



document non public

PLANS DIRECTEURS ET SCHEMAS D'AMENAGEMENT DES EAUX

Guide méthodologique

M. STEIN

Décembre 1989
R 30452

EAU 4S 89

PR 9304800334

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
SERVICES SOL ET SOUS-SOL
Département Eau
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France - Tél. : (33) 38.64.34.34

R E S U M E

Etabli dans le cadre d'un financement issu du budget 1989 de la Recherche Scientifique, ce document se présente sous la forme d'un guide méthodologique d'aide à l'élaboration des documents de Gestion et de Planification des Eaux, à savoir les Plans Directeurs (P.D.) et/ou les Schémas d'Aménagement des Eaux (S.A.E.).

Ce guide se décompose en 2 parties :

- * La première partie "Conception de la Planification" présente les grandes lignes de l'élaboration d'un P.D. ou d'un S.A.E. Elle décrit sommairement les différentes composantes du système ainsi que les étapes nécessaires à l'établissement du bilan Ressources - Besoins. Ce volet met surtout en évidence les relations entre ces différentes composantes et donc la dynamique générale du processus en tant qu'outil de décision dans le cadre de la gestion des ressources en eau.

- * La deuxième partie se présente sous la forme d'annexes méthodologiques dans lesquelles sont analysées plus en détail les différentes composantes du système. A cette description s'ajoutera l'inventaire des données nécessaires à prendre en compte ainsi que l'inventaire des outils (logiciels, méthodologies...) utiles à l'exploitation de ces données ; ces annexes méthodologiques concerneront notamment :
 - le zonage en unités géographiques homogènes,
 - la description des sous-systèmes du bilan Ressources - Besoins,
 - l'analyse socio-économique des S.A.E.,
 - la définition des aménagements.

SOMMAIRE

PREMIERE PARTIE

S Y N T H E S E

	Pages
CONCEPTION DE LA PLANIFICATION	1
1. LE CHOIX D'UNITES GEOGRAPHIQUES ELEMENTAIRES	2
2. ANALYSE DES SYSTEMES DE RESSOURCES ET DE BESOINS	4
2.1. Les Ressources en eau	4
2.2. Les Besoins en eau	6
3. LA CONSTRUCTION DE SCENARIOS DE PROJECTION	7
4. LA CONFRONTATION RESSOURCES - BESOINS	8
5. LE CHOIX OPTIMAL DES AMENAGEMENTS	9

BIBLIOGRAPHIE

DEUXIEME PARTIE

DETAIL DES METHODES

- ◆ Chapitre 1 - Zonage
- ◆ Chapitre 2 - Besoins et Demandes
- ◆ Chapitre 3 - Evaluation des Ressources
- ◆ Chapitre 4 - Coûts Unitaires
- ◆ Chapitre 5 - Analyse Financière et Economique
- ◆ Chapitre 6 - Analyse multicritère
- ◆ Chapitre 7 - Programmation linéaire
- ◆ Chapitre 8 - Aménagements des Eaux

PREMIERE PARTIE

SYNTHESE

CONCEPTION DE LA PLANIFICATION

Les plans directeurs à élaborer doivent être conçus comme des guides d'action à moyen et long terme visant à accorder les interventions directes et indirectes de la puissance publique en matière d'aménagement et d'utilisation des eaux, avec les priorités fixées pour le développement socio-économique national et régional. Ils doivent donc prendre la forme, non de schémas uniques et rigides, mais d'ensembles cohérents d'options argumentées et chiffrées, adaptables à différentes inflexions de politique économique et constituant des éléments d'appréciation et de décision laissant aux autorités responsables la liberté de choix d'allocation des ressources dans l'espace et dans le temps.

La méthode appropriée à l'élaboration de plans directeurs telle qu'elle sera présentée lors de cette session, comprendra :

1. Le choix d'unités géographiques élémentaires où seront opérées les différentes analyses et confrontations.
2. L'analyse des systèmes de ressource et d'utilisation d'eau dans leur état actuel, qui déterminera à la fois les disponibilités potentielles et les contraintes structurelles inhérentes aux aménagements et aux utilisations présents.
3. La construction de scénarios différenciés de projection, à plusieurs horizons, des demandes en eau de toutes catégories (économiques et sociales) tendancielle ou plus ou moins volontaristes, selon différentes hypothèses d'orientation dirigée des demandes d'approvisionnement en eau (et d'évacuation conséquente).

4. La confrontation des systèmes actuels de ressource et d'utilisation avec les demandes futures, croisant l'approche par la demande (est-elle compatible avec la ressource ?) et l'approche par l'offre (comment utiliser au mieux la ressource ?), qui conduiront l'une et l'autre à projeter et évaluer :

- . les travaux d'aménagement et les ouvrages d'exploitation nécessaires ou souhaitables (structures, calendriers) ;
- . et/ou les interventions sur les demandes et les structures d'utilisation ;

et enfin à apprécier leur faisabilité pratique et économique.

5. L'analyse des techniques de choix et d'optimisation pour déterminer, en fonction de critères pré-définis (techniques, socio-économiques, politiques, etc.) par les autorités responsables, et compte tenu des objectifs prioritaires fixés par elles :

- . quels aménagements complémentaires et modes d'exploitation satisferaient au meilleur coût et avec le plus de sécurité les demandes prévues ?
- . quelles utilisations des ressources en eau disponibles apporteront le maximum de produit ou d'avantage économique, notamment au plan macro-économique ?

1 - LE CHOIX D'UNITES GEOGRAPHIQUES ELEMENTAIRES

Une étude comparative des besoins et des ressources en eau nécessite le choix d'un certain nombre d'unités géographiques assez contrastées entre elles tout en présentant de l'intérieur des caractéristiques homogènes qui puissent les individualiser. Ce sont dans ces unités que seront opérées les confrontations ressources/besoins. Le choix de ces unités peut ainsi se faire en deux temps :

- dans un premier temps, découpage en unités géographiques élémentaires selon des critères de choix pré-définis (critères "géographiques" essentiellement) ;
- dans un deuxième temps, regroupement des unités géographiques élémentaires ayant des caractéristiques socio-économiques similaires en zones homogènes.

Cette deuxième étape est tout à fait facultative, mais elle permet cependant de réduire notablement la quantité de données à traiter.

Dans le cadre d'un schéma d'aménagement des eaux, deux découpages sont possibles, l'un lié aux besoins, l'autre lié aux ressources.

Pour les sous-systèmes ressources, les limites des zones seront des limites naturelles, topographiques ou géologiques ; l'entité idéale étant le bassin versant hydrographique et/ou l'aquifère.

Pour les sous-systèmes besoins, les limites des zones seront administratives ; les entités possibles étant les communes, les cantons, les régions, bases des données économiques et démographiques.

Il faudra d'autre part tenir compte des principales structures techniques d'utilisation des eaux dans la mesure où celles-ci sont spatialement significatives à l'échelle des plans d'aménagement, comme par exemple :

- les périmètres d'irrigation avec leurs ouvrages de prise de distribution et de drainage ;
- les systèmes de distribution d'eau potable, réseaux d'assainissement et stations d'épuration ;
- les barrages, réservoirs, avec leurs ouvrages de prise et de restitution.

Le plus souvent la concordance entre le découpage administratif et les limites hydrographiques et hydrogéologiques est particulièrement mauvaise. Le principe de base le plus souvent adopté pour le zonage (du fait du problème de la collecte de l'information) admet la primauté des contraintes économiques sur les contraintes hydrauliques.

Cependant, le découpage de ces unités de confrontation ressources-besoins doit être un compromis basé sur plusieurs critères dit géographiques :

- . découpage administratif en communes,
- . limite des bassins versants hydrographiques et des aquifères,
- . découpage en réseaux de distribution d'eau des collectivités (syndicats ou communes),
- . découpage en régions agricoles traditionnelles.

De toute façon, les zones besoins et ressources ne coïncidant généralement pas, on sera amené au cours de l'établissement du bilan à opérer des transferts de données et d'informations entre les deux types de zones (quelle que soit la priorité donnée) :

- . soit transfert de données hydrologiques (débit entrant, débit sortant par exemple) entre entités administratives,
- . soit transfert de données économiques et démographiques entre entités de bassin (population "déplacée" par exemple).

La première solution étant souvent la plus simple (du moins du point de vue de l'analyse ressources-besoins car ce n'est pas forcément vrai au niveau des aménagements de mobilisation de la ressource) à mettre en oeuvre explique la primauté du découpage socio-économique sur le découpage hydrographique. Cependant, cette primauté pour le choix des unités de base de la confrontation ressources-besoins n'annule pas la nécessité de définir les limites des bassins versants hydrographiques et hydrogéologiques, base des données ressources.

L'échelle retenue pour chaque unité n'est pas sans conséquence sur la confrontation ressources/besoins. En effet, plus l'unité est étendue plus le terme "besoins" à prendre en compte est la consommation nette finale et non le prélèvement net afin de tenir compte des remobilisations possibles dans le bassin. Une approche, pratiquée dans certains pays, consiste d'ailleurs à ajouter les retours d'eau aux ressources naturelles pour les confronter aux prélèvements primaires ce qui, algébriquement revient au même mais gonfle le budget eau en comptant plusieurs fois certains flux.

A l'inverse, plus l'unité élémentaire est petite, plus le terme "ressources" risque d'être subordonné à la définition de nombreux flux entrants et sortants (avec des contraintes de débits réservés notamment) lorsqu'une rivière traverse ou tangente la zone.

Enfin, à petite échelle, l'appréhension de la démographie et de son évolution s'avère très délicate.

Une fois le découpage en unités de base opéré, un regroupement en zones homogènes s'avère intéressant si l'on veut réduire la quantité de données et de calculs à traiter. Cette démarche ne doit cependant pas affecter la qualité des confrontations ultérieures entre les ressources et les besoins. En effet, le regroupement en zones homogènes pose le problème du choix judicieux d'un ou plusieurs critères socio-économiques permettant de définir l'homogénéité ; ce peut être des critères de similitude (suivant certaines normes) et/ou des critères d'interdépendance (vis-à-vis de pôles socio-économiques).

2 - ANALYSE DES SYSTEMES DE RESSOURCES ET DE BESOINS

2.1. LES RESSOURCES EN EAU

Les inventaires des ressources hydrauliques d'une région ou d'un département se classent, à l'heure actuelle, en deux catégories assez distinctes :

- les inventaires à dominantes descriptives et statistiques,
- les modélisations complètes de systèmes hydrauliques particuliers (bassin hydrographique superficiel ou système de nappes).

Les premiers défrichent le terrain, les seconds sont souvent considérés comme l'aboutissement et la synthèse de reconnaissances approfondies menées sur le terrain. Dans ce document, nous n'aborderons que les inventaires du premier type.

Les inventaires à dominantes descriptives et statistiques peuvent être schématisés de la façon suivante :

Eaux de surface :

- recueil des données pluviométriques (stations météorologiques) et hydrométriques (stations de jaugeages permanentes, jaugeages occasionnels) ;
- homogénéisation des pluies et calcul des lames d'eau par bassin, par corrélation entre stations pluviométriques ;
- extrapolation des données de débits dans le temps aux différents points jaugeés par corrélations linéaires et non entre lames d'eau et débits ;
- extension de ces informations en tout point de la zone d'étude non jaugeée à l'aide de régressions multiples ;
- estimation des débits moyens en ces points (années, mois, décades ou même journées) et de la variabilité de ces débits ainsi que des ressources d'étiage (par exemple débits de la saison sèche, des 90 et des 30 jours secs consécutifs) assortis d'une probabilité d'occurrence.

Eaux souterraines :

- localisation dans l'espace des différents magasins aquifères reconnus ;
- jaugeage éventuel des exutoires apparents (sources), inventaire des points d'eau, captages, forages et volume des prélèvements ;
- tentative de bilan grossier par calcul de l'infiltration efficace à partir d'une formule d'évapotranspiration et estimation des volumes moyens annuels exploitables compatibles avec la recharge.

Notons que la méthode d'évaluation des ressources en eau, doit être adaptée non seulement aux données disponibles ou facilement appréhendables, mais surtout à la qualité des données utilisées parallèlement pour inventorier les besoins. Il convient en effet de veiller à ce que la précision des termes de chacun des bilans qui seront effectués soit aussi homogène que possible, ceci afin d'éviter toute investigation inutile.

Transferts d'eau :

- inventaire exhaustif des importations et exportations d'eau d'une zone à une autre.

Dans le cadre de cet inventaire des ressources, il s'agit également de préciser les investigations complémentaires nécessaires pour combler le manque (ou le peu de fiabilité) des données hydrologiques et hydrogéologiques.

2.2. LES BESOINS EN EAU

Les usages de l'eau étant multiples, les besoins actuels sont donc à recenser de façon précise dans chacune des catégories suivantes :

- besoins en eau potable en distinguant le milieu rural, le milieu urbain et si c'est le cas les populations touristiques ;
- besoins agricoles (irrigation et élevage) ;
- besoins industriels (fabrication, lavage, refroidissement, énergie électrique) ;
- besoins de la navigation fluviale (éclusées, transferts) ;
- besoins quantitatifs nécessaires au respect de certaines vocations (piscicole le plus souvent) déterminées lors de l'élaboration des objectifs de qualité.

Le calcul des besoins pourra être basé :

- soit sur les consommations nettes, auquel cas les besoins seront majorés d'un coefficient de perte lié au réseau de distribution ;
- soit sur les prélèvements nets d'eau brute.

D'autre part, ces besoins seront affectés d'un coefficient de pointe journalière ou saisonnière selon le type d'utilisation de l'eau. Ainsi pour l'alimentation en eau potable ce coefficient de pointe journalière pourra être de :

1,25 à 1,60 en zone urbaine
1,45 à 1,65 en zone péri-urbaine
1,65 à 1,75 en zone rurale
jusqu'à 3 pour les très petites collectivités.

L'estimation des besoins futurs résulte d'un travail d'analyse, d'homogénéisation et de mise au point des divers scénarios de développement.

Ainsi, pour l'eau potable, on cherche à apprécier les différents types de consommation, leurs valeurs annuelles, de pointe saisonnière et journalière ; on étudie aussi les échanges entre réseaux, les taux de raccordement et les rendements. L'évaluation de ces besoins dans le futur est faite à l'aide des études de développement démographique et des perspectives d'évolution des besoins unitaires ; il est tenu compte des schémas et plans d'aménagement pré-établis.

Pour les besoins agricoles, on estime les besoins en eau pour l'irrigation (étude des surfaces irriguées, des types de cultures, de l'époque des prélèvements) et pour le bétail. Pour le futur, les besoins aux divers horizons sont établis à l'aide d'hypothèses sur les perspectives de développement agricole et de développement de l'élevage dans la région.

En ce qui concerne les besoins industriels, l'analyse est faite par branche d'industrie. Leur évolution tient compte des possibilités de recyclage de l'eau. Les projections aux divers horizons sont établies en fonction du développement industriel (existence de zones industrielles) et de l'évolution prévue de la population active dans la branche industrielle.

Concernant la production d'énergie électrique, outre les besoins nets en eau de refroidissement (centrales thermiques classiques ou nucléaires), il convient d'accorder une vigilance particulière aux projets de centrales hydrauliques, et notamment de micro-centrales, en raison des risques d'annulation de l'écoulement ou de mise à sec de certains biefs en période d'étiage.

Ainsi qu'on l'a vu précédemment, le maintien d'un niveau de qualité acceptable en période de sécheresse pour le respect de certaines vocations peut nécessiter aussi la réservation de débits minimums admissibles dans les rivières. En l'absence de valeurs pré-déterminées qui ne peuvent résulter que de choix arbitraires traduisant le plus souvent un consensus local ou d'études approfondies, ces débits pourront dans une première étape être pris égaux aux débits minimums des 30 jours secs consécutifs de fréquence décennale ou à un pourcentage de ceux-ci.

3 - LA CONSTRUCTION DE SCENARIOS DE PROJECTION

La projection à moyen et à long terme (par exemple aux horizons 1990, 2000 et 2020) des différentes demandes en eau repose essentiellement sur celle des activités génératrices de besoins : population urbaine et rurale, taux de raccordement aux réseaux de distribution et "consommations unitaires" induites par les niveaux de vie, production agricole, productions industrielles des principales branches, production de services (tourisme, services collectifs), production énergétique (hydroélectrique, thermoélectrique), conservation de l'environnement en tant que milieu et cadre de vie. Ces demandes futures d'usages d'eau - y compris in situ - sont exprimées, comme les demandes actuelles, par les dimensions de quantité, de variabilité (saisonnalité et fréquence), de qualité, de sécurité et de sensibilité aux risques de défaillance, de coût maximal, de taux de consommation.

Les éventuels déficits actuels de satisfaction des besoins dus aux incapacités des usagers ou des systèmes de production d'eau sont pris en compte.

Cette approche analytique s'appuie sur l'ensemble des prévisions sectorielles déjà élaborées par les différents organismes compétents, et qui peuvent dans certains cas être actualisées ou révisées. Elle pourra être corroborée par une approche plus globale prenant en compte des "macro-indicateurs" de la demande en eau, tels que l'emploi ou le P.I.B. (produit intérieur brut).

Cette projection prend donc la forme de scénarios alternatifs :

- un scénario tendanciel correspondant à des évolutions prévisibles des besoins en eau des différents secteurs économiques, indépendamment les uns des autres et sans influence d'une éventuelle restriction de l'offre ;
- plusieurs scénarios dirigés correspondant à différentes évolutions des demandes - structure et croissance - selon différentes options de développement socio-économique, et différents degrés d'efficacité d'intervention volontaire d'économie d'eau ou d'introduction de technologies nouvelles d'usage de l'eau.

4 - LA CONFRONTATION RESSOURCES - BESOINS

La confrontation entre les systèmes actuels de ressource et d'utilisation et les demandes d'utilisation futures prévisibles ou projetables procède par "croisement" des deux approches par la demande et par l'offre (ressource).

- L'approche par la demande (en général la plus appropriée dans les conditions réelles des domaines considérés) vise, en confrontant aux systèmes actuels de ressource et d'utilisation analysés les scénarios de demande construits, à identifier dans chaque cas l'évolution des compatibilités et des écarts entre la demande projetée (dans ses différentes dimensions) et la ressource :
 - . tant entre les demandes d'approvisionnement (et d'évacuation), et dans certains cas de sécurité, et les structures techniques (équipements) et économiques d'exploitation et de distribution,
 - . qu'entre les actions de prélèvements, ou de restitution, induites prévisibles et le système de ressource aménagé actuel.

L'analyse prévisionnelle porte à la fois sur les compatibilités :

- . entre demande globale (et exploitations induites) et ressource, compte tenu de leurs structures et régimes respectifs, et des impacts des utilisations sur la ressource en aval des usages (impacts positifs ou négatifs) ;
- . entre demandes sectorielles ou locales différentes, compte tenu de leurs incidences particulières sur la ressource ;
- . entre demandes actuelles et futures.

Cette confrontation permet de prévoir les situations critiques (dans l'espace et dans le temps) et d'évaluer les pénuries d'eau structurelles ou conjoncturelles résultantes, appelant des actions préventives.

