de SE et des SIAD qui en découlent utilise des langages de programmation ad hoc dit "orientés objet" : LISP, PROLOG ou EIFFEL par exemple. A cette base de connaissance est associé un "moteur d'inférence" définissant les rapports fonctionnels de causalité liant les objets.

Le SIAD HYDRAM pour la gestion des projets d'hydro-aménagement

HYDRAM est un environnement logiciel dédié à l'aide à la décision dans la gestion des hydro-aménagements. HYDRAM se propose de rendre accessible l'utilisation d'outils simples, intégrant la démarche des divers spécialistes intervenant dans ce type de projet : hydrologues, agronomes, analystes, ingénieurs, etc. L'outil doit être capable de rendre disponible facilement, rapidement, de manière claire et synthétique les conséquences prévisibles de scénarios de développement, d'alternatives de gestion.

HYDRAM a été développé au centre ORSTOM de la Guadeloupe sous la direction de J.C. Pouget. Il a été développé à la demande des autorités locales à des fins de planification de l'irrigation de la Grande-Terre (île plate et relativement sèche, zone agricole) à partir de la Basse-Terre (île montagneuse, "Château-d'eau" de l'archipel).

HYDRAM s'applique à un contexte régional géographiquement défini dont les ressources en eau et les besoins prévisionnels sont connus. Pour parvenir à une adéquation ressources/besoins, l'utilisateur dispose d'un certain nombre de "composants" d'hydro-aménagements : retenue, prise en rivière, bief naturel, lien, jonction, prise débit dérivé, station de traitement, demande A.E.P. (Adduction Eau Potable), périmètre d'irrigation. La première étape consiste à définir les "noeuds" et les "liens" de l'hydro-aménagement. L'utilisateur peut également définir un "ordre de priorité des besoins" soit une fourniture sélective en fonction de la disponibilité et une "solicitation de la ressource" soit une gestion des transferts entre plusieurs retenues. Enfin, la fonction "cohérence préalable" permet de tester si l'hydro-aménagement en cours de conception peut effectivement être simulé. Des incohérences du type "demande ne pouvant être satisfaite pour telle période" peuvent être signalées dès la pré-simulation.

En phase de simulation, HYDRAM propose différents types d'analyses :

- Expertise sur une simulation : une analyse interprétée sous la forme de textes, tableaux et graphiques des résultats est fournie. Le constat sera en grande partie

basé sur une "logique floue", à savoir le lien entre le quantitatif et le qualitatif, pour l'élaboration de textes clairs utilisant des notions telles que faible, moyenne, forte.

- Fonctionnement de la simulation : cette fonction permet l'examen de points particuliers du fonctionnement, ce qui permet une définition plus rapide et précise des causes de défaillance.
- Comparaison de deux simulations : cette option est utile pour dégager le gain apporté par des modifications sur l'hydro-aménagement.
- Eléments d'expertise par défaut : c'est à ce niveau que sont formalisés les éléments de "logique floue" qui faciliteront les classifications et les conclusions des expertises.

Dans sa version actuelle, HYDRAM ne considère que l'aspect quantitatif de l'adéquation ressources/besoin en eau. A terme, il s'avérera nécessaire d'y inclure d'autres considérations intervenant dans les projets d'hydro-aménagement : production d'électricité et qualité de l'eau par exemple. C'est dans la nécessité d'extensions de ce type que le choix du mode de développement informatique devient primordial. Le choix du langage orienté objet EIFFEL pour HYDRAM offre une architecture de développement propice à son évolution. Cette approche privilégie les "objets" au lieu des "fonctions" qui sont temporairement oubliées. Ainsi, l'introduction de micro-centrales hydro-électriques, par exemple, revient simplement à créer une nouvelle "classe" d'objets baptisé MICRO-CENT qui héritera des attributs de la classe JONCTION. Cette nouvelle classe sera simplement complétée par des propriétés et actions permettant de calculer la puissance électrique produite.

III. DIFFUSION ET FORMATION AUX NOUVELLES TECHNOLOGIES

III.1. LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE AU CENTRE NATIONAL DE TELEDETECTION ET D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE : UN OUTIL AU SERVICE DU DEVELOPPEMENT.