- L'approche par l'offre, d'orientation plus volontariste, vise à proposer plusieurs scénarios optionnels d'utilisation des disponibilités potentielles reconnues, considérées dans leurs différentes dimensions (situation, occurrence, en quantité et qualité) et réparties en classes d'accessibilité ou de difficulté pratique de mobilisation, compte tenu :
 - . de différentes hypothèses d'objectif prioritaire volontairement contrastées ;
 - . et de différentes contraintes de conservation ou de possibilités de transformation de modes d'exploitation et/ou d'usages d'eau présents.
- A chaque scénario, soit de satisfaction de demande projetée, soit de développement des ressources potentielles encore disponibles, correspond un schéma structural et un calendrier prévisionnel d'actions d'aménagement et d'exploitation, doublé d'un calendrier d'investissements et d'évolution des coûts de production d'eau par secteur.

L'élaboration des schémas techniques et l'évaluation des coûts afférents (investissement et fonctionnement) s'appuient sur l'ensemble des études de projets ou d'avant-projets existantes (actualisées en tant que de besoin et complétées si nécessaire par la prise en compte de variantes esquissées).

Ces schémas comportent des estimations de probabilité :

- . d'efficience des ouvrages, compte tenu des aléas d'occurrence des apports les plus irréguliers et des aléas de durée de service de certains équipements (envasement de réservoirs d'accumulation, vieillissement de forages) ;
 - . d'évolution des coûts, du fait de leur sensibilité à des facteurs non maîtrisables (comme le coût de l'énergie pour le pompage) et du fait des incertitudes de fréquence de remplacement de certains équipements.
- Enfin, chaque scénario d'aménagement et d'utilisation donne lieu à une évaluation des résultats économiques escomptés (productions de biens et services, emploi) et sociaux ainsi que des impacts induits ; ces résultats devant permettre d'effectuer des comparaisons et d'apprécier des faisabilités eu égard aux coûts, aux plans micro et macro-économiques.

5 - LE CHOIX OPTIMAL DES AMENAGEMENTS

La réalisation des différents aménagements nécessaires à la mise en valeur des ressources en eau dans les zones critiques se traduit par des coûts qu'il importe de minimiser. Ceci implique une programmation rationnelle des investissements reposant sur un schéma d'ensemble prenant en compte :

- les objectifs à satisfaire (prélèvements ou consommations nettes aux différents horizons rapportés en différents points d'allocations) ;
- les contraintes du système (ressources disponibles en différents points compte tenu des variabilités hydro-climatiques ;
- les solutions d'aménagement envisageables pour la mobilisation et l'utilisation de nouvelles ressources (barrages, champs captants, transferts de bassin à bassin, etc.) ; ces solutions pourront porter sur la réalisation de nouveaux aménagements mais également sur l'optimisation des aménagements actuels ;
- les coûts d'investissement et de fonctionnement de ces aménagements.

La combinaison des différentes solutions d'aménagement permettra d'élaborer différents schémas techniques.

Le coût global actualisé et l'échéancier de réalisation de chacun des schémas proposés seront alors précisés et pourront être paramétrés en fonction des taux d'actualisation ou d'amortissement ou des tarifs énergétiques.

Les techniques classiques d'optimisation (programmation linéaire et dynamique) sont appliquées à la détermination des scénarios qui satisferont le mieux le ou les objectifs prioritaires fixés selon les différentes options envisagées. Les contraintes internes ou externes imposées sont :

- soit la minimisation des coûts d'aménagement nouveau et/ou d'exploitation nécessités pour répondre aux demandes projetées ;
- soit la maximisation des utilisations actuelles selon des critères d'évaluation convenue (valorisation, emploi, effets sur la balance commerciale, degré obtenu d'auto-suffisance alimentaire ou énergétique,.....).

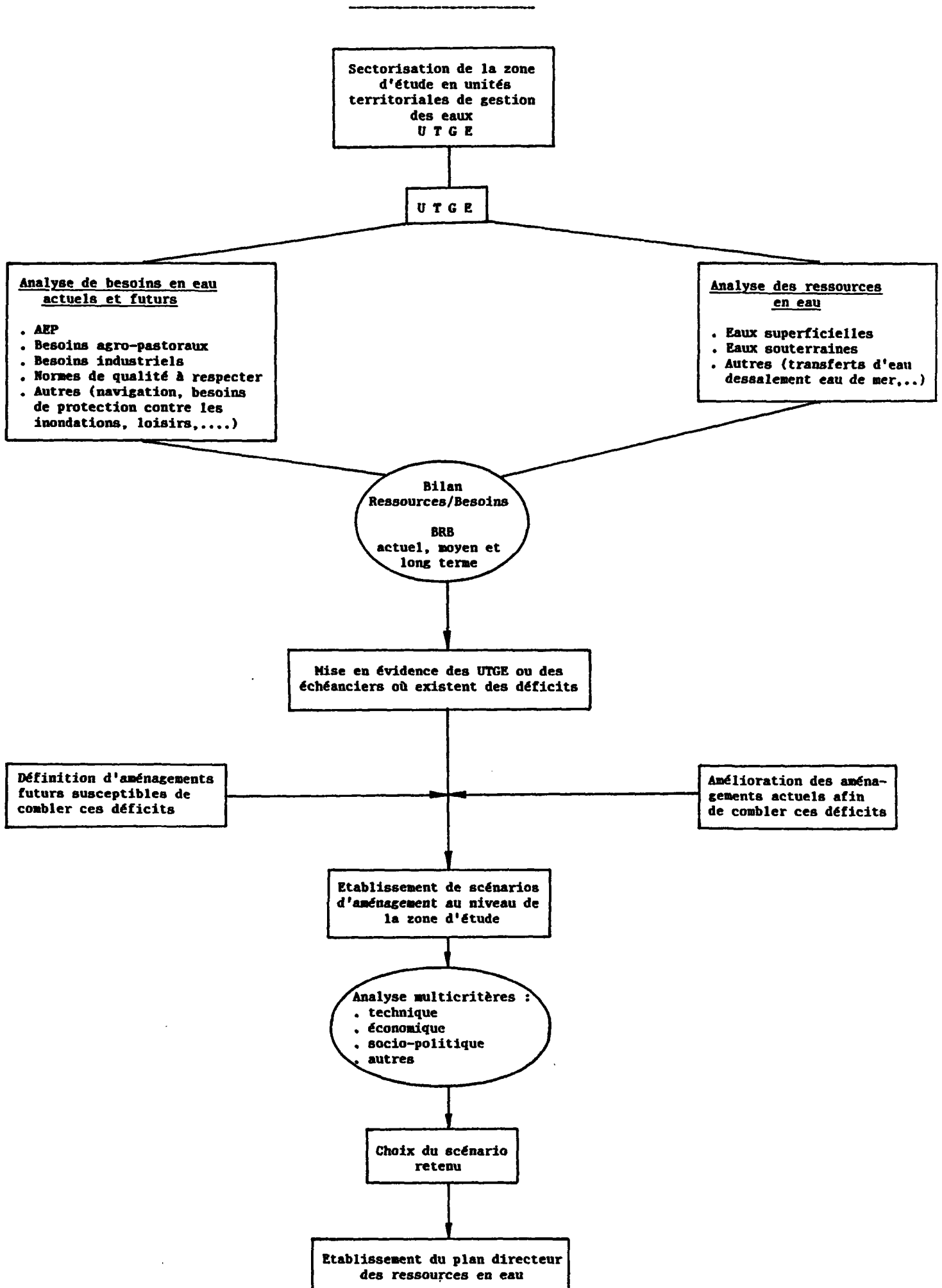
Le critère de moindre coût devrait en tout état de cause orienter la détermination de l'optimum et le choix des décideurs. Cependant, dans la réalité, un certain nombre d'autres paramètres (autres qu'économiques et techniques) peuvent entrer en jeu : importance stratégique et politique, objectifs socio-économiques, contraintes de financement, impact sur les usagers, etc.

Ainsi, une analyse multicritère en temps qu'outil d'aide à la décision s'avérera indispensable. Cette analyse faite sur support informatique permettra de prendre en compte les conséquences multiples des décisions envisagées.

Chaque schéma technique sera alors jugé par rapport aux autres, en fonction de critères choisis comme représentatifs par les décideurs ; cette démarche permettant de sélectionner le schéma retenu.

Enfin, un système de suivi de la mise en oeuvre de ce schéma peut être envisagé ; ce système devant permettre une actualisation ultérieure du plan (par des révisions périodiques) en y intégrant par exemple les résultats d'un nouveau recensement des données hydrologiques et hydrogéologiques plus récentes, un nouveau projet d'aménagement,

DEMARCHE TYPE D'UN PLAN DIRECTEUR DES RESSOURCES HYDRAULIQUES



BIBLIOGRAPHIE SUCCINCTE

OUVRAGES DE BASE

- ◆ DEZERT B., FRECAUT R. - 1978. L'Economie des Eaux Continentales. Aménagement et environnement. Editions SEDES.
- ◆ ERHARD-CASSEGRAIN A., MARGAT J. - 1982. Introduction à l'Economie générale de l'Eau. Editions MASSON.
- ◆ O.C.D.E. (collectif) - 1985. Gestion des projets d'aménagements des Eaux. Prise de décision et évaluation des investissements. Editions OCDE.
- ◆ UNESCO (collectif) - 1987. The process of water resources project planning. - a Systems approach. Editions UNESCO.
- ◆ VALIRON F. - 1984. Gestion des Eaux - Tome 1. Principes, moyens, structures. Presses de l'ENPC.

DEUXIEME PARTIE

DETAIL DES METHODES

CHAPITRE 1

ZONAGE

C H A P I T R E 1

SOMMAIRE

	Pages
1. UN ZONAGE, POURQUOI FAIRE ?	1
2. UN ZONAGE, COMMENT FAIRE ?	2

ZONAGE

Le Bilan des ressources et des besoins en eau ou BRB, permet de déterminer le déficit ou l'excédent en eau d'une commune, d'une région, d'un bassin versant ou d'un pays à un moment donné ou à un certain stade de développement économique. Un tel bilan qui se rapporte à la période actuelle peut donc servir à la prise de décisions concernant la **gestion** de l'eau. Un bilan prospectif, avec projection dans le futur, peut servir de base à la **planification** à plus long terme de l'exploitation des ressources en eau. L'établissement d'un BRB par comparaison des ressources en eau existantes et des besoins en eau actuels et/ou futurs suppose le choix d'un espace géographique de référence (référence spatiale du plan directeur), appelé unité territoriale de gestion de l'eau ou UTGE.

1 - POURQUOI FAIRE ?

La méthodologie d'établissement d'un BRB peut s'appliquer à l'ensemble de la zone d'étude sur laquelle on veut établir un schéma d'aménagement ou un plan directeur (figure 1).

Cependant, plus la zone est étendue (région ou pays par exemple) moins le BRB s'avère un outil intéressant pour la politique de l'eau. En effet, dans le cas où l'étude met en évidence un BRB globalement excédentaire (ou équilibré), il n'est pas certain qu'à l'intérieur de la zone la répartition de la ressource soit adéquate et que des pénuries structurelles n'existent pas (actuellement ou n'existeront pas dans le futur) ponctuellement.

A l'opposé, un BRB déficitaire implique des décisions de restriction d'usage (qu'on sera forcé d'appliquer à l'ensemble des usagers de l'eau faute de localisation plus précise du déficit) et de recherche de nouvelles ressources endogènes et/ou exogènes (qu'on ne saura pas affecter de façon précise et rationnelle).

D'où l'intérêt d'opérer un découpage de la zone d'étude en unité de base appelé UTGE aussi fin que possible (figure 2). En effet, plus cet espace géographique de référence est réduit plus il est possible d'établir un BRB relativement précis. Cependant, dans la pratique on cherchera un compromis entre la finesse souhaitable de l'analyse du BRB et la quantité des calculs et données à traiter. En fait ce sont bien souvent le cadre des données socio-économiques et/ou physico-hydrologiques qui définit l'échelle même du découpage.

2 - UN ZONAGE, COMMENT FAIRE ?

Une étude comparative des besoins et des ressources en eau nécessite le choix d'un certain nombre d'unités géographiques assez contrastées entre elles tout en présentant de l'intérieur des caractéristiques homogènes qui puissent les individualiser. Ce sont dans ces unités que seront opérés les BRB. Le choix de ces unités peut ainsi se faire en deux temps :

- dans un premier temps, découpage en UTGE selon des critères de choix prédéfinis (critères "géographiques" essentiellement) ;
- dans un deuxième temps, regroupement des UTGE ayant des caractéristiques socio-économiques similaires en zones homogènes.

Cette deuxième étape est tout à fait facultative, mais elle permet cependant de réduire notablement la quantité de données à traiter.

2.1. DECOUPAGE EN UTGE

Dans le cadre d'un schéma d'aménagement des eaux, deux découpages sont possibles, l'un lié aux besoins l'autre lié aux ressources.

Pour les sous-systèmes ressources, les limites des zones seront des limites naturelles, topographiques ou géologiques ; l'entité idéale étant le bassin versant hydrographique et/ou l'aquifère.

Pour les sous-systèmes besoins, les limites des zones seront administratives ; les entités possibles étant les communes, les cantons, les régions, bases des données économiques et démographiques.

Il faudra d'autre part tenir compte des principales structures techniques d'utilisation des eaux dans la mesure où celles-ci sont spatialement significatives à l'échelle des plans d'aménagement, comme par exemple :

- les périmètres d'irrigation avec leurs ouvrages de prise de distribution et de drainage,
- les systèmes de distribution d'eau potable, réseaux d'assainissement et stations d'épuration,
- les barrages, réservoirs, avec leurs ouvrages de prise et de restitution.

Le plus souvent la concordance entre le découpage administratif et les limites hydrographiques et hydrogéologiques est particulièrement mauvaise. Le principe de base le plus souvent adopté pour le zonage (du fait du problème de la collecte de l'information) admet la primauté des contraintes économiques sur les contraintes hydrauliques.

Cependant, le découpage de ces unités de confrontation ressources-besoins doit être un compromis basé sur plusieurs critères dit géographiques :

- . découpage administratif en communes,
- . limite des bassins versants hydrographiques et des aquifères,
- . découpage en réseaux de distribution d'eau des collectivités (syndicats ou communes),
- . découpage en régions agricoles traditionnelles.

De toute façon les zones besoins et ressources ne coïncidant généralement pas, on sera amené au cours de l'établissement du BRB à opérer des transferts de données et d'informations entre les deux types de zones (quelque soit la priorité donnée) :

- . soit transfert de données hydrologiques (débit entrant, débit sortant par exemple) entre entités administratives,
- . soit transfert de données économiques et démographiques entre entités de bassin (population "déplacée" par exemple).

La première solution étant souvent la plus simple (du moins du point de vue de l'analyse ressources-besoins car ce n'est pas forcément vrai au niveau des aménagements de mobilisation de la ressource) à mettre en oeuvre explique la primauté du découpage socio-économique sur le découpage hydrographique. Cependant, cette primauté pour le choix des unités de base de la confrontation ressources-besoins n'annule pas la nécessité de définir les limites des bassins versants hydrographiques et hydrogéologiques, base des données ressources.

L'échelle retenue pour chaque unité n'est pas sans conséquence sur la confrontation ressources/besoins. En effet, plus l'unité est étendue plus le terme "besoins" à prendre en compte est la consommation nette finale et non le prélèvement net afin de tenir compte des remobilisations possibles dans le bassin. Une approche, pratiquée dans certains pays comme Israël ou l'Afrique du Sud, consiste d'ailleurs à ajouter les retours d'eau aux ressources naturelles pour les confronter aux prélèvements primaires ce qui, algébriquement revient au même mais gonfle le budget eau en comptant plusieurs fois certains flux.

A l'inverse, plus l'unité élémentaire est petite, plus le terme "ressources" risque d'être subordonné à la définition de nombreux flux entrants et sortants (avec des contraintes de débits réservés notamment) lorsqu'une rivière traverse ou tangente la zone.

Enfin, à petite échelle, l'appréhension de la démographie et de son évolution s'avère très délicate.

Les données et outils nécessaires à ce zonage sont :

- pour les zones ressources, les limites des bassins hydrographiques ou hydrogéologiques, une cartographie détaillée ou une imagerie aérienne et/ou satellite permettent d'obtenir ces données ; une carte au 1/25.000ème ou 1/50.000ème est ainsi largement suffisante. Dans le cas d'inexistence de cartographie détaillée l'imagerie SPOT peut pallier ce manque mais pour un coût très supérieur (20.000 F sans exploitation et pour une zone d'étude de 60 x 60 km). Aussi, son utilisation ne peut être envisagée raisonnablement, que dans une zone restreinte, et au cas où cette image est utilisée ultérieurement dans le cadre du plan directeur (par exemple, inventaire des types de cultures, des terres irrigables et/ou irriguées, ...).

Notons d'autre part, qu'en zone accidentée et homogène une seule image SPOT est suffisante pour définir la ligne de partage des eaux. En zone peu accidentée et non homogène il faudra envisager une analyse stéréoscopique (donc 2 images) ;

- pour les zones besoins, les limites des unités administratives et le découpage en réseau de distribution d'eau. Si la cartographie permet de définir les unités administratives, les caractéristiques des réseaux devront être recherchées auprès des gestionnaires de ces réseaux (administrations, collectivités locales, entreprises de distribution privées,...).

La définition des UTGE découlera donc de la superposition des deux zonages précédents (ressources et besoins).

2.2. REGROUPEMENT EN ZONES HOMOGENES

Une fois le découpage en UTGE opéré, un regroupement en zones homogènes s'avère intéressant si l'on veut réduire la quantité de données et de calculs à traiter. Cette démarche ne doit cependant pas affecter la qualité des confrontations ultérieures entre les ressources et les besoins. En effet, le bassin de zones homogènes pose le problème du choix judicieux d'un ou plusieurs critères socio-économiques permettant de définir l'homogénéité. Deux classes de critères sont possibles :

- des critères de similitude : choix de normes de similitude permettant de regrouper en une même zone les UTGE contigus ayant une structure voisine, ces normes pouvant être très diverses : densité de population voisine, même structure de consommation et d'alimentation en eau,...
- des critères d'interdépendance : l'approche en terme d'interdépendance repose sur la notion d'échanges socio-économiques entre UTGE ; sera donc considéré comme homogène l'ensemble des UTGE dépendant d'un même centre économique (répartition des pôles d'activités industrielles allant souvent de pair avec les indices de croissance démographique).

La liste de ces critères n'est nullement limitative et dépendra le plus souvent des cas étudiés.

Les données et outils nécessaires à l'établissement et à la quantification de ces différents critères sont en fait analysés dans le cadre de l'évaluation des besoins et des ressources en eau. Aussi, est-il normal que le regroupement des UTGE en zones homogènes se fasse en parallèle et se dégage progressivement des résultats de l'analyse des besoins et des ressources.

De plus, la référence spatiale "appropriée" choisie initialement pour confronter ressources et besoins peut s'avérer insuffisante au cours du processus d'élaboration d'un plan directeur, notamment lorsque cette confrontation fait apparaître des inadéquations nécessitant des transferts d'eau à certains horizons, ce qui revient à élargir éventuellement l'unité de base. Cet élargissement, procédant de l'élaboration du plan même, ne pouvait en constituer une donnée de départ ; on touche là du doigt le caractère adaptatif et "itératif" par ajustements successifs du processus de conception d'un plan. Le choix initial n'a que la valeur d'une hypothèse de travail.

Figure 1 : Démarche globale

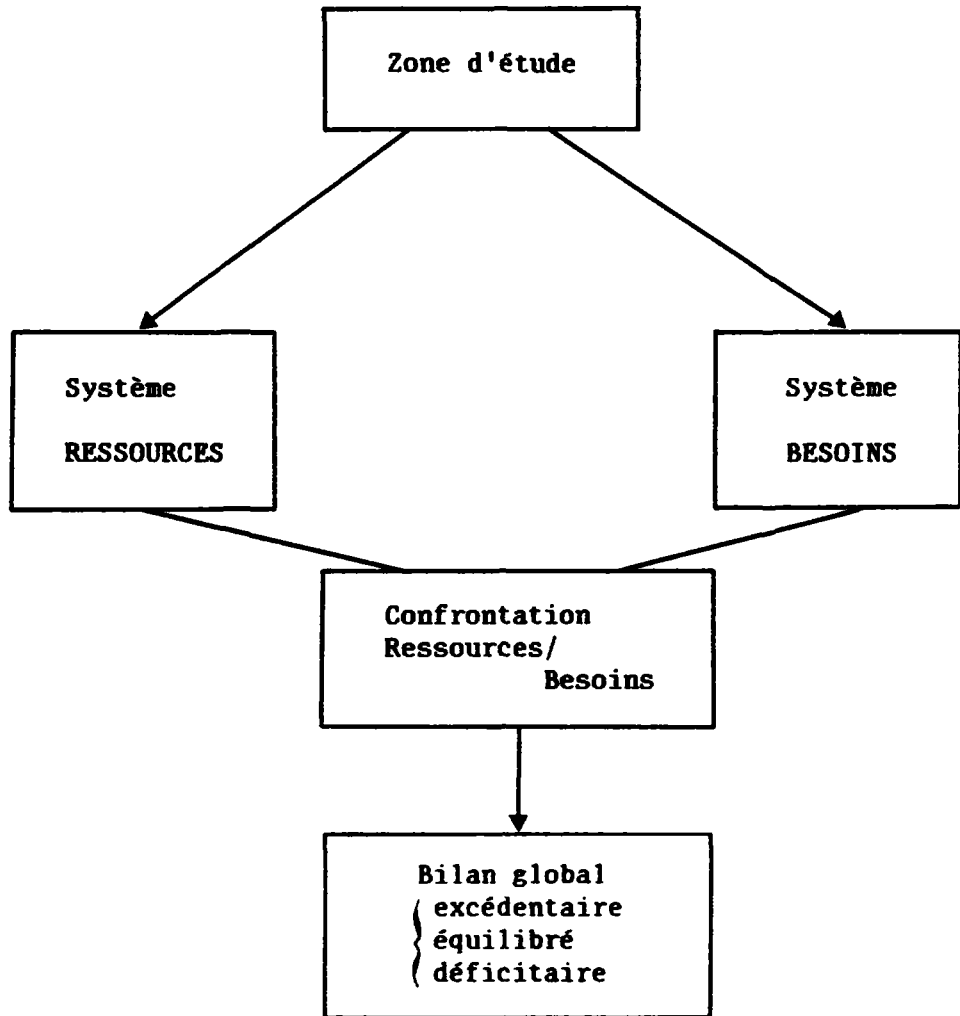
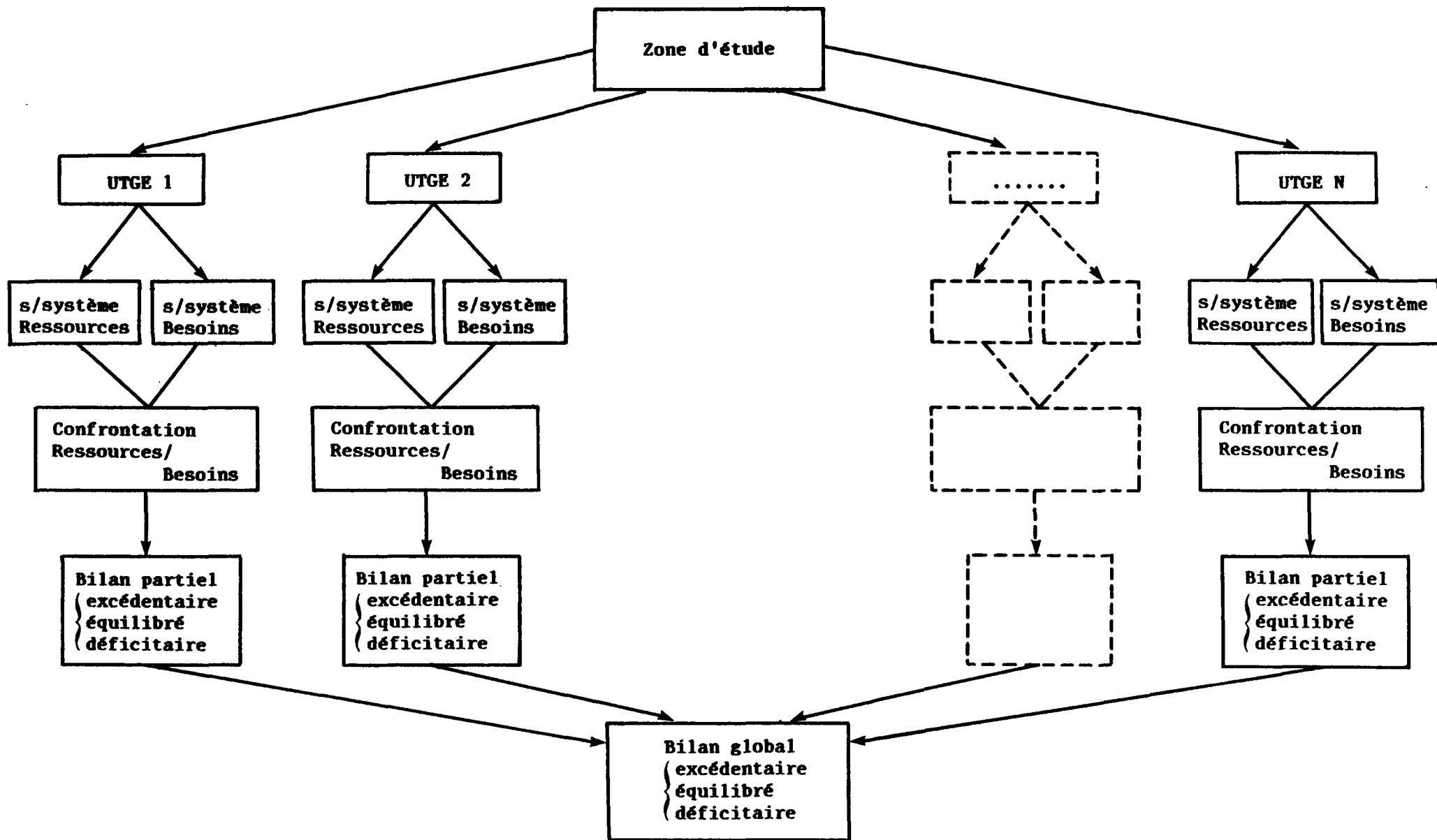


Figure 2 : Démarche par UTGE



CHAPITRE 2

BESOINS ET DEMANDES

C H A P I T R E 2

SOMMAIRE

	Pages
1 - LES BESOINS EN EAU	3
1.1. Les Besoins en eau des régions urbaines	3
1.2. Les Besoins en eau des régions rurales	5
1.3. Les Besoins en eau industrielle	8
1.4. Les Besoins en qualité	9
1.5. Les Autres Besoins	11
2 - ANALYSE PROSPECTIVE DES BESOINS	11

BESOINS ET DEMANDES

Par essence, le concept de besoin diffère de celui de demande en ce qu'il est abstrait, idéal et théorique alors que la demande, en tant qu'action est directement observable.

Les besoins en eau, conçus comme nécessités, ont un caractère absolu. Ils sont définis par des normes déterminées pour un niveau technique donné et pour des objectifs démographiques et économiques à atteindre. Ces normes peuvent être, soit des normes de quantité, soit des normes de qualité. Les besoins en quantité sont en principe rapportés aux unités d'emploi de l'eau et/ou de produit (besoins unitaires) alors que les normes de qualité sont le plus souvent des valeurs limites absolues à respecter.

De façon traditionnelle les demandes en eau sont les volumes d'eau, considérés nécessaires (en quantité et en qualité) pour atteindre l'objectif de production ou de consommation pour les différents usages. Ce sont donc des flux d'eau prélevés et/ou restitués au système de ressource -ou utilisées in situ- en tant que conséquence de l'activité des différentes unités de gestion du système d'utilisation.

Dans le cas général des utilisations caprices, et en considérant l'amont des usages, il convient de distinguer :

- les demandes d'**approvisionnement** en eau, déterminées au stade de l'entrée en usage, c'est-à-dire les quantités et qualités d'eau voulues et/ou effectivement obtenues (ou directement appropriées) et employées par les usagers ;
- les demandes de **prélèvements** qui affectent le milieu naturel.

Les premières diffèrent des secondes en quantité :

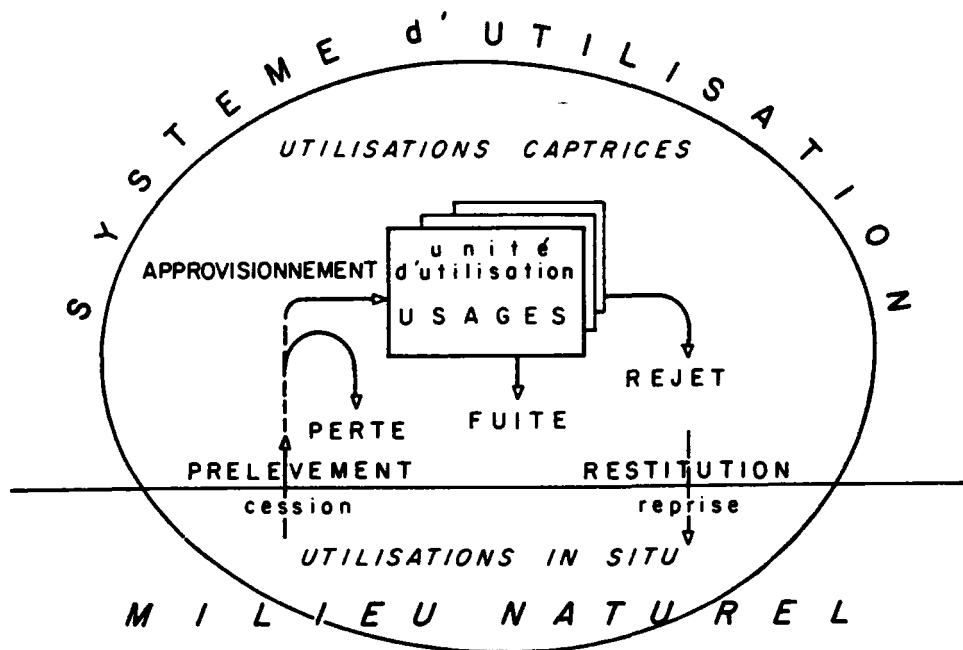
- par les **pertes** en réseaux ;
- par les écarts et déphasages de **régime de variations** dans le temps (les stockages amortissent plus ou moins les effets des variations des premières sur celles des secondes).

- et aussi, tant en quantité qu'en qualité, par les distorsions que le mode de distribution peut imposer.

De même, en aval des usagers, on distinguera :

- les demandes d'évacuation (ou rejet) d'eau usée, déterminées à l'issue des activités économiques d'emploi de l'eau et traduites par des demandes d'assainissement,
- les demandes de restitution au milieu naturel (associé éventuellement à un prélèvement en qualité sollicitant le milieu).

En termes de quantité (flux) chacun de ces concepts peut prendre la signification d'une entrée et d'une sortie selon le système d'utilisation que l'on peut schématiser comme ci-après.



En tant qu'outil de gestion de l'eau permettant la définition d'une politique à long terme, un schéma d'aménagement privilégiera l'approche macro-économique par les besoins ; l'analyse des demandes permettant de définir ou de confirmer les normes de consommation unitaires préconisées.

1 - LES BESOINS EN EAU

Dans cette présentation des besoins en eau, on étudiera tout d'abord les besoins qui impliquent une consommation nette (ou tout au moins partielle de l'eau) qui est ainsi soustraite provisoirement au cycle général de l'eau - besoins domestiques et publics avec pertes dues à l'absorption humaine, besoins agricoles avec pertes liées à la consommation animale et surtout au phénomène d'évapotranspiration, besoins industriels enfin avec pertes dues à l'évaporation physique et à l'emploi de l'eau comme matière première. Les besoins en eau seront également envisagés sous l'angle de la qualité et suivant les différents usages de l'eau.

1.1 - LES BESOINS EN EAU DES REGIONS URBAINES - L'EAU POTABLE

L'eau est utilisée en milieu urbain d'abord comme élément vital pour les besoins physiologiques, puis comme moyen de lavage et comme solvant pour divers besoins domestiques et publics, enfin comme vecteur des déchets. Dans une évaluation des besoins en eau des régions urbaines, il faut opposer nettement les besoins domestiques, propres à l'individu et les besoins publics. Par suite des conditions de distribution, toute l'eau fournie est potable, alors que certains besoins domestiques et publics n'exigeraient pas une eau de qualité aussi élevée, une redoutable concurrence s'est instaurée dans certains pays industrialisés entre eau potable et eau minérale.

1.1.1 - Les besoins domestiques

Les **besoins domestiques** en eau sont ceux qui se sont le moins accrus au cours des dernières décennies. En effet, ce sont d'abord les **besoins physiologiques** du corps humain, qui est constitué d'eau pour les 2/3 ou les 3/4 de son poids, soit 50 litres environ. Cette quantité d'eau doit être strictement maintenue sous peine de troubles graves ou à terme de menace de mort. Cette eau physiologique est renouvelée toutes les 5 semaines environ à raison de 2 litres par jour. Evacuée tous les jours, cette eau est remplacée pour moitié par la boisson, pour moitié par les aliments et par l'eau fabriquée par le corps lui-même. L'**eau potable** stricto sensu, exigée par l'homme, ne représente donc qu'un très faible volume, 1 à 2 litres par jour sous des climats relativement humides. En milieu chaud et sec, ce besoin d'eau directement absorbable par l'homme s'accroît considérablement et peut atteindre jusqu'à 10 litres par jour.

Il faut joindre à cette eau pour la boisson, l'**eau destinée à la préparation des aliments**, soit également 1 à 2 litres/personne/jour. Mais les besoins domestiques sont surtout représentés par l'eau destinée à l'hygiène des personnes et de l'habitation (y compris les animaux domestiques, à l'exclusion des animaux d'élevage), à l'arrosage des jardins d'agrément ou potagers. Les besoins en eau d'une habitation sont proportionnels au nombre de personnes vivant dans le foyer, aux superficies desservies (habitables ou non), ou degré de confort effectif. Ainsi, jadis en milieu rural avec un confort limité, 20 à 30 l/personne/jour suffisaient pour la boisson, les ablutions et les menus lavages. L'homme des pays développés utilise toujours 2 à 4 l/jour pour sa boisson et le lavage de ses aliments (encore qu'il préfère souvent l'eau minérale à l'eau potable), mais ses autres besoins en eau ont considérablement augmenté (200 litres pour un bain, 25 l pour une douche, 50 l pour le lave-vaisselle, 100 l pour la machine à laver le linge...) et ils atteignent en moyenne 140 l/personne/jour, soit 37 à 63 m³/an contre 15 m³/an au maximum dans le passé.

1.1.2 - Les besoins publics

L'eau destinée aux besoins publics : entretien des services publics (administrations, écoles, hôpitaux, terrains de sport, hôtels, abattoirs...) arrosage des rues et des espaces verts, extinction des incendies, entretien des locaux, a vu sa demande s'accroître depuis la fin du XXe siècle aussi bien dans les petites villes que dans les grandes. Ces besoins sont desservis par de l'eau potable et de l'eau brute.

Aux besoins domestiques directs en France (140 l/personne/jour) s'ajoutent donc des besoins d'au moins 200 l/personne/jour, soit un total de 350 l/jour/habitant, soit 130 m³/habitant/an environ. Ces besoins sont largement dépassés dans les grandes agglomérations et ils se répartissent à peu près comme suit - 2/3 pour celle des ménages, 1/3 pour celle des commerces et des autres usagers collectifs, ainsi que des services municipaux ; les besoins domestiques et publics atteignent ainsi de 400 à 900 l/jour/habitant.

Si les besoins domestiques sont les plus faibles, spécialement ceux concernant la boisson, ils n'en posent pas moins un sérieux problème économique, celui de l'eau potable et de l'eau minérale.

1.1.3 - L'eau potable

Pour pouvoir être considérée comme potable, une eau d'origine superficielle ou souterraine doit satisfaire à différentes conditions définies par le législateur : absence d'organismes parasites ou pathogènes et de streptocoques, absence d'algues et turbidité faible, absence de pollution chimique reconnue et de produits toxiques qui doivent rester à très faible teneur (plomb, sélénium, fluorures, arsenic, cuivre, fer, manganèse) ou à l'état de traces (chrome, cyanure). Par ailleurs, la minéralisation totale ou salinité de l'eau potable doit être inférieure à 2 g/l, son taux de radioactivité doit être faible et elle ne doit présenter aucune odeur ou saveur.

Les usines de traitement des eaux, fluviales le plus souvent, pour l'alimentation en eau des villes, gérées par des collectivités urbaines ou par des sociétés privées, doivent donc assurer une qualité des eaux parfaite, souvent supérieures à celle de l'eau minérale. Des normes internationales (OMS, CEE) et nationales (décret de 1961 en France) fixent les conditions de "potabilité" d'une eau et le rythme des contrôles : chaque mois dans le cas des villes de moins de 20 000 habitants, tous les deux jours dans le cas des villes de plus de 100 000 habitants. En milieu rural, les contrôles sont évidemment moins fréquents.

En conclusion, les besoins en eau des collectivités varient considérablement selon l'évolution socio-économique des pays considérés. Limités à quelques l/jour/habitant pour des nomades de pays en voie de développement, les besoins en eau peuvent s'élever à près de 1 000 l/jour/habitant pour les citoyens des grandes métropoles des pays industrialisés. Il s'accroissent donc avec le niveau des individus, mais également avec la taille des collectivités humaines et donc avec le degré de concentration urbaine. Les besoins globaux en eau potable sont néanmoins modestes en comparaison des besoins en eau agricole et surtout en eau industrielle.

1.2 - LES BESOINS EN EAU DES REGIONS RURALES - L'EAU AGRICOLE

L'eau d'irrigation, qu'elle soit utilisée par gravité, par submersion, par aspersion, sert à satisfaire l'activité biologique optimale des plantes, lorsque l'humidité du sol, provenant de la pluie, est insuffisante. L'eau agricole vient donc en complément de l'eau de pluie. Comme il a été indiqué en introduction, on ne traitera pas ici des techniques d'utilisation de l'eau dans l'agriculture ou des techniques d'irrigation. Les besoins en eau de l'élevage sont assez modestes par rapport à ceux des cultures. Il faut noter, enfin, que du point de vue qualitatif, l'irrigation exige des eaux sans minéralisations excessives, car les sels en s'accumulant dans les sols pourraient diminuer le potentiel productif de ces sols ; les eaux polluées chimiquement sont donc le plus souvent impropres à une utilisation agricole.