A titre de formation aux nouvelles technologies (équipements informatiques en matière de SIG ou Système d'Information Géographique et traitement d'images) et l'utilité de la mise en place du CNTIG

III.1.1. Introduction

1992 = année internationale de l'Espace

Les nouveaux procédés, instruments et applications qui aujourd'hui sont offerts aux utilisateurs, ont changé radicalement la conception même de la cartographie d'une manière difficilement concevable quelques ans auparavant.

La technologie SIG est devenue opérationnelle et il n'est plus possible de la séparer de la cartographie.

La télédétection a également prouvé ses possibilités, étant devenue partie intégrale de la cartographie et du SIG

Les domaines concernés : les collectivités et services publics, les entreprises industrielles, les organismes de gestion des ressources naturelles, les instituts de recherche et de planification.

III.1.2. Filières de collecte et d'intégration des données

Une information est géographique lorsqu'elle est liée à une position sur la terre. On parle aussi de données localisées ou d'information à référence spatiale.

SIG : ensemble de logiciels pour la saisie, le stockage, l'analyse et la représentation de l'information géographique numérique

Schéma d'application

- outils de travail à utiliser : matériels, logiciels, outils, données, périphériques...
- données-sources : cartes (numérisation, scannage), photos (restitution), images satellitaires (numériques), mesures terrain (topométrie, données GPS), données exogènes, données textuelles ...;
- mise en relation des divers domaines (saisie, organisation, manipulation, modélisation, analyses ...) à partir des informations localisées et localisables;
- sortie : cartes thématiques en tant qu'outil de gestion, outil d'analyse et d'aide à décision, outil pour le suivi, le contrôle et l'évaluation.

III.1.3. Les matériels employés

III.1.3.1 -Les différentes gammes d'ordinateurs

- Le PC
- la station de travail
- l'ordinateur central ou serveur

III.1.3.2. Les périphériques de saisie

- l'appareil de restitution
- la table à numériser
- le scanner
- la souris, curseur avec touches programmables
- le clavier

III.1.3.3. Les périphériques de sortie

- les imprimantes
- les traceurs à plumes
- les traceurs électrostatiques
- les traceurs à jet d'encre
- les caméras lasers
- les écrans alphanumériques
- les écrans graphiques monochromes ou couleurs

III.1.3.4. L'utilisation d'un réseau de communication

- le système centralisé : un gros ordinateur central détient toutes les capacités de stockage et éventuellement de calcul. Les postes (avec ou sans disque) et les périphériques y accèdent via un réseau de communication;
- le système réparti : il y a plusieurs serveurs de données. Les données sont réparties entre les différentes machines (stations de travail) reliées entre elles par un réseau.

III.1.4. Méthodes et outils

III.1.4.1. Saisie externe

Récupérer les données, les convertir au bon format, dans le bon système d'unité, dans la bonne projection, en utilisant des interfaces.

III.1.4.2. Saisie interne

Outils raster (scanners, traitement d'images), outils vecteurs (table à numériser, stations photogrammétriques, levés terrain, GPS ou positionnement à partir d'observations par satellites,...), outils mixtes.

III.1.4.3. Assurance - Qualité

Procédure destinée à garantir la qualité d'un processus.

III.1.5. Le CNTIG et ses partenaires

III.1.5.1 Rôles et fonctions du CNTIG

Le Centre National de Télédétection et d'Information Géographique ou CNTIG a été créé dans le cadre du Plan d'Action Environnementale, en vue de satisfaire les besoins en information géographique exprimés par les organismes malgaches, en particulier les agences d'exécution du PAE, et également favoriser le développement de la télédétection et de l'information géographique à Madagascar. Opérationnalité : Mi-1993, mais des projets pilotes peuvent être envisagés d'ores et déjà avec les équipements destinés à la formation en SIG et Télédétection.

III.1.5.2. Missions du CNTIG

- production, archivage et distribution d'information géographique (ex.: images satellitaires, cartes thématiques, données numérisées, ...);
- structure technique ouverte aux organismes non désireux de s'équiper en matériels "lourds" de traitement d'images ou en SIG;
- centre d'expertise en télédétection et en information géographique

III.1.5.3. Equipements

Suite aux enquêtes effectuées dans les divers organismes et services intéressés (une vingtaine), le Centre sera doté des moyens techniques (matériels, outils et méthodes, assistance technique) nécessaires pour satisfaire leurs besoins en SIG et traitement d'images. Ce sera un système réparti formé de 4 ateliers reliés entre eux par un réseau, et en interface avec le système d'orthophoto numérique du FTM :

- atelier de numérisation
- atelier de traitement d'images (station)
- atelier SIG (station)
- atelier d'archivage

Il comprendra également un laboratoire de photographie couleur.

III.1.5.4. Relations avec ses partenaires

- un des rôles du CNTIG est de favoriser les échanges d'informations géographiques en tant que conseil national de l'information géographique, par la promotion des standards ainsi que des méthodologies de mise en oeuvre. Les données sources n'ayant pas toutes les mêmes spécifications, il faudrait assurer en effet, une certaine cohérence entre les thèmes saisis avant le traitement;
- le CNTIG met à la disposition de tous ses équipements lourds et l'assistance technique dont ne pourront pas disposer la plupart des agences, mais qui sont pourtant indispensables pour les grands projets, en particulier dans le cadre du PAE;
- vis à vis des organismes et des départements ministériels utilisant les techniques de la télédétection, la réalisation d'un projet sera élaborée en partenariat et devra faire l'objet d'une analyse concertée des différentes étapes de travail ainsi que de la définition précise des responsabilités;
- dans cette période où beaucoup d'opérateurs commencent à utiliser les produits de télédétection et à s'équiper pour effectuer leurs propres traitements thématiques, il est recommandé que leurs équipements soient compatibles à ceux du CNTIG, pour faciliter les échanges et traitements.

III.1.6. Conclusions et Recommandations

(En particulier pour ceux qui vont s'équiper en SIG)

- Il est recommandé de conserver les structures décentralisées en matière de SIG (autonomie des centres de services)
- Pour les échanges de données, il convient de:
 - . utiliser un système commun de référence
 - . standardiser les éléments de référence
 - . définir et uniformiser la nomenclature
 - . définir des standards informatiques et les outils d'interface
 - . généraliser les formats d'échanges

- Utilité d'une formation en SIG et télédétection aussi bien pour les décideurs que pour les techniciens. La structure existant actuellement à l'ININFRA est tout à fait appropriée (PFPC) à ce type de formation.

- Les problèmes institutionnels sur la relation Producteurs/Utilisateurs de données (droit de propriété, droit d'accès, coût d'acquisition, coût de production,...) devrait faire l'objet d'une étude sérieuse pour une approche formelle.

Annexe

Essai de repertoire toponymique

Il y a des difficultés dans l'identification des villages et leur affectation à telle ou telle circonscription administrative. Idéal : carte mise à jour associée à un répertoire toponymique par traitement automatique. Il faudrait mener des études et analyses d'adaptation de ces nouveaux développements technologiques. Action : à partir des cartes 1/500.000 de 1947.

- publication mai 1955 par United Board on Geographical names : nomenclature à partir du 1/500.000

- la structure non permanente du Comité National des Noms Géographiques n'a pas pu permettre la production d'une nomenclature

FTM a pris l'initiative mais faute de moyen (avec 2 magnétophones portatifs), résultat assez maigre compte tenu de l'ampleur du travail.

Tentative de nomenclature à partir de l'édition 1963 au 1/500.000 : étude de normalisation de certains noms géographiques liés à des chefs-lieux administratifs et autres accidents topographiques; à officialiser et ceux "officieusement" normalisés pour leur conformité à l'usage courant et populaire.

III.1.7. L'avenir

III.1.7.1. Pour la technologie

Gestion de données Multi-Média

III.1.7.2. A Madagascar

Mise en place du réseau de banque de données environnementales (étude en cours à l'ONE)

III.2. NOUVELLES TECHNOLOGIES ET FORMATION CONTINUE : LE CAS DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE A MADAGASCAR

Contexte

Les techniques de "l'information géographique" ont récemment fait leur apparition à Madagascar. Ces "nouvelles technologies", issues des domaines de l'informatique et du spatial, permettent théoriquement d'accroître la puissance de traitement des données, d'en réduire les délais et d'accéder à de nouveaux types d'applications. La large diffusion des équipements, liée à une baisse constante des coûts d'acquisition, les met désormais à la portée d'un nombre croissant d'utilisateurs.

Si les avantages souvent mis en exergue sont réels et aisément perçus, certains risques sont cependant trop fréquemment sous-estimés, voire occultés. Une formation adaptée au niveau des divers intervenants est nécessaire pour appréhender ces risques d'une manière satisfaisante et favoriser l'intégration de ces nouvelles technologies.