Certains auteurs regroupent sous le terme générique d'irrigation toutes les techniques d'utilisation de l'eau dans l'agriculture, soit des techniques gravitaires traditionnelles par infiltration, ruissellement ou submersion, soit les techniques les plus récentes, de l'aspersion ou de l'irrigation localisée (goutte à goutte notamment). Les pertes en eau, donc la consommation nette, varient selon les techniques utilisées. Elles sont de 20 à 30 % pour l'irrigation par infiltration à la raie et de 30 % pour la submersion ; elles sont quasiment nulles par la technique du goutte à goutte et varient de 20 à 100 % pour l'aspersion.

Après avoir défini de façon générale les besoins en eau des plantes et secondairement des animaux, on insistera sur les caractères récents de l'utilisation de l'eau dans l'agriculture et sur l'augmentation des besoins qui en découle.

1.2.1 - Les besoins en eau essentiels des cultures

Les besoins en eau des plantes ont été définis par les botanistes, les agronomes et les forestiers, à partir de mesures en laboratoire ou in situ et surtout de façon plus empirique mais plus rapide à partir de la notion d'évapotranspiration potentielle ou ETP, pour laquelle de nombreuses formules adaptées à divers domaines climatiques ont été proposées, mais qu'il n'est pas question d'envisager ici.

L'évapotranspiration potentielle se place dans le cadre du bilan hydrique au sens strict, donc des relations entre l'eau, le sol et les plantes. Elle est constituée tout d'abord par l'évapotranspiration physique au niveau du couvert végétal et du sol (dans la mesure où le couvert végétal n'est pas totalement continu en permanence). Elle est constituée ensuite par la transpiration physiologique. Ces 2 phénomènes se réalisent si l'alimentation en eau des plantes (précipitations et donc réserves en eau du sol) est suffisamment abondante pour satisfaire à tout moment de l'année (donc en particulier en saison sèche en domaine tropical humide ou sahélien et en période sèche en domaine tempéré océanique) le pouvoir évaporant de l'atmosphère et la transpiration maximale des plantes.

L'évapotranspiration potentielle recouvre donc en réalité plus que la transpiration physiologique des plantes, qui, elle seule, traduit véritablement le besoin en eau de ces plantes, puisqu'elle correspond à un prélèvement d'eau dans le sol. Cette eau qui véhicule les sels minéraux indispensables à la croissance des plantes, est fixée pour partie par les tissus végétaux et est rejetée sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère, soit en permanence, soit saisonnièrement selon la longueur du cycle végétatif. Quand le couvert végétal est continu au sol, l'évapotranspiration potentielle traduit pour l'essentiel la transpiration physiologique et donc les besoins effectifs en eau des plantes pour leur développement maximal.

Cette notion optimale se place ainsi dans une optique de recherche de rentabilité dans les cultures et donc de rendements maximaux.

L'évapotranspiration potentielle permet alors de définir le déficit en eau des plantes par simple soustraction entre leurs besoins maximaux et les apports effectifs des réserves des sols. Ce sont ces besoins maximaux pour un développement optimal qui sont généralement connus et exprimés en hauteurs d'eau (mm) ou mieux en volume pour une surface donnée (ha) ou en volume pour un tonnage de production donné (kg ou t).

On dispose ainsi de valeurs des besoins maximaux en eau de certaines plantes (apports naturels à compléter éventuellement par des apports d'eau d'irrigation), correspondant surtout aux régions tempérées océaniques ou méditerranéennes. Il s'agit de valeurs moyennes, car ces besoins sont variables dans le temps et dépendent étroitement des conditions climatiques, thermiques et pluviométriques. Un hectare de pommes de terre exige ainsi 3 à 5 millions de litres d'eau par an, un hectare de betteraves, 4 millions de litres, un hectare de tomates ou de citrons, d'orangers, 5 à 6 millions de litres, un hectare de blé de 4 à 8 millions de litres, un hectare de luzerne de 8 à 9 millions de litres et un hectare de riz près de 12 millions de litres. Exprimés d'une autre façon, les besoins en eau sont de 25 litres pour 1 kg de salade, de 1100 litres pour 1 kg de fourrage vert, de 1500 litres pour 1 kg de blé, de 4500 litres pour 1 kg de riz et 10 000 litres pour 1 kg de coton.

1.2.2 - Les besoins en eau secondaires de l'élevage

Ces besoins sont moins bien connus ; ils varient selon le mode d'organisation de la production animale : **individuelle** dans de petites exploitations, **collective** dans des groupes de fermes ou **industrielle** dans de grands complexes de production, d'élevage et d'engraissement des animaux, en système "libéral" ou socialiste. Qualitativement, l'eau destinée à l'élevage exige des caractères chimico-biologiques proches de ceux de l'eau destinée aux besoins humains.

Les besoins en eau pour l'élevage ne sont pas considérables, ils seraient pour la boisson et l'entretien des animaux de seulement 10 l/jour pour le mouton, de 15 l/jour pour le porc, de 50 l/jour pour le cheval et de 120 l/jour pour la vache laitière. Les besoins en eau de l'agriculture sont donc surtout liés à l'irrigation des plantes cultivées.

1.2.3 - L'évolution récente de l'utilisation de l'eau dans l'agriculture et l'augmentation des besoins en eau agricole

La demande en eau de l'agriculture mondiale est de plus en plus importante ; elle tient à l'évolution technique de l'agriculture, à la recherche de rendements de plus en plus élevés par suite de l'accroissement des besoins alimentaires en relation avec l'augmentation de la population.

Autrefois, on se contentait d'alimenter en eau les terres sèches, c'est-à-dire celles qui, dans les régions arides, semi-arides ou méditerranéennes, manquaient d'eau une grande partie de l'année et ne pouvaient assurer en permanence ou saisonnièrement le développement normal des plantes. Actuellement, on utilise de l'eau pratiquement partout, même dans les régions océaniques réputées humides, en dehors des périodes de sécheresse exceptionnelle, ceci afin d'accroître les rendements au maximum alors qu'autrefois dans ces régions on se contentait des réserves en eau du sol, si irrégulières soient-elles. Ainsi, on irrigue stricto sensu beaucoup plus que jadis dans les régions à sécheresse marquée, mais on asperge partout, en France, du Nord au Sud et de l'Est à l'Ouest, les prêtres, les plantations de maïs, de légumes, les vergers, les vignes... Il ne s'agit pas évidemment du système d'irrigation traditionnel, mais d'un système plus souple avec des prises à des points d'eau fixes et avec un matériel d'arrosage mobile.

Les besoins en eau de l'agriculture se sont donc amplifiés singulièrement dans de nombreux pays, avec cependant des nuances régionales très marquées. Il est fort difficile de faire une estimation globale des besoins en eau de l'agriculture et c'est seulement à une échelle régionale limitée que ces besoins peuvent être précisés avec une certaine rigueur.

Ces besoins sont certes fonction de la sécheresse du climat du pays envisagé, de l'ancienneté de l'irrigation traditionnelle, mais aussi des ressources en eau effectivement exploitables et du degré d'évolution technique de l'agriculture. On ne s'étonnera donc pas de voir dans les pays à fort besoin en eau agricole des pays en totalité ou en partie méditerranéens ou à climat sec.

Il est donc fort délicat d'évaluer les volumes globaux annuels d'eau nécessaire à l'agriculture d'un pays ou d'une région donnée. Des tentatives ont été faites en ce sens avec plus ou moins de succès. En France, où un million d'hectares est soumis à un apport complémentaire d'eau, les besoins de l'aspersion sont estimés à 1,5-3 km³ par an, alors que sur les besoins agricoles globaux sont évalués à 8-10 km³. L'agriculture est donc une grande consommatrice d'eau avec l'industrie et ces besoins sont sans cesse croissants. Il est pratiquement illusoire de vouloir chiffrer ces besoins pour les décennies à venir, mais on peut indiquer que pour nourrir la population mondiale prévue pour 2000-2100 il faudrait multiplier par 2 ou 3 les surfaces actuellement irriguées, soit plus de 100 millions d'hectares à la surface du globe.

Les besoins en eau agricole sont en réalité fort variables d'une année à l'autre, en fonction des conditions climatiques. Ainsi, dans les régions tempérées océaniques, les besoins en eau de l'agriculture sont maximaux en période de sécheresse estivale, alors que les ressources en eaux de surface ou souterraines se trouvent singulièrement réduites. Ces besoins en eau agricole et donc les prélèvements qu'ils exigent sont évidemment prédominants, on le verra, dans les bilans de consommation des pays en voie de développement des régions méditerranéennes tropicales, semi-arides et arides.

Il convient enfin de souligner que dans toutes les régions rurales les besoins en eau potable et en eau industrielle sont réduits à la différence de ce que l'on observe dans les régions urbaines et industrielles.

1.3 - LES BESOINS EN EAU INDUSTRIELLE

Dès l'aube de l'ère industrielle, les rivières constituent des sites appréciés par toutes les industries cherchant à utiliser soit leur force motrice, soit la qualité des eaux, soit encore les possibilités de lavage et d'évacuation des eaux usées qu'elles offraient.

A notre époque, les grandes vallées sont des axes structurants pour les localisations industrielles, notamment les vallées du Rhin, du Rhône, de la Seine, de la Weser, de la Volga, etc... particulièrement pour les industries, grandes consommatrices d'eaux ; cimenteries, industries de raffinage et du pétrole, industries papetières, industries chimiques et pharmaceutiques, corps gras, textiles, industries agro-alimentaires et même sidérurgie, construction mécanique.

On peut assigner trois fonctions au rôle de l'eau dans les localisations industrielles.

- Fonction d'entraînement

- . lavage et élimination des déchets,
- . transport de bois, de charbon, de betteraves, d'engrais, de pâtes à papier dans les machines à papier.

- Fonction de refroidissement

C'est-à-dire transfert de calories de la paroi des appareils à refroidir (moteurs, compresseurs, condenseurs, réacteurs) vers une circulation d'eau.

Les utilisateurs les plus importants à des fins de refroidissement sont :

- . les centrales thermiques et thermo-nucléaires, l'eau jouant le rôle de source froide,
- . l'industrie sidérurgique,
- . l'industrie chimique,

- Fonction de matière première

- . comme solvant-diluant (fabriques d'acide sulfurique, de colorants et teintures), constituant des bains de traitement des ateliers de surfaçage des métaux (utilisation des propriétés ionisantes), bains de décapage...
- . comme liant, par exemple : fabrique d'agglomérés,
- . comme réactif chimique (réduction par la vapeur d'eau), injection de vapeur dans les brûleurs à fuel,

. comme produit de consommation, exemple dans les brasseries - malteries.

A cette fonction s'ajoute la production de vapeur pour les centrales thermiques. En bref, l'eau est la base déterminante de la plupart des localisations industrielles en relation avec les sources d'énergie aussi.

Les besoins en eau de l'industrie varient beaucoup selon les procédés. Ainsi, pour fabriquer une tonne d'acier, il faut entre 2 et 350 m³ d'eau, pour une tonne de pétrole brut, entre 1 et 12 m³ d'eau, pour une tonne de pâte à papier, entre 50 et 700 m³ d'eau.

La consommation d'eau industrielle représente la différence entre les débits prélevés dans les rivières ou les nappes phréatiques et les débits restitués. Les besoins en eau sont ceux nécessaires au fonctionnement d'une usine en l'absence de tout circuit de recyclage et de toute réutilisation de l'eau. La même eau est peut-être utilisée en série pour des usages différents et le recyclage consiste à réutiliser les mêmes eaux : par exemple, recyclage des eaux de refroidissement après passage dans des réfrigérants (les pertes en eau sont limitées à la partie évaporée) ou encore recyclage des eaux de rinçage d'un atelier.

1.4 - LES BESOINS EN QUALITE

La qualité de l'eau est son aptitude, déterminée par ses caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques à assurer les diverses fonctions impliquées par ses rôles naturels et ses usages.

En référence aux besoins, l'exigence en qualité dépend des usages et peut s'exprimer par :

- des critères correspondant aux types de caractéristiques physico-chimiques ; teneur en solutés, matières en suspension (MES), températures, etc...
- des contraintes à respecter (normes).

Ces normes de qualité correspondant à des ensembles de valeurs physico-chimiques (ou index de référence) leur application est censée aboutir à un degré d'efficacité acceptable pour l'utilisateur.

L'expression de ces normes peut prendre la forme :

- soit de valeur-limite de caractéristique à ne pas dépasser (maximum, minimum) assortie ou non d'une marge de tolérance permanente ou exceptionnelle ;
Exemple : norme de potabilité.
- soit, le plus souvent, d'une gamme de valeur définissant des limites de classes d'aptitude de l'eau à un usage donné ;
Exemple : classes d'aptitude de l'eau à l'irrigation.

Les usages pour lesquels des normes de qualité sont principalement définies, codifiées et/ou recommandées sont :

- l'abreuvement (humain, animal), normes de potabilité étendues aux autres usages alimentaires.

Exemple : les normes de l'OMS ou de la CEE.

Normes de potabilité de l'O.M.S.

Eléments (solutés) teneur en mg/l	Classes de qualité		
	1°	2°	3°
Ca	< 75	75 à 200	> 200
Mg	< 50	50 à 150	> 150
Cl	< 200	200 à 600	> 600
SO ⁴	< 200	200 à 400	> 400
Résidu sec	< 500	500 à 1 500	> 1 500
Substances toxiques	Teneurs maximales tolérables (mg/l)		
Pb	0,1		
Se	0,05		
As	0,2		
Cr	0,05		
Cn	0,01		

- L'irrigation (et le lessivage du sol) ; normes relatives aux types de sol et de culture, servant surtout à définir des classes d'aptitude de l'eau,
- différents procédés de fabrication industrielle ; normes très variées, certaines étant identiques ou plus exigeantes que les normes de potabilité, d'autres plus spécifiques. Ces normes sont souvent empiriques et elles peuvent être très sensibles à des changements de processus de fabrication (cas de recyclage notamment). De plus, ces normes sont souvent indiquées par rapport à une branche industrielle particulière conjuguant différents usages inégalement exigeants.

Exemple de normes de qualité requise par une industrie réunissant des usages variés : papeterie (kraft)

Caractéristiques (paramètres de qualité)	Normes (pour produit écru) intervalles de tolérance
Couleur	10 - 80
DBO ₅	0 - 5 mg/l
pH	6,5 - 8
Na	10 - 150 mg/l
Cl	50 - 500 mg/l
Dureté	5 - 200 mg/l CaCO ₃

- le chauffage ou "la pompe de chaleur" ; normes thermiques.
- les usages aquatiques (in situ) pour l'élevage (pisciculture) la baignade et les loisirs.

Qualité requise des eaux destinées à la baignade

N°	Paramètre	Unité	Valeur guide G	Valeur impérative I
1	Coliformes totaux	100 ml	500	10 000
2	Coliformes fécaux	100 ml	100	2 000
3	Streptocoques fécaux	100 ml	100	
4	Salmonelles	Litre	—	0
5	Enterovirus	PFU/10 l	—	0
6	pH	unité pH	—	6 à 9
7	Coloration	visuelle	—	pas de changement anormal
8	Huiles minérales	visuel mg/l	— 3	pas de film ni d'odeur
9	Substances tensio-actives réagissant au bleu de Méthylène	visuel mg/l	— 0.3	pas de mousse
10	Phénols	visuel mg/l C ₆ H ₅ OH	— 0,005	absence d'odeur 0,05
11	Transparence	mètre	2	1
12	Oxygène dissous	%	80 à 120	—
13	Résidus goudronneux matières flottantes...	visuel	—	absence

- la lutte anti-incendie ; normes de pression.

1.5 - AUTRES BESOINS

Bien que non consommateur d'eau (il ne suppose aucun prélèvement) certains besoins comme ceux de la navigation marchande et de loisirs, ou de la production d'énergie hydro-électrique devront cependant être analysés car nécessitant le respect d'un débit réservé qui dans le bilan devra apparaître comme un besoin.

Dans ce même ordre d'idée, il faudra notamment dans le cadre d'un schéma d'aménagement intégré de bassin tenir compte des besoins dits de protection contre les inondations ; ce volet nécessitant l'analyse des phénomènes de crue (intensité, occurrence...) de rivières et/ou de nappe.

2 - ANALYSE PROSPECTIVE DES BESOINS

En tant que fait les besoins en eau, dans leurs dimensions de quantité, sont essentiellement temporels : leur évaluation doit se référer à une date et son évolution peut être décrite ou calculée (reconstitution du passé ou prévision dans l'avenir).

Les besoins d'approvisionnement varient suivant des régimes caractérisables à différentes échelles dans le temps ; de l'échelle journalière (variations horaires) à l'échelle pluriannuelle (variations inter-annuelles). A une échelle donnée, la variable considérée sera le besoin moyen relatif à un "pas de temps" donné ; par exemple : le régime annuel se définira par la variation des moyennes annuelles mensuelles ou journalières.

Pour ce faire, la démarche devra passer par l'analyse de la demande et notamment la caractérisation de celle-ci -à une échelle de temps donnée- par un flux moyen, une demande de pointe, une distribution fréquentielle des demandes relatives au pas de temps élémentaire.

Il en est de même des besoins de prélèvement induits par les précédentes et qui anticipe physiquement sur celles-ci, sans identité des régimes respectifs compte-tenu des variations des pertes et du rôle régularisateur des stocks journalier, annuel ou pluri-annuel.

La validité des historiques de demande est subordonnée à la stabilité de leur définition et des modes de leur détermination. En deçà du passé récent, le défaut de données statistiques -dans la plupart des pays- nécessite de recourir à des index et frappe la connaissance du passé d'une incertitude similaire à celle qui affecte la prévision de l'avenir.

L'évolution des besoins (en quantité) relative à une unité ou à un secteur d'utilisation, ou encore à une région ou un pays entier -au niveau des approvisionnements ou à celui des prélèvements (distinction trop peu souvent explicitée)- s'exprime couramment :

- soit en valeur absolue (flux global, moyen ou de pointe) ou en valeur relative (demande unitaire : notamment demande par capital),
- soit par des taux de croissance dérivés de ces variables absolues ou relatives.

Ces taux de croissance annuels (ou moyens annuels correspondant à des périodes pluriannuelles, quinquennales par exemple) des besoins sont d'autant plus significatifs qu'ils sont relatifs à des groupes d'utilisations assez homogènes.

De tels taux sont eux-mêmes évolutifs, aussi leur application à des projections n'a-t-elle de portée opérationnelle qu'à court terme et nécessite-t-elle des hypothèses sur leur propre variation à moyen et long terme.

La prévision des besoins (d'approvisionnement ou de prélèvement) résulte le plus souvent de la technique des scénarios en considérant :

- soit une projection tendancielle ; de nature prospective avec 1 - 2 ou 3 hypothèses (une basse, une moyenne, une haute),
- soit par une projection planifiée de nature volontariste.

La prévision des besoins -d'approvisionnement ou de prélèvement ; unitaires, sectorielles, ou globales- peut résulter de démarches ou prendre des significations bien différentes, selon qu'il s'agit de projection tendancielle (prospective) ou de projection planifiée (volontariste).

La projection tendancielle est basée :

- soit sur des extrapolations de tendance constatée (variable endogène, telle que le taux de croissance évoqué ci-dessus), de portée opérationnelle restreinte au-delà du court terme ;

- soit sur des indicateurs plus ou moins macroéconomiques (variables exogènes) de signification normative.

Les variables exogènes globales les plus couramment considérées sont la population, l'emploi, le revenu ou le produit national (ou régional) brut, mises en facteur avec les besoins unitaires correspondants, stables ou elles-mêmes évolutives en fonction de certaines de ces variables.

Plutôt qu'identifier des taux ou des lois de croissance plus ou moins complexes et formelles, il s'agit de construire des "modèles de besoins" d'abord explicatifs et vérifiés par la simulation d'évolution connue, puis prédictifs et interactifs ou non avec l'évolution de l'offre.

La projection planifiée a le caractère d'une "programmation" dirigée intégrée dans une planification économique plus générale. Elle comporte éventuellement des hypothèses de rétroaction et d'efficacité des moyens d'intervention sur les agents économiques demandeurs.

Les projections tendanciennes s'appliquent surtout à la prévision des besoins d'approvisionnement -unitaires et globales, moyennes et "de pointe"-, base de la prévision des nécessités de production, prélèvement plus particulièrement lorsque les demandes des usagers ne s'adressent pas directement au milieu naturel.

La prévision des prélèvements (productions) déduits implique une prévision d'évolution des rendements de distribution et elle dépend de plus de la prévision d'adaptation et d'expansion des "productibilités", c'est-à-dire de la transformation du système d'offre intermédiaire ; celle-ci est nécessairement discontinue et peut réagir sur l'évolution de la demande d'approvisionnement satisfaite.

La prévision des prélèvements est de ce fait plus un objet de planification que de projection tendancielle.

Ces projections peuvent être opérées à divers niveaux d'agrégation des besoins (sectoriels, géographiques) depuis l'échelle de systèmes d'utilisation élémentaires jusqu'à l'échelle nationale ou même mondiale ainsi qu'à divers horizons (de la décennie au siècle).

La prévision des demandes (en quantité) sollicitant le milieu naturel à l'échelle du système de ressource peut considérer soit les prélèvements, soit les consommations relatives à celui-ci en impliquant dans le second cas une hypothèse d'évolution -ou de stabilité- des taux de consommation.

CHAPITRE 3

EVALUATION DES RESSOURCES

C H A P I T R E 3

SOMMAIRE

	Pages
1 - CLASSIFICATION ET TYPOLOGIE DES RESSOURCES	2
2 - LES DONNEES NECESSAIRES A LA PLANIFICATION	11
3 - L'EVALUATION DES RESSOURCES LIEE A LA PLANIFICATION	21

EVALUATION DES RESSOURCES

La notion ressources en eau n'est apparue dans les consciences que, lorsqu'en un point donné, l'ordre de grandeur des prélèvements s'est rapproché des ressources naturelles facilement disponibles ; c'est-à-dire quand des difficultés ou même des impossibilités d'approvisionnement étaient prévisibles à court terme (pénuries conjoncturelles et/ou chroniques...) ou encore lorsque les impacts de l'utilisation des eaux risquaient d'être préjudiciables à un approvisionnement ultérieur (en aval de l'utilisation et/ou dans le futur). Ainsi, la notion de ressources en eau a très vite été associée à l'idée de limites et donc à l'évaluation de ces limites comparables aux demandes en eau qui, elles, sont évolutives, et le plus souvent en progression toujours constante. En fait associée à l'idée de rareté qui caractérise tout "bien économique" la Ressource en Eau est un concept économique.

La ressource en tant qu'offre se caractérise par :

- 1 - Une situation dans l'espace (domaine de référence). Les domaines les plus couramment considérés sont les champs spatiaux de systèmes physiques :
 - les bassins fluviaux qui forment des ensembles hiérarchisés avec emboîtement de sous-systèmes (sous-bassins) pouvant comporter des systèmes aquifères interconnectés aux cours d'eau.
 - les systèmes aquifères, diversement liés aux cours d'eau de surface, parfois indépendants.
- 2 - Des quantités (en terme de flux et/ou de stock) affectées d'une variabilité continue ou discontinue dans le temps. La durée à prendre en compte doit être assez longue pour que les évaluations de grandeurs moyennes des variables naturelles et les estimations de leur variabilité (valeurs de fréquence caractéristique) soient suffisamment stables et peu influencées par les événements exceptionnels survenus pendant la période de référence. Cette durée doit aussi être de l'ordre de celle relative à la projection des besoins afin de mieux valider la confrontation entre les ressources et les besoins.

3. Des quantités déterminées par les caractéristiques physico-chimiques de l'eau dans le milieu naturel, en général variables avec le flux et relatives à certaines normales de demande de qualité (potabilité, aptitude à l'irrigation, à certains procédés industriels... et à certaines fonctions de coût (coût de traitement de l'eau brute afin de la rendre potable). Cette "offre en qualité" associe à fois la notion de "ressources en qualité" et celle de "prélèvement en qualité" (soustraire une certaine quantité d'eau de qualité donnée dans le milieu naturel et restituer à celui-ci la même quantité d'eau mais de moindre qualité). L'offre en qualité est associée aussi à l'aptitude du milieu récepteur à digérer les rejets en retour.
4. Une énergie potentielle déterminée par la distribution des altitudes et une chronique des flux d'eau.
5. Des ressources imposées par l'utilisation et l'exploitation de la ressource :
 - travaux d'aménagement et d'adaptation aux conditions propres de la demande,
 - coûts d'investissement et de fonctionnement correspondants.

Evaluer la ressource ce n'est donc pas seulement comptabiliser des quantités de flux et de stock disponibles dans la zone d'étude considérée mais caractériser et mesurer, en liaison avec la demande, toutes les dimensions techniques de l'offre.

Dans le cadre de ce thème, il sera successivement abordé :

- la classification et la typologie des ressources,
- les données nécessaires à la planification,
- l'évaluation pratique des ressources en eaux superficielles et souterraines dans le cadre des Schémas et des Plans Directeurs d'aménagement des Eaux,
- l'expression des informations utiles au planificateur.

1 - CLASSIFICATION ET TYPOLOGIE DES RESSOURCES

La ressource en eau est à la fois **une**, en se référant à un système de ressource et **multiple** car elle ne se réduit pas à une simple quantité d'eau indifférenciée.

Elle est donc le plus souvent "multidimensionnelle" d'où l'expression plus courante des ressources en eau.

Ainsi, la ressource en eau est couramment subdivisée :

1. Selon que l'on considère le flux ou le stock en :

- ressource renouvelable ou dynamique, exprimée en débit et liée aux écoulements (flux),
- ressource non renouvelable ou statique, exprimée en volume et liée aux réserves (stock).

2. Selon la partie du milieu naturel considérée en :

- ressource en eau superficielle,
- ressource en eau souterraine.

3. Selon le régime de variation du flux dans le temps, ce qui conduit à subdiviser en pratique le flux total d'écoulement en :

- ressources permanentes ou quasi-permanentes, régularisées naturellement,
- ressources variables selon divers degrés de variabilité.

4. Selon les possibilités pratiques d'exploiter l'eau du milieu naturel, de maîtriser et mobiliser les flux et/ou les stocks, d'utiliser les captages d'évacuation et d'autoépuration (possibilité liée aux conditions physiques du milieu mais aussi aux critères de la demande) en :

- ressource en eau "naturelle",
- ressource en eau potentielle,
- ressource en eau exploitable en distinguant suivant les différents critères technico-économiques les ressources en eau mobilisables techniquement et les ressources en eau utilisables économiquement.

5. Selon la qualité naturelle de l'eau, celle-ci étant définie en différentes classes de qualité qui correspondent, soit à des classes d'aptitude aux usages soit à des classes d'acceptabilité des rejets.

1.1. LA RESSOURCE EN EAU RENOUVELABLE "NATURELLE"

En première analyse, la ressource en eau renouvelable naturelle pour une zone géographique donnée est assimilée à un flux évalué :

- soit par les précipitations globales (augmentées éventuellement par les importations),
- soit par l'écoulement total potentiel (équivalent aux précipitations efficaces).

La seconde approche prévaut généralement, surtout du point de vue des aménageurs et des gestionnaires de la ressource. Elle ne prend en compte que la ressource à confronter aux utilisations directes et plus particulièrement aux prélèvements dans le "système d'écoulement naturel" (cours d'eau, lacs, nappes souterraines) vis-à-vis duquel les précipitations efficaces constituent seulement une entrée. Cependant, cette approche ne peut tenir compte de la demande en eau des cultures non irriguées alors que celle-ci (agriculture, boisement) n'est pas sans effet sur le système de ressource, même restreint à un système d'écoulement.

L'estimation des probabilités d'occurrence dans le temps des flux d'écoulement naturel conduit à distinguer :

- une ressource renouvelable "naturelle" quasi-permanente, qui correspond aux écoulements de débit atteint ou dépassé pendant une grande partie de l'année (95 % en général, soit près de 350 jours/an), donc assuré ou garanti suivant ces probabilités ; ils équivalent souvent en pratique aux écoulements d'étiage minimaux de fréquence donnée,
- une ressource variable plus aléatoire, qui correspond à des écoulements de débit atteint ou dépassé, seulement pendant une partie de l'année (80 %, 50 %...) en se référant soit à l'année entière, soit à des saisons plus appropriées à la confrontation ressources/besoins (période d'étiage, de crues, etc...).

La probabilité contraire qu'un débit d'écoulement naturel donné ne soit pas atteint a pour corollaire le risque de défaillance.

Un risque de défaillance peut ainsi s'appliquer :

- soit au débit ; probabilité qu'un débit observé soit inférieur au débit voulu dans le cas de la satisfaction (ou supérieur dans le cas d'une demande de protection contre les crues par exemple),
- soit à la durée ; nombre de jours consécutifs (ou non consécutifs) où le débit observé est inférieur (ou supérieur) au débit voulu,
- soit au volume ; intégration du déficit de débit cumulé.
- soit à la qualité.

L'évaluation de la ressource renouvelable en eaux de surface doit donc être décrites simultanément :

- par leur débit d'étiage, défini selon une fréquence choisie, base de l'évaluation du flux mobilisable au fil de l'eau (prise d'eau directe par dérivation),
- par leur débit moyen, base de l'évaluation du flux maximum théorique mobilisable par régularisation et stockage (dérivation anticipée et/ou différée avec lachures en temps opportun afin de soutenir les étiages),
- par la distribution des débits caractéristiques et de différentes fréquences dont la connaissance est nécessaire pour dimensionner au mieux les ouvrages (réservoirs, déversoirs de crue...) et qui peut servir de base à l'évaluation des potentialités hydro-électriques et des possibilités de protection contre les crues par exemple.

1.2. LA RESSOURCE RENOUELABLE EN EAU DE SURFACE ET EN EAU SOUTERRAINE

La ressource en eau renouvelable dite "naturelle" peut se décomposer en :

- ressource en eau de surface correspondant à l'écoulement superficiel engendré par le ruissellement (temps réel),
- ressource en eau souterraine correspondant à l'écoulement souterrain engendré par l'infiltration (par suite de l'inertie des systèmes moyenne interannuelle).

Cette dichotomie se retrouve généralement au niveau de l'évaluation des ressources dans le cadre de schéma d'aménagement des eaux. Cependant, le fait d'évaluer séparément le flux de ressource "naturelle" en eau de surface d'après les écoulements sortants, et le flux de ressource "naturelle" en eau souterraine d'après l'alimentation des nappes risque d'entraîner des double-comptes (notamment au niveau du débit des sources et du fait des relations toujours possibles entre nappe et rivière). Aussi, le cumul de ces 2 types de ressources exigera de procéder au cas par cas en fonction de l'échelle considérée, des conditions climatiques, géologiques...

On trouvera ci-après un tableau des caractéristiques comparées des eaux superficielles et des eaux souterraines.

1.3. LA RESSOURCE NON RENOUELABLE

Cette ressource concerne exclusivement l'eau souterraine.

En termes physiques la ressource non renouvelable est la quantité d'eau procurée par le déstockage d'une partie des réserves d'un aquifère ou d'un ensemble d'aquifères d'un territoire donné. Elle est exprimable, soit en volume, soit en débit rapporté à une durée finie à fixer.

En tant qu'offre, la ressource en eau non renouvelable se définit comme un stock potentiel, prélevable une fois pendant la durée considérée (et plus généralement à l'échelle humaine).

Une distinction peut alors être faite entre les ressources non renouvelables des nappes libres qui sont le plus souvent faibles au regard de leurs ressources renouvelables et les ressources des nappes captives qui offrent surtout, et parfois presque exclusivement, des ressources non renouvelables. Mais cela dépend des zones climatiques. Ainsi en zone aride des aquifères à surface libre et à faible renouvellement peuvent offrir des stocks considérables (S de nappe libre) bien plus que des nappes captives ($S \cdot 10^{-4}$) ont été ou sont encore intensivement exploités (ex. USA/Arizona, High Plains, Libye/Grès de Nubie...) On tend même à y évaluer la réserve exploitable en se référant au seul rabattement des parties des aquifères à surface libre (ex. Arabie Saoudite). En zone humide par contre les réserves des aquifères libres (même si elles ont considérables) n'offrent que des ressources non renouvelables limitées, pour des raisons non pas physiques mais par suite des contraintes de conservation de flux des émergences ; ainsi on ne peut pas déstocker les réservoirs sans "couper le courant".

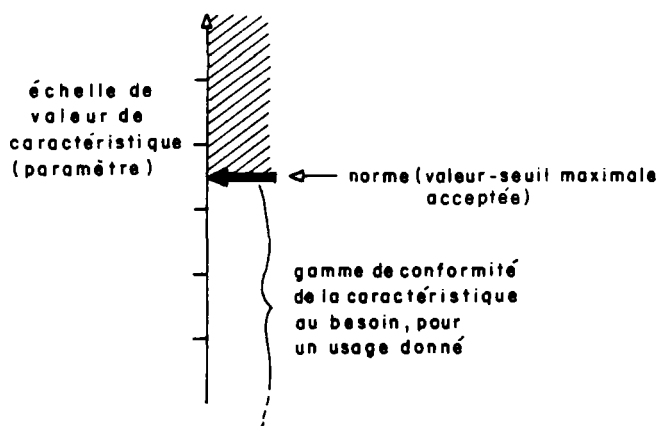
CARACTERISTIQUES COMPAREES DES RESSOURCES EN EAUX SUPERFICIELLES ET EN EAUX SOUTERRAINES

CARACTERES	EAUX SUPERFICIELLES	EAUX SOUTERRAINES (y compris sources)
Répartition dans l'espace	Ressource concentrée dans les rivières et les lacs, impliquant dans certains cas des adductions importantes, mais permettant des prises de fort débit en un seul site.	Ressource extensive facilitant les captages sur les lieux d'utilisation donc minimisant les coûts d'adductions, mais nécessitant une pluralité de captages pour satisfaire une forte demande, sauf le cas de source à débit minimal très élevé.
Disponibilité dans le temps	Variable saisonnièrement et d'une année à l'autre en fonction des aléas climatiques lorsque les besoins excèdent les ressources en étiage il est nécessaire de construire des ouvrages de régularisation.	Réserve naturelle ne nécessitant pas de régularisation. Débit peu variable offrant une ressource plus résistante que l'eau de surface aux aléas climatiques, donc une meilleure sécurité d'approvisionnement.
Evaluation quantitative de la ressource	Ressource visible -nécessite une interprétation statistique de données recueillies sur une période assez longue.	Ressource invisible, son évaluation précise nécessite la mise en oeuvre de méthodes assez complexes. Ressource souvent limitée, ne pouvant, sauf exception, satisfaire à elle seule les besoins d'une grande agglomération.
Qualité naturelle de l'eau	Qualité variable - nécessite toujours un traitement adapté à cette variabilité.	Qualité constante ou très peu variable. Certaines eaux souterraines sont naturellement potables. D'autres nécessitent un traitement limité et facilité par l'absence de variation de la qualité. D'autres sont impropres à l'utilisation pour l'eau potable sauf traitement très onéreux (eaux à forte salinité).
Vulnérabilité à la pollution	Très sensible aux rejets polluants dans l'ensemble du bassin versant en amont du point de captage introduisant de nouveaux facteurs de variation de la qualité rendant le traitement encore plus difficile. Les pollutions accidentelles peuvent rendre pendant une certaine période (quelques jours en général) la ressource inutilisable. Les mesures de lutte contre la pollution ont un effet rapide dans les rivières et beaucoup plus lent dans les lacs.	Certaines eaux souterraines sont totalement protégées des risques de pollution. D'autres sont plus vulnérables à la pollution, sans l'être autant que les eaux de surface, et doivent faire l'objet de mesures de protection. Lorsqu'une ressource en eau souterraine est polluée, sa capacité de régénération est très lente (souvent plusieurs années ou dizaines d'années). Le traitement ou l'abandon de la ressource s'impose alors.

1.4. LA RESSOURCE EN QUALITE

Définir les ressources en qualité, en tant qu'offre, ne consiste pas seulement à décrire (et à quantifier) différents paramètres de qualité, leur distribution dans l'espace et leur variation dans le temps en différents points de référence mais aussi à caractériser les aptitudes de la ressource vis-à-vis des fonctions et usages correspondants.

La confrontation entre caractéristiques (offertes) et normes (requis) peut être faite de manière élémentaire en comparant deux à deux chaque couple caractéristique/norme selon le schéma suivant.



A un usage donné correspond le plus souvent un ensemble de normes relatives à différents paramètres (normes CEE ou FAO de potabilité par exemple). L'appréciation de la qualité vis-à-vis de cet usage s'opère alors par comparaison simultanée des différentes caractéristiques et normes correspondantes, la non conformité d'un seul paramètre entraînant la non conformité de l'eau.

Pour certains usages (l'irrigation notamment) on substitue aux normes exprimées en termes de valeurs limites différents degrés d'aptitude. La classification (excellente, bonne, admissible, moyenne, médiocre) est basée pour l'irrigation par exemple sur 2 index, la conductivité et le taux d'adsorption de sodium.

Enfin, la notion de "qualité générale de l'eau" procède de l'idée de confronter l'ensemble des caractéristiques et l'ensemble des normes des différents usages. Cette confrontation, malgré sa difficulté vu le nombre de fonctions à intégrer, permet de construire une grille générale de qualité. On trouvera ci-après la grille élaborée par la CCE pour définir les "objectifs généraux de qualité des eaux". Cette grille est basée sur la combinaison de 5 classes de salinité (définie par 4 paramètres) et de 4 classes de qualité générale (définie par 24 paramètres).

La distribution spatiale de la qualité des eaux, lorsqu'elle a été suffisamment inventoriée, peut donner lieu à une représentation cartographique - carte de la qualité des rivières des Agences de Bassin -.