L'information géographique

Le domaine de "l'information géographique" concerne l'ensemble des techniques permettant la manipulation de données localisées sous une forme numérique. Indispensable pour la plupart des choix d'infrastructure, l'information géographique est également utile pour un grand nombre de décisions de politique économique, sociale et d'aménagement du territoire.

Face à une gestion de plus en plus complexe de l'information, la constitution de base de données localisées devient incontournable. Le recours aux méthodes de télédétection à partir d'imagerie satellitaire est également en plein essor pour l'obtention de données fiables et actualisées, notamment dans les secteurs de l'environnement, de la foresterie et du développement rural.

Nécessité d'une politique de formation continue

La mise en oeuvre de ces techniques n'a d'intérêt que si les données peuvent aisément être collectées, organisées et diffusées. Leur circulation peut être entravée pour des raisons techniques, mais l'expérience à montrer que les principaux facteurs de blocage sont plus souvent d'ordre politiques ou institutionnelles.

Devant la nécessité de vulgariser de nouveaux concepts, la redéfinition du dispositif malgache d'information géographique doit donc passer par des actions de "formation continue" à différents niveaux :

- sensibilisation des hauts responsables afin de définir un cadre institutionnel adéquat,

- information des cadres sur l'évolution des techniques,
- formation du personnel opérationnel à l'utilisation de ces nouveaux outils.

Ces actions doivent être menées dans le cadre d'une véritable politique de formation continue appuyée par les moyens matériels et humains appropriés.

Le Projet Formation Professionnelle Cartographie-Cadastre (PFPC)

Le projet "Formation Professionnelle en Cartographie et Cadastre" (PFPC) représente à cet égard une expérience intéressante. Localisé à l'Institut National de l'Infrastructure (ININFRA) et financé par la Coopération Française, ce projet est destiné à la formation continue du personnel de l'Institut Cartographique de Madagascar (Foiben Taosarintanin'i Madagasikara, FTM) et de la Direction des Domaines et de la Réforme Agraire (DDRA).

Abstraction faite des bilans quantitatifs et qualitatifs, deux aspects importants sont à souligner :

- Ce projet a toujours été opérationnel, malgré la situation difficile qui prévalait à Madagascar, en raison de son mode de fonctionnement : large autonomie administrative et financière, peu de personnel permanent mais recrutement de vacataires hautement spécialisés en fonction des besoins, collaboration étroite avec les entreprises malgaches et étrangères permettant une mise à niveau constante des techniques enseignées et des équipements utilisés.
- Une demande importante est apparue en ce qui concerne la formation continue dans les diverses techniques de "l'information géographique", notamment au niveau de la télédétection dans le cadre de projets à composantes environnementales. Conçu pour répondre aux besoins du FTM et de la DDRA, le PFPC ne peut actuellement satisfaire cette demande. Une structure mieux adaptée est désormais nécessaire.

Le Centre de Formation des Sciences de l'Information Géographique et de l'Environnement (CFSIGE)

Destiné à succéder au PFPC en élargissant ses compétences, le futur Centre de Formation des Sciences de l'Information Géographique et de l'Environnement (CFSIGE) permettra à Madagascar de disposer d'une structure permanente chargée de répondre aux besoins de formation continue dans les domaines de l'information géographique et de l'environnement. Les objectifs de ce centre seront multiples :

- Sensibiliser, informer et vulgariser ces techniques à travers des conférences, des séminaires et des expositions.

Perspectives pour le développement : les nouveaux outils de recherche ...

- Conseiller les organismes intéressés pour définir leur politique en matière de formation continue. Un plan de formation "à la carte" sera ainsi proposé en fonction de chaque cas au niveau du contenu, de la période, de la durée et des coûts.
- Optimiser les ressources matérielles et humaines locales en faisant appel prioritairement aux structures et aux compétences existantes à Madagascar. Le centre bénéficiera ainsi du support technique du FTM, du Centre National de Télédétection et d'Information Géographique et du Centre National de la Recherches sur l'Environnement (CNRE).
- Assurer la formation du personnel opérationnel. L'encadrement sera assuré par des spécialistes recrutés temporairement.
- Coordonner les actions de formation continue avec les entreprises dans le cadre de la formation universitaire à Madagascar.
- Etablir des contacts avec les institutions spécialisées au niveau international afin de suivre les évolutions technologiques et les diffuser au mieux à Madagascar.