CRITERES D'APPRECIATION DE LA QUALITE GENERALE DE L'EAU

		S0	S1	S2	S3	S4
I	1 Conductivité S/cm à 20°C	400	750	1 500	3 000	> 3 000
	2 Dureté totale ° français	15	30	50	100	> 100
	3 Cl mg/l	100	200	400	1 000	> 1 000
	4 Capacité d'adsorption du Na (1)	2	4	8	> 8	

		1 A	1 B	2	3
II	5 Température	< 20°	20 à 22°	22 à 25°	25 à 30°
III	6 O ₂ dissous en mg/l (2) O ₂ dissous en % sat.	7 > 90 %	5 à 7 70 à 90 %	3 à 5 50 à 70 %	milieu aérobie à maintenir en permanence
	7 DBO ₅ eau brute mgO ₂ /l	< 3	3 à 5	5 à 10	10 à 25
	8 Oxydabilité mgO ₂ /l	< 3	3 à 5	5 à 8	
	9 DCO eau brute mgO ₂ /l	< 20	20 à 25	25 à 40	40 à 80
IV	10 NO ₃ mg/l			44	44 à 100
	11 NH ₄ mg/l	< 0,1	0,1 à 0,5	0,5 à 2	2 à 8
	12 N total mg/l (Kjeldahl)				
V	13 Saprobies	oligosaprobie	β mésosaprobie	α mésosaprobie	Polysaprobie
	14 Ecart de l'indice biotique par rapport à l'indice normal (3)	1	2 ou 3	4 ou 5	6 ou 7
VI	15 Fer total mg/l précipité et en sol	< 0,5	0,5 à 1	1 à 1,5	
	16 Mn total mg/l	< 0,1	0,1 à 0,25	0,25 à 0,50	
	17 Matières en susp. totales mg/l (4)	< 30	< 30	< 30 (m dec < 0,5 ml/l)	30 à 70 (m dec < 1 ml/l)
VII	18 Couleur mg Pt/l	< 10 (absence de coloration visible)	10 à 20	20 à 40	40 à 80
	19 Odeur	non perceptible		ni saveur ni odeur anormales	Pas d'odeur perceptible à distance du cours d'eau
	20 Subst extractibles au chlorof. mg/l	< 0,2	0,2 à 0,5	0,5 à 1,0	> 1
	21 Huiles et graisses	néant		traces	présence
	22 Phénols mg/l	< 0,001		0,001 à 0,05	0,05 à 0,5
	23 Toxiques	norme permisible pour la vocation la plus exigeante et en particulier pour préparation d'eau alimentaire			Traces inoffensives pour la survie du poisson
	24 pH	6,5 - 8,5 6,0 - 8,5 si TH < 5° f		6,5 - 8,5 6,0 - 8,5 si TH 5° fr 6,5 - 9,0 photosynthèse active	5,5 - 9,5
VIII	25 Coliformes /100 ml		< 5 000		
	26 Esch. coli /100 ml		< 2 000		
	27 Strept. fec. /100 ml				
IX	28 Radioactivité	catégorie I du SCPRI		catégorie II du SCPRI	

(1) $CAS = \frac{Na\sqrt{2}}{\sqrt{Ca + Mg}}$ teneurs en me/l

(2) La teneur en O₂ dissous est imperative

(3) L indice normal est suppose egal à 10, s'il n'a pas été déterminé

(4) La teneur en MES ne s'applique pas en période de hautes eaux

QUALITE GENERALE DE L'EAU

		1 A	1 B	2	3
SALINITE	0	1A.S0	1B.S0	2.S0	3.S0
	1	1A.S1	1B.S1 EAU POTABLE (traitement simple ou normal) INDUSTRIES ALIMENTAIRES	2.S1 IRRIGATION	3.S1
	2	1A.S2	1B.S2 ABREUVAGE DES ANIMAUX	S.S2 EAU INDUSTRIELLE eau potable (traitement poussé)	3.S2 Irrigation
	3	1A.S3	1B.S3 BAINNADE LOISIRS POISSON (vit et se reproduit normalement)	2.S3 Abreuvement des animaux	3.S3 AUTOEPURATION NAVIGATION REFROIDISSEMENT
	4	1A.S4	1B.S4	S.S4 Loisirs (contacts exceptionnels avec l'eau) Poisson (vit normalement mais sa reproduction peut être aléatoire)	3.S4 Autoépuration Poisson (sa survie peut être aléatoire dans certaines circonstances)

1.5. LA RESSOURCE POTENTIELLE ET LA RESSOURCE EXPLOITABLE

La ressource potentielle est la part des eaux du milieu naturel qui constitue un potentiel d'offre tenant compte des contraintes extérieures au système de ressource. Ces contraintes peuvent être d'ordre :

- **Ecologique** ,
des restrictions d'utilisation d'eau du milieu naturel peuvent résulter de la volonté de sauvegarder un écosystème aquatique et donc de respecter des débits, des niveaux, des volumes d'eau, des caractéristiques physico-chimiques de l'eau.
- **Socio-économique**,
des servitudes découlant de priorités données à des activités non compatibles avec l'utilisation de la ressource, peuvent être imposées par des situations de fait ou par des choix d'aménagement.
- **Géopolitique**, liées au fait que tout sous-système dépend d'un champ plus vaste interrégional ou international et donc des conditions aux limites amont et aval ; servitude de conservation d'un débit minimal sortant et/ou restriction de disponibilité de débit entrant, normes de qualité à respecter à la frontière.

La ressource exploitable est la part des eaux du milieu naturel tenant compte des contraintes **internes** du système relatives à des critères spécifiques aux aménageurs, utilisateurs et à leurs objectifs propres. Elle représente donc les volumes d'eau spécifiés en quantité et qualité qui peuvent être effectivement maîtrisés et utilisés.

Enfin, il est classique de considérer les critères techniques et économiques pour définir et distinguer à l'intérieur de la ressource exploitable la ressource mobilisable et utilisable.

La ressource en eau mobilisable est conçue en prenant en compte les seules contraintes **techniques** qui limitent généralement la maîtrise des eaux du milieu naturel (sous réserve de respect des contraintes externes qui déterminent la ressource potentielle).

La mobilisation de l'eau peut se faire, soit :

- en captant directement une partie du flux (prise d'eau en rivière, captage d'eau souterraine en régime quasi-permanent),
- en transformant une partie du flux en stock (régularisation de cours d'eau par barrage-réservoir, alimentation artificielle de réservoir aquifère),
- en exploitant un stock naturel pré-existant de manière temporaire et répétitive ou définitive (exploitation de réserve d'eau superficielle ou souterraine).

La ressource en eau utilisable est, elle, conçue pour prendre en compte à la fois les contraintes techniques et socio-économiques. Ces dernières contraintes sont relatives le plus souvent à un coût maximal acceptable par les usagers.

2 - LES DONNEES NECESSAIRES A LA PLANIFICATION

Dans le cadre de l'élaboration d'un Plan Directeur, l'évaluation des ressources donne lieu à une confrontation entre :

- une demande de données engendrée par la procédure même de planification,
- une offre d'informations fournie par les travaux d'observation, d'investigation et de traitement de données climatologiques, hydrologiques et hydrogéologiques.

Il est donc nécessaire ici de distinguer clairement données et informations. En règle générale les données primaires (ou brutes) sont les connaissances acquises par l'observation du milieu, par des mesures et divers travaux d'investigation ; elles peuvent faire l'objet de traitements de présentation et éventuellement de critique des données ; la conservation de ces données se faisant soit par des procédés traditionnels (fichiers manuels, publications) soit sur support informatique (banque de données).

Le concept de données utiles découle directement de la confrontation entre demandes et offres d'information ; ce sont les données nécessaires, mais non obligatoirement suffisantes pour élaborer les informations et outils.

Les informations se présentent sous la forme d'expressions quantitatives et/ou qualitatives élaborées à partir des données afin d'être utilisables directement comme élément de décision. L'exemple ci-après de l'analyse des crues d'une rivière permet d'éclairer le propos :

- | | |
|-------------------|---|
| ♦ donnée primaire | relevé des hauteurs d'eau observées |
| ♦ donnée utile | chronique de débits moyens journaliers |
| ♦ information | débit de crue de projet de fréquence donnée |

La planification, instrument des choix stratégiques dont l'effet doit se faire sentir à long terme, débouche sur les plans directeurs à l'échelle régionale, interrégionale, nationale ou même internationale.

Il s'agit de dégager les grandes lignes des aménagements, en analysant les objectifs à moyen et à long terme, ainsi que leurs implications socio-économiques et politiques, en recherchant une optimisation globale des réponses aux besoins compte tenu des différentes contraintes du milieu naturel. La planification exige donc une information extensive mais peu détaillée, basée essentiellement sur des inventaires et des statistiques.

Les besoins de données utiles pour la planification sont abordés ci-après en distinguant l'évaluation des eaux superficielles de celle des eaux souterraines.

2.1. LA RESSOURCE EN EAU SUPERFICIELLE

On énumérera succinctement les données utiles qui ont trait respectivement aux structures du système, aux flux (liés à la mobilisation de la ressource et à la protection contre les crues), à la qualité des eaux, aux potentiels énergétiques, au coûts d'aménagements et

aux impacts sur l'environnement. Il est à noter que la liste qui suit définit le souhaitable dans l'idéal et que bien souvent il s'agira d'adapter la méthodologie à l'existant.

2.1.1. Structure des systèmes de ressource

Les données utiles sont :

- . la carte du réseau hydrographique "classé" en cours d'eau permanents, saisonniers, épisodiques ;
- . les limites des bassins et sous-bassins principaux ainsi que leurs superficies respectives ;
- . les profils en long des vallées ;
- . la localisation et capacité de réservoirs naturels (lacs), localisation et superficie de plans d'eau naturels (marais) ;
- . la localisation des sites de barrage-réservoirs, et parfois d'ouvrage de prise, inventoriés (carte) et tableau de caractéristiques dimensionnelles (capacité de retenue, relations hauteur/volume et volume/surface, hauteur de chute utilisable, altitude de prise), localisation et caractéristiques de sites de retenue collinaire et de mare ;
- . la localisation d'aire d'épandage d'eau de crue pour alimentation artificielle de nappe souterraine et/ou décantation des transports solides.

Ces données seront élaborées sur la base :

- de cartes à l'échelle moyenne et petite (1/200.000 à 1/1.000.000) compatible avec les cartes topographiques générales disponibles,
- des photos aériennes et des images satellites existantes ou à programmer,
- de modèles numériques de terrain (MNT).

2.1.2. Flux de ressource

Les données utiles sont :

- . un tableau de données hydrologiques élaborées et normées relatives aux stations de mesure (localisées sur carte) : débits annuels et mensuels moyens et caractéristiques de fréquences définies (0,05 / 0,1 / 0,5 / 0,9 / 0,95), fréquences complémentaires de défaillance, débits d'étiage et de crue (intensité et durées) ; débits solides moyens annuels ;
- . la répartition estimée des flux dans l'ensemble du réseau hydrographique : carte des classes de débit moyen, de débits caractéristiques, de débit d'étiage ; avec localisation si possible des secteurs à débit maximal pour des fréquences données ;

- . les mesures ou estimations des débits solides des différentes rivières ;
- . le tableau d'estimation des grandeurs probables de ces flux aux principaux sites d'aménagement inventoriés (valeurs interpolées après homogénéisation), aux points approximatifs à débit maximal et éventuellement aux passages de frontière (cours d'eau entrant ou sortant) ;
- . les indications sur les degrés d'indépendance par rapport aux eaux souterraines (tant en amont, lorsque celles-ci soutiennent des débits de base, notamment en étiage, qu'en aval lorsqu'elles sont alimentées par infiltration d'eau superficielle) ;
- . les indications sur les sensibilités présumées du régime d'écoulement à des transformations du milieu (occupation du sol, végétation...), y compris aux incidences d'exploitation d'eau souterraine ;
- . une carte de l'évaporation potentielle (Hauteurs moyennes annuelles, avec tableau donnant les modulations saisonnières) à la fois en tant que :
 - facteur d'évaporation réelle de plans d'eau naturels réductible par le drainage, donc constituant un potentiel de ressource "récupérable" ;
 - facteur de "pertes" des réservoirs d'accumulation, donc de diminution du rendement des aménagements de régularisation. (Hauteurs moyennes annuelles, avec tableau donnant les modulations saisonnières).
- . les tableaux des flux régularisables, pour les principaux sites d'ouvrages inventoriés, et/ou des maîtrises d'écoulement obtenues (degré d'écrêtement des crues, diminution de probabilité d'occurrence de crues calamiteuses en aval) selon diverses variantes. "Hydrogrammes" de production possible ;
- . le tableau sur l'évolution des capacités des retenues : dégradation dues au comblement par les sédiments et durées de vies hypothétiques. Cette donnée est importante dans les PVD.

Ces données sont établies sur la base :

- des données observées aux stations hydro-climatologiques (pluie, débit...) ;
- d'outils d'analyse statistique (valeurs classées, analyse fréquentielle...) ;
- de modèles pluie-débit et/ou de méthodes de reconstruction de séries au cas où les données de débit existantes s'avèrent insuffisantes.

Dans le cas où le régime des cours d'eau est fortement influencé par l'utilisation des eaux ou par des aménagements, il faut des données sur les modifications artificielles apportées au régime naturel pour pouvoir à partir des mesures effectuées, reconstituer le régime naturel.

Le BRGM possède d'une part divers logiciels de traitement statistique de données hydroclimatologiques (pluies, ETP, hauteurs d'eau, débits) lui permettant d'établir en pointe et en durée les valeurs de crues et d'étiages de période de retour donné.

D'autre part, le modèle Gardenia est un modèle global à réservoirs représentatifs du bilan hydrologique d'un bassin versant (analyse des différents termes du cycle hydrologique - infiltration, évaporation, écoulement) qui permet le calcul de la ressource en eaux superficielles à partir de séries pluviométriques. C'est un outil précieux dans le cadre d'établissement de Plans Directeurs dans la mesure où il est tout particulièrement adapté aux synthèses régionales.

Enfin, le BRGM dispose de modèles hydrauliques (RIO, RIVIERE) de simulation des écoulements de surfaces permettant le calcul de lignes d'eau et l'analyse monodimensionnelle de propagation d'onde de crues.

2.1.3. Qualité des eaux

Il s'agit de déterminer les caractéristiques physiques et chimiques des eaux vis-à-vis des usages les plus courants (AEP, irrigation...) en se rapportant soit aux étiages naturels, soit aux eaux régularisées (qualité minimale assurée ou à assurer) ; le résultat pourra se présenter sous la forme d'une carte de répartition par classes normatives.

Cette cartographie sera basée sur les analyses physico-chimiques existantes. Au cas où ces analyses s'avèrent insuffisantes la qualité de l'eau sera appréhendée de façon quantitative par la définition d'un débit minimum admissible. En l'absence de valeurs prédéterminées qui ne pourront résulter que de choix traduisant le plus souvent un consensus local ou d'études approfondies, ce débit pourra être pris égal au débit minimum des 30 jours consécutifs secs de fréquence décennale.

2.1.4. Potentiel énergétique

Il s'agira d'établir les potentiels hydro-électriques et s'il y a lieu les puissances équipables en différents points du bassin hydrographique.

La banque de données PROPHETE du BRGM est tout à fait adapté à ce type de démarche.

En effet, PROPHETE (PRoduction Potentielle Hydro-Electrique sur tout le Territoire), permet à un utilisateur non spécialiste d'estimer la production hydro-électrique potentielle en tout site de France Métropolitaine, en fonction des caractéristiques de la chute et de l'équipement prévu. Ce calcul est possible grâce à une base de données hydrométriques contenant les données mensuelles de 2160 stations (soit 25 000 années stations).

La banque PROPHETE qui est extrêmement souple, peut être utilisée à différents niveaux : pour faire une première évaluation de faisabilité (pas de temps mensuel) puis si besoin pour faire des calculs plus précis de rentabilité pour un équipement choisi, et en fonction des tarifications réelles les plus récentes.

Actuellement implantée sur l'ordinateur VAX 1 du B.R.G.M. à Orléans, elle est interrogeable à distance sur micro-ordinateur ou console standard par le réseau téléphonique téléphonique TRANSPAC. Elle permet de réaliser des évaluations de ressources de cours d'eau (débits mensuels) et des avant-projets de micro-centrales.

2.1.5. Coûts d'aménagement

Les données utiles sont les coûts totaux et les coûts unitaires de chaque équipement projetable.

Dans le cadre de l'établissement de ce guide méthodologique il a été entrepris une recherche bibliographique (cf. annexe 4) sur les coûts unitaires d'équipement hydraulique ; il s'agissait de rassembler et de classer (selon la zone géographique, le type et la dimension de l'équipement) les abaques et les formules existant dans la littérature et permettant de passer d'un ou plusieurs paramètres explicatifs à un coût global moyen dudit équipement.

2.1.6. Impacts des aménagements

Il s'agira de quantifier les impacts prévisibles des aménagements en aval, exprimés en coûts externes/préjudices portés à d'autres activités et à l'environnement ; y compris leurs incidences sur le régime des eaux souterraines qu'elles soient bénéfiques ou préjudiciables à leurs utilisateurs.

2.2. LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE

L'évaluation des ressources en eau souterraine d'un territoire donné se divise en deux phases :

- évaluation des ressources naturelles, c'est-à-dire des potentialités, en termes de flux et de réserves, distribuées non uniformément dans l'espace et variables dans le temps ;
- . évaluation des ressources exploitables et utilisables, c'est-à-dire de la part de ces potentialités qui peut être pratiquement et économiquement mobilisable en fonction des demandes, d'un niveau technologique et d'un contexte socio-économique donné.

2.2.1. Evaluation des ressources naturelles

L'évaluation des ressources naturelles nécessite une description -pour l'ensemble du territoire- de la distribution des principaux réservoirs aquifères, des régimes d'écoulement et des ordres de grandeur de l'alimentation des nappes et des réserves, c'est-à-dire des **conditions hydrogéologiques**. Elle correspond à ce que l'on dénomme souvent l'"inventaire" des ressources en eau (souterraine). Celui-ci peut être très variable en fonction de la complexité des structures hydrogéologiques, de la densité des points observables et de l'importance de l'utilisation des eaux souterraines lorsqu'elles sont déjà sollicitées.

En règle générale, des inventaires extensifs, à petite échelle, sont suffisants en un premier stade pour identifier les caractéristiques essentielles des ressources en eau souterraine naturelles d'un pays et pour définir des programmes d'investigation sélectrice ultérieure.

2.2.2. Evaluation des ressources exploitables et utilisables

L'évaluation des ressources exploitables et utilisables en eau souterraine (renouvelables et/ou non renouvelables) est une opération beaucoup plus complexe, car elle ne peut se réduire à exprimer et quantifier une (des) offre(s) indépendamment de leur interaction avec les demandes : il n'y a pas de solution unique.

Cette évaluation nécessite donc, non seulement des informations sur les conditions hydrogéologiques naturelles (y compris sur les relations entre eaux souterraines et eaux de surface), mais elle requiert aussi un minimum d'hypothèses et d'indications sur les demandes à satisfaire (quantités, qualités, localisation, variabilité, coût acceptable). Ce sont ces indications - exprimables par des scénarios ou des "schémas d'aménagement" provisoires - qui permettent de circonscrire les secteurs où des informations physiques plus complètes et plus précises sont utiles pour estimer la faisabilité et les avantages d'une exploitation d'eau souterraine, c'est-à-dire pour établir et évaluer des "avant-projets", parmi lesquels des projets seront à sélectionner et à étudier ultérieurement.

Cette approche très pragmatique de l'évaluation des ressources exploitables, interactive avec l'expression des demandes et des contraintes à respecter, se traduit par des demandes d'information progressives ; suivant le degré de précision estimé souhaitable et économiquement possible cas par cas.

Les besoins d'information correspondants se rapportent essentiellement :

- à l'identification des systèmes aquifères (dimensions, structure, types de régime hydrodynamique, ordres de grandeur des paramètres et distribution dans l'espace) ;
- à leur connexion avec les cours d'eau de surface (qui fait partie de leurs conditions aux limites) ;
- aux ordres de grandeur de leur alimentation (= ressources naturelles renouvelables) et de leur capacité (qui peut déterminer des ressources non renouvelables).

2.2.3 Modèles de simulation de systèmes aquifères

Le flux et le stock participent l'un et l'autre à la ressource en eau souterraine :

- ressource renouvelable offerte au captage, facilité par le rôle de volant régulateur de la réserve,
- ressource non renouvelable offerte au déstockage de la réserve, qui produit un débit nécessairement temporaire.

Ainsi, l'évaluation de la ressource en eau souterraine est très liée au choix d'une stratégie d'exploitation et aux importances relatives des parts prises par la gestion de flux et par la gestion de stock, et cela pour 2 raisons essentielles :

- parce que l'exploitation transforme la dynamique naturelle d'une nappe ; elle peut faire croître ou décroître les apports et surtout elle soustrait nécessairement une partie de la réserve en fournissant, pendant une durée variable mais parfois très longue, des quantités d'eau en surplus de celle détournées du flux naturel ;
- parce que, selon ses modalités, les effets déterminés par l'exploitation se heurtent inégalement aux contraintes internes et externes qui limitent la possibilité pratique et économique (relative à différents critères d'appréciation) de capter l'eau.

Il est donc intéressant d'élaborer des modèles, c'est-à-dire des schémas conceptuels cohérents des divers systèmes aquifères réels, auxquels s'appliqueront différents scénarios d'exploitation possibles se traduisant par des couples

débits produits/incidences déterminées

définis à la fois dans l'espace et dans le temps, et confrontables tant aux demandes qu'aux contraintes à respecter.

Dès que les systèmes aquifères considérés sont assez étendus et complexes et/ou que les programmes d'exploitation imaginés pour satisfaire les demandes sont eux-mêmes complexes (situation dans l'espace et variation dans le temps), l'évaluation des incidences prévisibles des scénarios d'exploitation projetés nécessite de recourir à des instruments de simulation appropriés.

La représentativité de ces modèles de simulation doit toutefois être ajustée dans chaque cas aux besoins : c'est-à-dire qu'il faut et qu'il suffit que les modifications déterminées par les actions projetées sur le système réel puissent être réduites, sans erreur d'ordre de grandeur, par le modèle sur lequel ces actions sont simulées.

Les besoins d'informations nécessités pour la construction d'un modèle de système aquifère sont très relatifs à son usage : un minimum d'idées directrices sur le plan et le scénario d'aménagement souhaité doit être formulé dès le début d'une étude d'évaluation de ressources. La construction du modèle sera ensuite interactive avec l'acquisition des données (succession d'essais/erreurs) jusqu'à l'obtention d'un schéma jugé satisfaisant.

La représentativité d'un modèle devra surtout être affinée :

- dans les secteurs d'implantation de captage projetés,
- dans les secteurs (notamment à certaines limites) où des contraintes particulières sont imposées (conservation de débit, de niveau).

Les données hydrogéologiques descriptives se répartissent en 2 groupes ayant pour matières respectives les aquifères et l'eau souterraine :

Données sur les aquifères, relativement stables, et significatives à 2 échelles :

- . échelle géologique des réservoirs (ordre de 1 à 10^2 m en verticale, de 10^2 à 10^5 ou 10^6 m en plan horizontal) pour les données géométriques et structurales ;
- . échelle lithologique des "volumes élémentaires de référence" pour les paramètres des roches qui conditionnent l'écoulement et l'emmagasinement de l'eau (ordre de 10^{-2} à 10 m, parfois plus pour les roches fracturées).

Données sur l'eau souterraine : dynamique des nappes (potentiels - charge hydraulique - flux), caractéristiques physiques et chimiques de l'eau. Les variables hydrodynamiques sont essentiellement les niveaux piézométriques, les débits aux limites, les données sur les zones non saturées (tensions, humidité du sol...), le taux d'infiltration évalué à partir de données climatologiques et hydrologiques.

L'acquisition des données hydrogéologiques de base procède de techniques :

- d'observation et de prospection "passives" (inventaire, lever, mesures périodiques, échantillonnages et analyses) mises en oeuvre surtout par des agents individuels,
- d'investigation et d'essai "actives" (prospection géophysique, sondages de reconnaissance, essais hydrauliques, traçages) qui nécessitent des moyens plus lourds et plus coûteux.

Le tableau ci-après synthétise l'ensemble des données hydrogéologiques nécessaires en précisant leur typologie, leurs techniques d'acquisition et leurs formes d'expression.

OBJET	TECHNIQUES D'ACQUISITION	FORMES D'EXPRESSION
<p>AQUIFERE</p> <ul style="list-style-type: none"> . constitution litho-stratigraphique . configuration, étendue . structure (géométrie) . valeurs et distribution des paramètres (perméabilité, emmagasinement) : aquifères et formations limitrophes . conditions aux limites, notamment type de liaison cours d'eau/aquifère 	<ul style="list-style-type: none"> . géologie de surface et sub-surface (cartographie, photogéologie, sondages, géophysique et diagrapies) . pompages d'essai, essais sur échantillons, analyses de données dynamiques naturelles . géomorphologie, géologie de sub-surface, piézométrie 	<p>cartes, profils, tableaux ou fichiers de données numériques</p>
<p>EAU SOUTERRAINE</p> <ul style="list-style-type: none"> . niveaux (potentiels) et conditions d'écoulement (nappe libre, captive) . débits aux limites (flux infiltré, émergences) . température . caractéristiques chimiques 	<ul style="list-style-type: none"> . piézométrie (lever, réseaux d'observation), traçages . hydrométéorologie, hydrométrie . thermométrie . échantillonnages et analyses (ioniques, isotopiques) 	<p>chroniques (annuaires, fichiers) et graphiques f(temps)</p> <p>cartes (distributions de valeurs moyennes, ou synchrones).</p>

En raison de l'importance des données "physiographiques" sur les aquifères et de la relative stabilité des données variables, la connaissance d'un système aquifère nécessite des travaux plus amples et coûteux, mais des durées moindres que celles des eaux superficielles (surtout à régime très irrégulier). Cette durée des opérations d'études, dans l'hypothèse où l'on se trouverait dans un état de connaissance initial très réduit, peut s'accorder avec celle impartie généralement à l'élaboration d'un plan directeur, soit 2 à 3 ans.

Le BRGM est bien équipé sur le plan de l'évaluation des ressources en eaux souterraines avec notamment les logiciels :

- **ISAPE** qui permet l'interprétation semi-automatique des pompages d'essai et donc la caractérisation du comportement hydrodynamique des aquifères en y intégrant divers schémas hydrauliques.

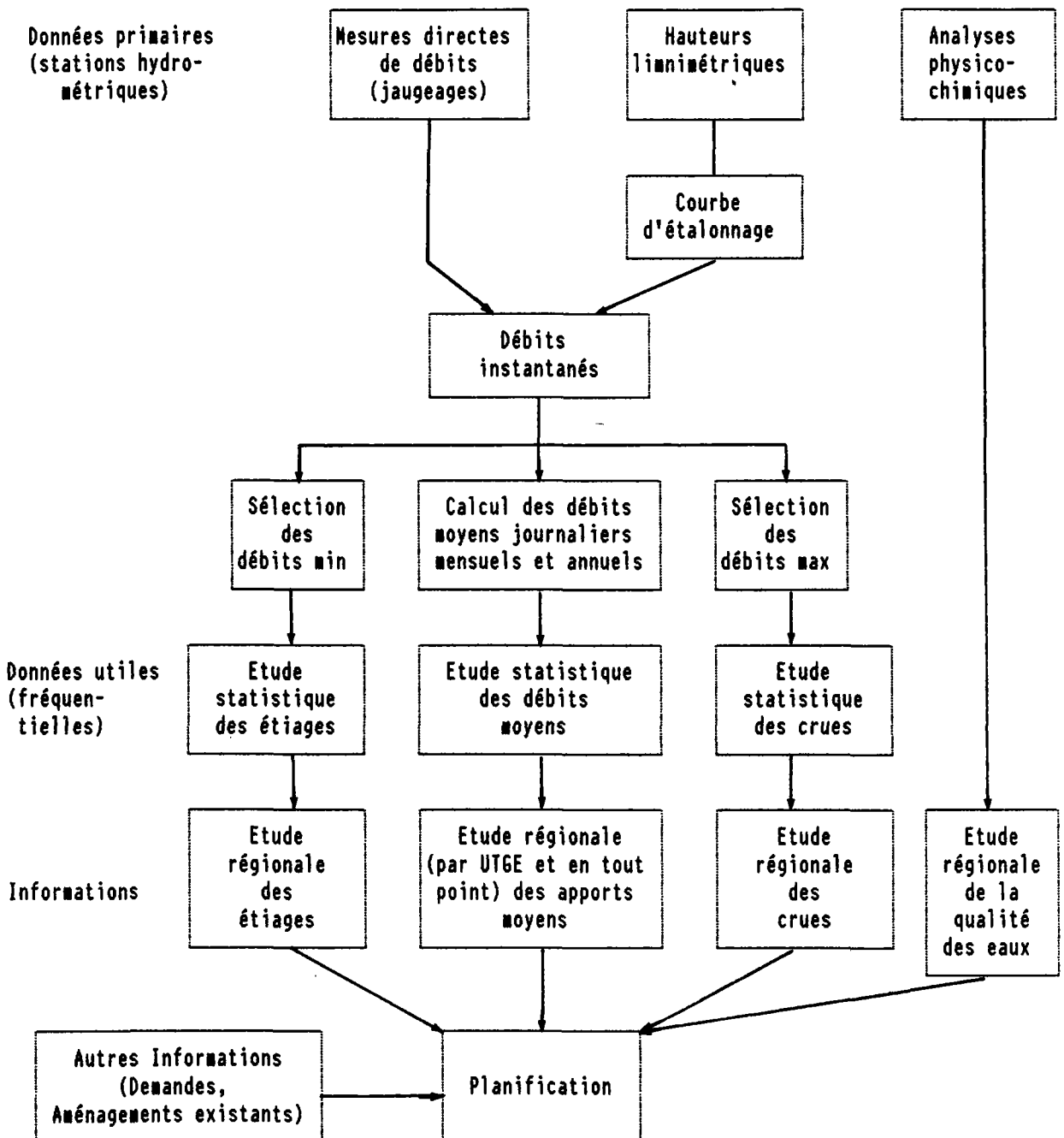
- **MARTHE** modèle hydrodynamique aux différences finies qui permet l'étude de la dynamique des nappes souterraines bi ou tridimensionnelles.

3 - L'EVALUATION DES RESSOURCES LIEES A LA PLANIFICATION

On analysera successivement la procédure générale d'évaluation et la représentation pratique des informations utiles au planificateur en distinguant, comme précédemment, les eaux superficielles, des eaux souterraines.

3.1. LES EAUX SUPERFICIELLES

La démarche hydrologique classique part des données hydrométriques de base jusqu'à l'évaluation régionale des écoulements (flux moyens, minimum et maximum) selon le schéma suivant.



L'étude des apports moyens est notamment intéressante pour définir les potentialités hydro-électriques de la zone d'étude. Mais elle se rapporte, tout comme l'étude des étiages, aux objectifs de mobilisation de la ressource. Elles permettent de mettre en évidence les défaillances conjoncturelles et/ou structurelles vis-à-vis des usages de l'eau.

L'étude régionale des crues concerne les objectifs de protection.

Enfin l'étude de la qualité des eaux se rapporte au schéma d'objectifs de qualité.

Cependant souvent (et c'est le cas généralement dans les PVD en zone aride ou semi-aride) cette démarche n'est pas appropriée par manque de données hydrométriques.

Aussi la méthode de substitution préconisée repose sur le tryptique pluviométrie, bassins représentatifs, modèles pluies/débits.

Au plan des acquisitions de données de base, priorité est donc donnée aux réseaux pluviométriques, plus faciles à développer et à exploiter que les réseaux hydrométriques. De même la collecte et la critique des données pluviométriques disponibles est une action essentielle.

Des bases de mesures installées temporairement (5 à 10 ans) dans un petit nombre de bassins représentatifs, de préférence d'ensembles de bassins emboîtés de superficies très différentes, permettent d'établir des relations empiriques pluie/écoulement dans différentes conditions climatiques et physiographiques bien définies à valeur extrapolable.

L'ORSTOM a ainsi installé et exploité pendant plusieurs années une trentaine de bassins représentatifs dans la région aride et semi-aride sahélienne d'Afrique de l'Ouest.

L'élaboration d'opérateurs pluie/écoulement, fournit des instruments qui synthétisent l'écoulement probable (non mesuré) à partir de données sur la pluie (mesurées), en prenant en compte différentes variables d'état climatiques ou structurales (observables), à la fois dans l'espace et dans le temps (notamment pour élaborer des "extensions" dans le temps de chroniques de données observées trop courtes).

Le "modèle d'offre" idéal pour évaluer la ressource en eau superficielle devra donc :

- Décrire la répartition spatiale des flux exprimés par des lois de distribution fréquentielles et faisant bien ressortir les défaillances et les occurrences de séquences déficitaires pluri-annuelles - de manière analogue aux informations requises en toute zone climatique - mais restreintes aux bassins "productifs" et équipables, et focalisée aux sites de prise et d'accumulation reconnus.
- Indiquer pour chaque site de dérivation d'eau de crue les distributions fréquentielles probables de nombres de jours d'écoulement.

- Indiquer pour chaque site de retenue :
 - . les relations capacité/efficacité régulatrice compte tenu des effets de l'évaporation, et leur évolution probable compte tenu de l'"envasement", ainsi que l'évolution des salinités ;
 - . les coûts approximatifs du m³ régularisé, dans les différentes variantes possibles.
- Estimer les impacts (effets externes) éventuels des aménagements envisageables, notamment sur les ressources en eau souterraine, et esquisser les mesures d'accompagnement visant à les corriger s'ils sont préjudiciables.
- Exprimer les ressources exogènes (importées) éventuelles en termes de ressource potentielle, tenant compte des contraintes (droits) d'amont, formalisées ou présumées.
- Exprimer également les ressources globales (endogènes + exogènes) en termes de ressource potentielle si le territoire est exportateur (cours d'eau sortant frappé d'une contrainte de réservation de débit à l'aval).
- Indiquer les éléments de régime d'écoulement et les zones sensibles à des impacts de transformations des conditions de surface, à des exploitations d'eau souterraine, à des déversements de déchets (cours d'eau pérennes et périodes d'étiage notamment).

En pratique, il est rare que cet ensemble complet d'information puisse être élaboré dans l'état des connaissances préalables ou acquises de manière compatible avec les moyens et les délais impartis aux études de planification. Aussi, la conception d'un plan d'aménagement et de développement des eaux superficielles doit-elle le plus souvent se contenter d'informations partielles et approximatives sur la ressource.

Ces informations qui traduisent les connaissances acquises et qui concrétisent l'évaluation de la ressource en eau superficielle peuvent être présentées sous la forme :

- d'une représentation d'indications localisées et distribuées dans l'espace par la cartographie,
- d'un chiffrage de certaines quantités globales et sectorielles par UTGE pour une présentation comptable.

3.1.1. Cartographie de la ressource

L'importance des dimensions spatiales dans les confrontations entre ressources et demandes en eau (actuelles et futures), comme la conception des schémas d'aménagement qu'elles motivent, fait de la cartographie un mode privilégié d'expression d'information pour le planificateur, en particulier pour représenter la "distribution spatiale de la ressource" : plus précisément, des éléments régionalisables (à une échelle convenable) du modèle d'offre.

Cette cartographie doit exprimer des informations relatives aux potentialités offertes par les conditions naturelles et à leurs traductions technico-économiques. Elle constitue par elle-même un instrument d'interpolation qui synthétise et généralise l'état des connaissances.

Il faut aussi noter l'intérêt des systèmes modernes de cartographie automatique qui permettent à partir de base de données de disposer très rapidement de représentations cartographiques variées utilisables dans la confrontation ressources besoins, pouvant même représenter des états autres que moyens.

3.1.2. Comptabilité de la ressource

Les données quantitatives sur les flux (rivières) et stocks (lacs, retenues...) permettent d'opérer :

- des sommations d'une part au niveau des unités de base (UTGE) définies préalablement, d'autre part au niveau de divers champs de confrontation ressources/besoins (bassin, région, pays),
- des moyennes relatives à des pas de temps et périodes de diverses durées,
- des estimations fréquentielles en terme de période de retour.

Ces représentations comptables n'ont certes qu'une utilité opérationnelle restreinte pour la planification puisqu'il s'agit de comptes globaux et qu'ils n'expriment qu'un aspect de la ressource. Elles indiquent cependant des ordres de grandeur à considérer sur le plan macroéconomique et à confronter à ceux des demandes en eau (sur des bases cohérentes).

Ces quantifications globales complètent donc la cartographie qui visualise surtout la distribution de valeurs locales (par unité de surface) ; de même les estimations de probabilités d'occurrence et d'indices de variabilité complètent la cartographie qui représente surtout des états moyens.

3.2. LES EAUX SOUTERRAINES

La démarche visant à évaluer la ressource en eau souterraine d'une zone géographique donnée peut se décomposer comme suit :

1. Analyse des conditions physiques du territoire et plus particulièrement des systèmes aquifères régionaux qu'il comporte (délimitation, caractérisation) :
 - . Collecte et traitements de données hydrogéologiques et autres.
 - . Découpage du territoire en unités d'évaluation et de gestion de ressource (systèmes aquifères) en liaison avec les UTGE définies initialement.
 - . Expressions synthétiques des connaissances par secteur.
2. Conversion des connaissances en modèle d'offre exprimé suivant les dimensions technico-économiques de la ressource et comportant l'estimation des sensibilités du milieu qui peuvent motiver des servitudes de conservation de ressource à imposer à d'autres activités (y compris à des aménagements d'eau de surface...).
3. Identification des contraintes externes qui peuvent réciproquement restreindre les possibilités d'exploitation d'eau souterraine (tant au niveau de l'aménagement des eaux global qu'à celui plus large de l'aménagement du territoire).
4. Incorporation de ces contraintes, en tant que facteurs limitants déclarés ou éventuels, au modèle d'offre et évaluation résultante de la ressource potentielle dans chaque secteur.

Parallèlement à l'évaluation de cette ressource potentielle, il s'agit d'opérer l'analyse de l'état actuel des exploitations, de caractériser leurs incidences sur la ressource potentielle et donc les contraintes internes que les modes de production engendrent.

En effet, comme il a été exposé précédemment, l'évaluation de la ressource en eau n'est pas séparable de la conception de son exploitation. L'appréciation de faisabilité de différents plans et scénarios d'exploitation (dispositif, croissance...) est indissociable de leur application au modèle d'offre. Une simulation prévisionnelle de chaque scénario est nécessaire pour déterminer ses incidences techniques et économiques. Il s'agit bien là d'une confrontation ressource/demande ayant pour résultat l'évaluation de la ressource exploitable.

L'expression des informations relatives aux eaux souterraines en plus des modes cartographique et comptable (cf. eaux superficielles) peut donc être transcrite par un modèle de simulation hydrodynamique.