Perspectives

Les demandes actuelles auprès du PFPCC font apparaître un plan de charge d'environ 25 à 30 stages par an concernant environ 200 stagiaires issus d'une quinzaine d'organismes. Il est prévisible que les demandes de formation iront croissant à court terme étant donné le développement très rapide de ces nouveaux secteurs d'activité à Madagascar. On peut raisonnablement estimer que le "rythme de croisière" devrait s'établir à 50 stages par an et concernera 400 stagiaires. Des bourses de formation de courte durée à l'extérieur pourront occasionnellement compléter certaines formations.

Les perspectives d'avenir du CFSIGE semblent prometteuses car de plus en plus d'organismes nationaux prennent conscience de l'intérêt à investir dans la formation de leur personnel et certains bailleurs de fonds importants, notamment la Coopération Française, sont prêts à apporter une contribution multiforme.

Cet intérêt s'explique souvent par une notion de rentabilité. Les projets utilisant les systèmes d'informations géographiques (SIG) ou la télédétection sont généralement complexes et mettent en oeuvre des équipes pluridisciplinaires. Destinées à établir une synergie des compétences, ces équipes peuvent développer des situations conflictuelles et aboutir à un échec si les facteurs psychologiques n'ont pas été correctement appréhendés. Pour un coût minime au regard de celui du projet, une formation adaptée aux divers intervenants limitera ces risques d'échecs, donc de pertes financières.

Conclusion

De part sa situation géographique, Madagascar se trouve à l'écart des grands pôles de développement technologique. Des efforts importants de formation continue doivent donc être consentis pour maintenir un certain niveau de compétence. A ce titre, la formation continue devrait être un devoir pour tout organisme soucieux de son développement et de l'avenir de son personnel.

IV. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

IV.1. Synthèse

Les nouvelles technologies constituent des outils d'appoint à la recherche pour le développement. Elles ne peuvent toutefois se substituer à celles-ci. Dans la perspective du développement, leur utilisation doit s'inscrire dans une problématique finalisée.

Dans le domaine des ressources en eau, les apports des nouvelles technologies se situent à plusieurs niveaux ayant des liens de complémentarité :

- la mesure, soit les nouveaux capteurs,
- l'inventaire, soit les bases de données et les systèmes d'information géographique,
- l'analyse, soit la modélisation,
- les solutions, soit les systèmes d'aide à la décision.

Il s'agit d'une suite d'étapes permettant d'aboutir à des solutions rationnelles et efficaces. La mise en place de telles chaînes d'outils reste complexe et suppose un effort de coordination au niveau des équipements mais aussi de la formation.

La formation aux nouvelles technologies peut se faire selon deux modalités :

- formation de "spécialistes",
- formation de "généralistes".

Les nouvelles technologies connaissent une diversification croissante et tendent à devenir plus complexes. Cette évolution supposerait la formation de spécialistes maîtrisant parfaitement des outils. A l'inverse, on insiste de plus en plus sur la nécessité d'une approche globale, "environnementaliste", des problèmes relevant des ressources en eau. Cette tendance forte requiert au contraire la formation de généralistes capables d'appréhender, entre autres, les multiples apports mais aussi les limites d'utilisation des nouvelles technologies en matière d'études hydrologiques.

IV.2. RECOMMANDATIONS

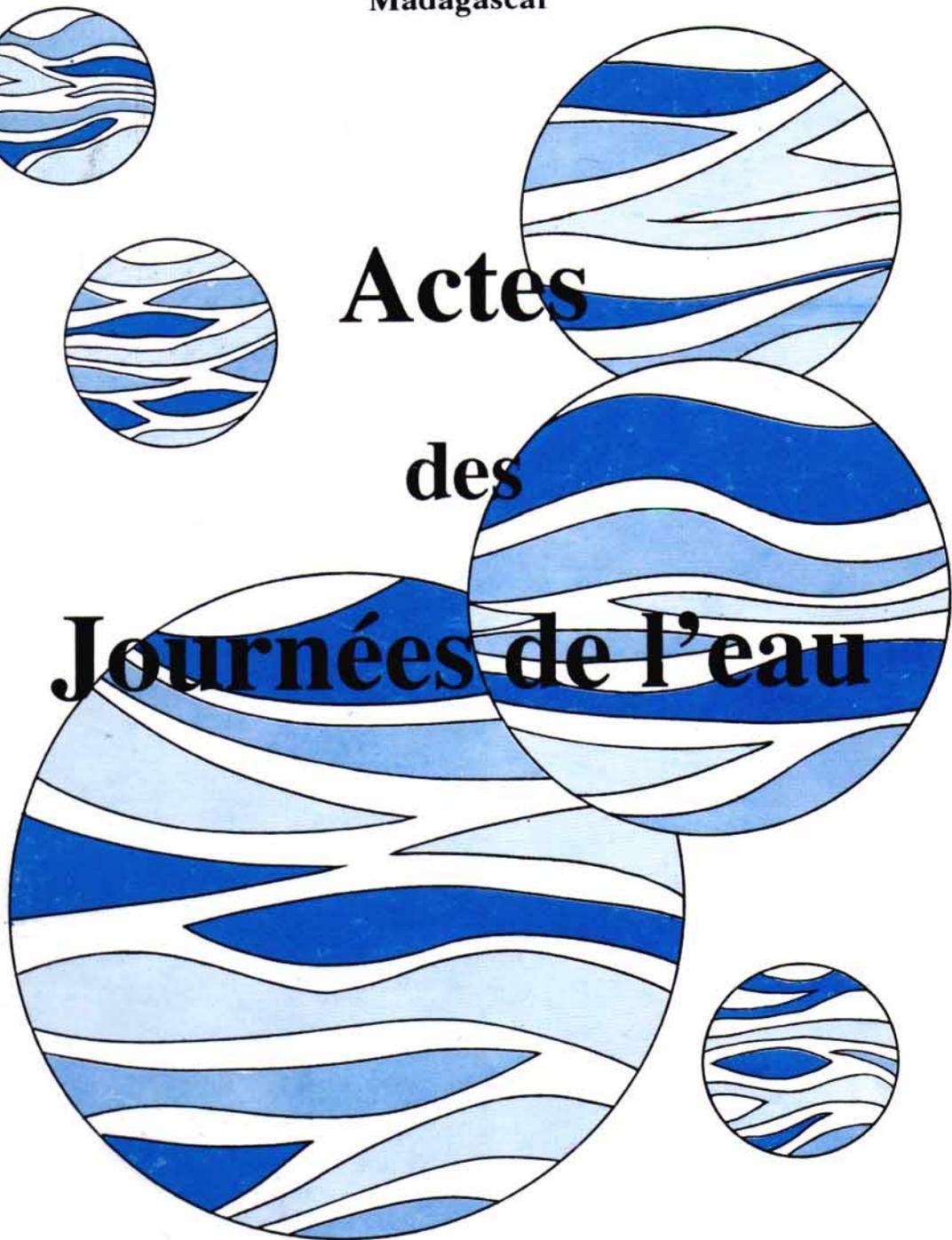
IV.2.1. Recommandations techniques

- Compléter le réseau de base avec des stations automatiques dans les lieux difficiles d'accès : pluviométrie sur les parties hautes des reliefs, débit sur les petits bassins.
- Coordonner les Bases de Données eaux de surfaces et eaux souterraines.
- Coordonner les équipements en matière de logiciel. Il est préférable, autant que faire se peut, d'utiliser des logiciels "standard" plutôt que des logiciels "maison". Une définition de format d'échange de données est également à recommander.
- Utilisation de nouveaux outils, en particulier la technologie radar, qu'apparaît prometteuse pour l'hydrologie (i.e. satellite ERS1 mais pas de station de réception sur la zone).
- Associer étroitement un volet formation aux nouvelles technologies à chaque programme de développement les utilisant.

IV.2.2. Recommandations sur la formation

- Formation de spécialistes : la formation doit se faire sur place sur des cas concrets afin de ne pas perdre contact avec la réalité.
- Formation de généralistes : formation permettant une approche globale des problèmes de développement faisant intervenir les ressources en eau.
- Formation continue : l'évolution rapide des techniques implique une remise à niveau constante aussi bien des spécialistes que des généralistes.

16 - 20 novembre 1992 Antananarivo
Madagascar



Actes
des
Journées de l'eau

Editeurs : Jean-Marc ELOUARD
Marta ANDRIANTSIFERANA