Après avoir servi à vérifier la cohérence des données et des hypothèses décrivant un système aquifère (schéma ou "modèle conceptuel"), ce qui cautionne leur aptitude à simuler avec assez de validité le comportement du système représenté, de tels modèles sont par excellence des instruments servant :

- à calculer plus précisément les éléments comptables analytiques tels que ceux présentés plus haut,
- de plus et surtout, à répondre à des interrogations de complexités variées, en calculant les effets prévisibles, à différents termes, de tous scénarios d'exploitation projetés (engendrés eux-mêmes par des "modèles de demande"), ce qui permet d'apprécier leur faisabilité.

Construire de tels modèles capables à la fois d'élaborer les réponses voulues, avec l'exactitude et la précision accordées aux besoins d'éléments de décision et de les formuler "en clair" fait partie des travaux d'évaluation de ressource. Exploiter ces modèles, en simulant des scénarios d'exploitation, s'intègre par contre dans les opérations de conception d'un plan directeur.

Les résultats d'exploitation et les indications technico-économiques élaborées sur leur base, constituent bien une évaluation de la ressource en eau souterraine exprimée dans toutes ses "dimensions" et suivant une pluralité d'options, en fournissant au planificateur pour différents scénarios d'exploitation envisageables, les informations suivantes :

- production maximale compatible avec des critères fixés, globale et par secteur, éventuellement répartie en tranches de qualité et de coût unitaire initial ;
- évolutions prévisibles des effets internes, notamment dans l'hypothèse d'une exploitation croissante ;
- effets externes : incidences éventuelles sur les eaux de surface ;
l'incidence sur les eaux de surface est à examiner sur 2 aspects :
 - . incidence du prélèvement (si le prélèvement est effectué à un débit variable, tenir compte du décalage dans le temps de cet effet),
 - . incidence du rejet (une exploitation d'eaux souterraines n'entraînant pas une forte consommation nette peut se traduire par une augmentation ou une régularisation de la ressource en eau de surface.
- servitudes éventuelles à imposer à d'autres activités pour conserver les potentialités exploitées.

CHAPITRE 4

COÛTS UNITAIRES

C H A P I T R E 4

SOMMAIRE

	Pages
1 - INTRODUCTION	1
2 - RAPPELS SUR LES NOTIONS DE COUTS DE BASE, D'IMPREVUS PHYSIQUES, DE PROVISIONS POUR HAUSSES DES PRIX, TAXES, DEVISES	3
3 - COMMENTAIRES SUR LA DOCUMENTATION CONSULTEE	5
4 - EXPOSE DE LA METHODE DE REVISION DES FORMULES ET DES COURBES	6
TABLEAUX DES FORMULES ET ABAQUES	

COÛTS UNITAIRES

1 - INTRODUCTION

Dans le cadre d'un Plan Directeur ou d'un Schéma d'Aménagement des Eaux, le calcul des coûts d'équipement constitue un des éléments essentiels du choix des scénarios retenus. Cela est vrai également dans le cas d'étude d'APS (avant-projet sommaire) et d'APD (avant-projet détaillé). Cependant, pour les Plans Directeurs, des calculs précis de coûts ne sont pas nécessaires car il s'agit :

- de vérifier la faisabilité de différents scénarios et leur compatibilité avec les ressources financières disponibles (internes et externes),
- de comparer entre eux les coûts des différents scénarios afin de ne retenir que les plus intéressants économiquement,

et cela avec des méthodes simples, rapides, et d'un coût réduit. Ces calculs de coût doivent permettre de se faire une idée des coûts approximatifs de toutes les composantes d'un scénario d'aménagement ainsi que servir de base à l'analyse financière et économique qui, elle, permettra de s'assurer si l'aménagement est non seulement viable mais rentable.

L'expérience a souvent montré qu'au stade d'un schéma d'aménagement et/ou d'une pré faisabilité d'un projet, les décideurs et techniciens avaient du mal à appréhender l'ordre de grandeur du coût d'un équipement, d'autant plus que celui-ci représentait un poste lourd dans le projet (tel qu'un réservoir, une station de pompage,...). L'objet de cette note est donc de présenter à partir d'une analyse bibliographique, des formules et courbes empiriques de coûts de base d'équipements intervenant dans les travaux d'aménagement et de gestion des eaux.

L'analyse des documents traitant globalement du coût des équipements en hydraulique a été effectuée essentiellement au sein du BRGM. Celle-ci montre qu'il y a peu d'articles en langue française sur ce sujet mais que par contre les publications nord-américaines (et notamment celles de la Banque Mondiale) semblent donner le plus d'informations sur la question.

Il s'agissait donc de rassembler et de classifier (selon la zone géographique, le type et la dimension de l'équipement) les abaques et formules existant dans la littérature et permettant de passer d'un ou plusieurs paramètres explicatifs à un coût global moyen (éventuellement définition d'une fourchette de coût) dudit équipement. Ces paramètres explicatifs peuvent être le débit, la hauteur manométrique, le diamètre, la longueur, la profondeur, etc...

Il s'agissait enfin pour chaque type de matériel, de définir leur durée de vie moyenne, paramètre essentiel de tout calcul de rentabilité économique.

Les résultats de cette investigation sont regroupés dans les tableaux ci-après et donnent :

- l'expression de la formule brute avec les unités et paramètres explicatifs utilisés, le pays d'application, la devise employée (type, date d'évaluation) ainsi que la référence bibliographique (date de parution, intitulé),
- l'expression de la formule actualisée en francs français, valeur au 31/12/88, les grandeurs physiques étant exprimées en unités du système international (SI).

Cette première approche pourra à l'avenir être grandement améliorée si l'on se donne les moyens

- d'étendre notre champ de recherche bibliographique,
- d'assurer une actualisation périodique des données,
- d'installer ces résultats sur support informatique.

Le but final pourrait être l'établissement d'une véritable banque de données sur les coûts unitaires et éventuellement la mise en place d'un système expert de calcul de coût global d'équipement.

2 - RAPPELS SUR LES NOTIONS DE COÛTS DE BASE, D'IMPREVUS PHYSIQUES, DE PROVISIONS POUR HAUSSES DES PRIX, TAXES, DEVICES...

2.1. COÛTS DE BASE

Les coûts de base sont estimés, selon les prix en vigueur à un moment précis dans le temps, en supposant que la quantité de biens, travaux et services ne changera pas durant l'exécution et que le projet se déroulera comme prévu. Ils sont établis dans les études techniques à partir des coûts unitaires, et des quantités (mètres) ; le degré de fiabilité varie en fonction :

- du niveau de détail atteint par les études, en particulier au moment de l'évaluation du projet, des études assez poussées permettant de mieux apprécier les quantités ;
- de la qualité des sources utilisées pour établir les coûts unitaires. On a recours aux données fournies par l'Administration, à la compilation des marchés les plus récents, pour estimer un prix moyen pour chaque type de prestation, ou aux indications de prix données par divers entrepreneurs ou fournisseurs.

Les estimations des coûts de base doivent être plusieurs fois réajustées au cours des différentes étapes de la préparation du projet : pendant l'étude de factibilité, au moment de l'évaluation et éventuellement au moment des négociations.

2.2. PROVISIONS POUR IMPREVUS PHYSIQUES

Ces provisions reflètent les augmentations des coûts de base, attendues par suite d'éventuels changements des quantités ou des méthodes d'exécution du projet. Elles recouvrent ce que l'on comptabilise parfois au titre de "divers et imprévus" ou encore "imprévus physiques".

Dans le domaine du génie civil, on les utilise notamment pour faire face aux incertitudes en rapport avec des éléments tels que : difficultés du terrain liées à la topographie, à la nature du sol, imprécisions dans les estimations et les plans de travaux ; possibilités de changement pendant l'exécution,...

Dans le domaine de l'acquisition de matériels ou d'équipements, ces provisions couvrent des incertitudes liées à l'imprécision des quantités estimées (par exemple, pièces de rechange), à l'insuffisance de renseignements concernant le matériel à acquérir, aux difficultés liées à la commande...

Les provisions pour dépassement sont calculées en pourcentage des coûts de base. Elles varient selon les prestations : par exemple, 5 % quand les caractéristiques des travaux où des matériels ont été très faciles à déterminer, 10 % pour les travaux où les incertitudes sont bien identifiables, 15 % ou 20 % en cas de difficultés importantes. On estime souvent que les imprévus physiques sont de l'ordre de 15 % pour les APS (Avant-Projets Sommaire) et de 10 % pour les APD (Avant-Projets Détaillés).

2.3. PROVISIONS POUR HAUSSES DE PRIX

Les provisions pour hausses de prix reflètent les augmentations attendues pour les coûts, en fonction des changements qui interviendront dans les prix unitaires, après l'estimation des coûts de base. Ces provisions sont calculées à partir des coûts de base et imprévus physiques, ventilés selon l'échéancier d'exécution. Chaque déboursement est multiplié par le coefficient d'inflation applicable à la date prévue pour ce déboursement (le mode de calcul sera repris plus en détails ci-après).

2.4. TAXES, DEVICES ET MONNAIE LOCALE

Parallèlement aux notions précédentes (coûts de base, provisions,...) doivent être rappelées 3 autres notions : taxes, devises et monnaie locale.

Taxes :

Les Pouvoirs Publics appliquant en général des taxes (t) sur la production ou la vente de produits ou services ; il convient donc de distinguer : Coûts "toutes taxes comprises" (TTC) et Coûts "hors taxes" (HT).

$$\text{On a : } (\text{TTC}) = (\text{HT}) + (t)$$

Il arrive qu'une marchandise ou des travaux soient parfois exonérés de taxes (t) ; par ailleurs dans le cas d'un financement extérieur, le Bailleur de fonds ne finance généralement pas les taxes ; enfin, la distinction entre Coûts TTC et HT est nécessaire pour l'analyse économique d'un projet.

Devises/Monnaie locale :

Un certain nombre de coûts doivent être payés avec un fort pourcentage de devises (matériels, équipements) ; d'autres au contraire sont payés avec un fort pourcentage de monnaie locale (main d'oeuvre, carburant, par exemple). L'impact d'un projet d'équipement sur la balance des paiements du pays est sensible à la proportion des devises mobilisées. D'où cette distinction à l'intérieur des coûts hors taxes HT, de la part en devises (D) et en monnaie locale (L). La distinction coûts TTC et coûts HT est faite quel que soit le projet ; celle entre devises et monnaie locale est surtout opérée lors de projets à financements extérieurs.

La détermination du rapport "devises/monnaie locale" varie selon la nature des actions envisagées par le projet : travaux de génie civil, acquisition de matériel, études,... La détermination de ce rapport nécessite généralement une décomposition du coût (par exemple, main d'oeuvre, matériaux, matériels). Mais ce rapport est d'autant moins facile à apprécier que chaque action du projet est souvent complexe et fait intervenir différents éléments pour lesquels le rapport "devises/monnaie locale" est différent.

Dans ce cas, la méthode proposée consiste à :

- faire la décomposition des prix de chaque sous-composante (tranchée, par exemple) en prestations élémentaires : on obtient ainsi différents pourcentages de main d'oeuvre matériel, équipement, matériaux, transports... Ce type de décomposition se fait sur la base de marchés ou de bordereau de prix récents ;
- apprécier ensuite la part respective en devises et monnaie locale, de chaque prestation élémentaire. On obtient ainsi une deuxième série de pourcentages que l'on multiplie par la première. Cette appréciation est faite sur la base de compilation de marchés, d'interview de responsables, entrepreneurs, bureaux d'études,...

3 - COMMENTAIRES SUR LA DOCUMENTATION CONSULTÉE

La documentation consultée recouvre divers pays, que ce soit des pays en voie de développement ou des pays développés.

Il est certain que les formules valables dans un pays compte tenu de son niveau technico-économique ne sont pas transposables telles quelles dans un autre pays.

Les principales données qui ont servi à l'élaboration de cette note sont extraites des documents suivants :

- Journal of the American Water Works Association (J. AWWA).
- Notes et rapports de la Banque Mondiale.
- Revues "Technique et sciences Municipale" (TSM - eau).
- Cahiers techniques de l'Agence Financière de Bassin Seine-Normandie.
- Notes et rapports internes au BRGM.

Les documents donnés en annexe comportent tous la référence bibliographique dont ils sont extraits.

Il serait intéressant dans l'avenir de faire une analyse détaillée de toute la documentation propre au BRGM portant sur les résultats technico-financiers des opérations de petite hydraulique rurale réalisées en Afrique. La masse de données existe mais se trouve dispersée dans de trop nombreux rapports et à notre connaissance aucune tentative de synthèse globale pour l'ensemble des pays africains n'a été tentée. Il existe cependant quelques synthèses portant essentiellement sur les ouvrages de captage.

4 - EXPOSE DE LA METHODE DE REVISION DES FORMULES ET DES COURBES

Les documents de coûts que nous avons sélectionnés sont de deux ordres :

- 1) documents élaborés à partir de données françaises (BRGM, AGENCE DE BASSIN...),
- 2) documents élaborés à partir de données étrangères (ETATS-UNIS, AMERIQUE DU SUD, BANQUE MONDIALE,...).

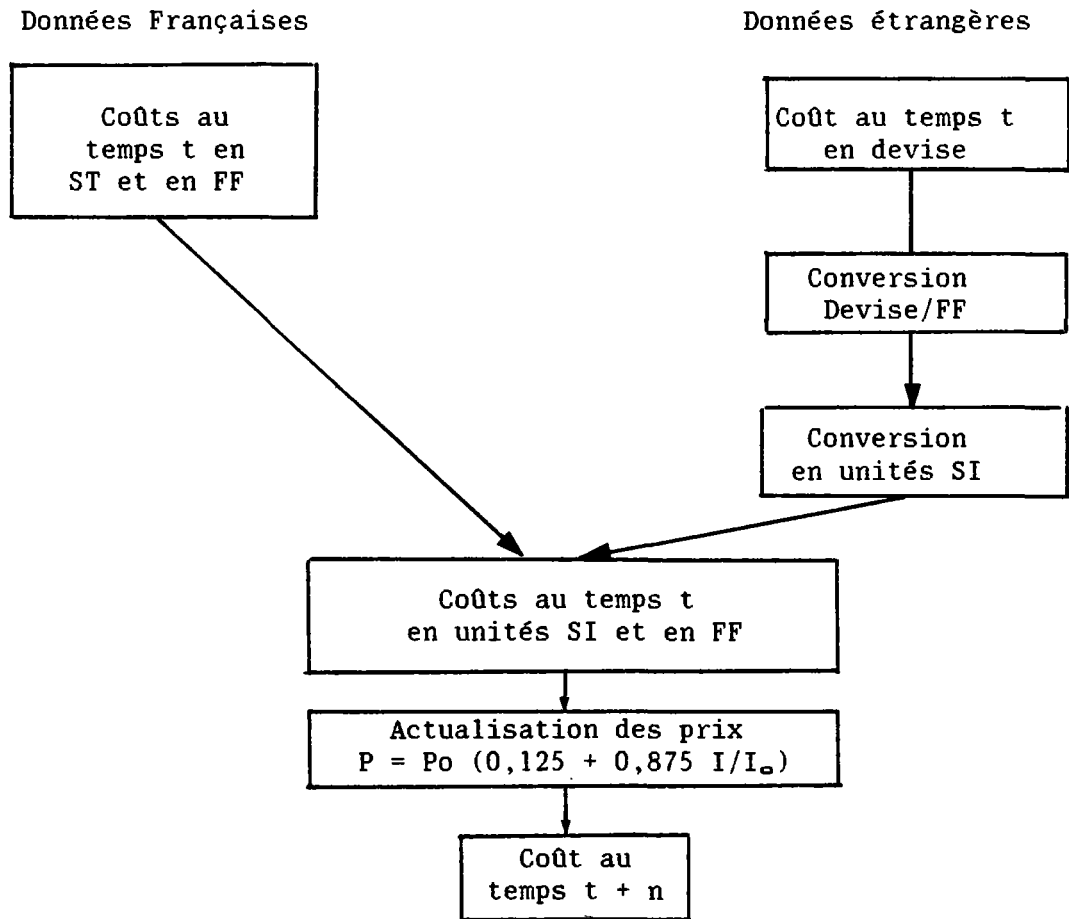
En ce qui concerne les documents français, nous avons appliqué la formule de révision des prix utilisant l'index TP01 (INDEX GENERAL TOUS TRAVAUX PUBLICS - base 100 en Août 1975). L'emploi de la formule ainsi que l'évolution des index TP01 depuis 1975 sont rappelés ci-après.

Pour ce qui est des documents de la littérature étrangère, nous avons du tenir compte à la fois de la parité de la devise avec le franc français et de la formule de révision des prix citée plus haut ; la devise généralement utilisée a été le Dollar américain.

D'autre part, comme ces formules sont souvent exprimées en unité anglo-saxonnes, elles ont été transformées dans le système d'unités internationales (système SI) afin de permettre une meilleure lecture. On trouvera plus loin l'évolution de la parité FF/US \$ entre 1970 et 1988.

Dans les tableaux tous les coûts sont ramenés à la date du 31 décembre 1988.

La démarche peut se schématiser comme suit :



- où
- t = mois de l'élaboration de la formule
 - t + n = mois de l'actualisation
 - Po = prix du marché hors TVA au mois t
 - P = prix révisé hors TVA au mois t + n
 - 0,125 = partie fixe obligatoire
 - 0,875 = partie variable
 - Io = Index TP01 du mois t d'établissement du prix (Po)
 - I = Index TP01 pour le mois de révision t + n (Prix P)

COUTS UNITAIRES

EVOLUTION DE L'INDEX TP01

INDEX TP 01

Index général tous travaux

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1970						127,7	128	128	128,8	129,7	130,3	130,7
1971	132,2	133,5	135,9	137,8	139,1	139,4	140	140,1	141,1	142	142,2	142,5
1972	143,6	143,8	144,4	146,3	146,6	147,9	149,2	149,1	151,9	152,9	153,6	154,6
1973	155,2	156	158,9	161,9	162,3	164,5	166,1	166,6	169,3	172	177	178,4
1974	183,3	193	195,5	199,9	205,9	207,6	211	212,5	218,3	219,8	221,5	222,8
1975	100 226,8	99,9	98,5	98	98,9	99,7	100	100	100,3	101,1	101,7	102,5
1976	105	106,5	108,4	111,4	112,5	115	115,8	117	118,6	120	121	121,6
1977	121,2	122,2	123	124,4	125,1	126	127,1	127,2	127,9	129	129,1	129,8
1978	132,4	133	135	136,7	137,6	139,5	142,6	143,4	144,9	145,1	145,7	147,1
1979	149,2	151,1	152,6	154,1	155,5	158,4	160,5	162,5	165,2	167,6	168,7	171,5
1980	174,4	178,8	182,4	183,8	186,1	187,6	189,4	189,5	192,5	194	195,7	199,7

JANVIER 1975 - Nouvelle base : 100, Ancienne base : 226,8
(base 100 - Janvier 87)

INDEX TP 01

Index général tous travaux

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1981	201,5	203,8	207,1	208,6	210,1	213,3	216,8	219,1	222	227,2	230,6	234,1
1982	239,6	243,6	246,7	248,9	250,3	251,5	252	252,1	253,1	253,6	256,5	261,5
1983	264,2	265,2	266,7	269,5	271,1	273,6	274,8	275,4	277,3	279,7	281,1	283,3
1984	286,6	289,6	291,7	293	294,1	295,7	297,7	298,7	299,9	303,1	305,2	306,3
1985	309,6	312,9	315,8	316,6	316,2	315,8	317,4	316,7	316,6	318,8	319,2	320,8
1986	319,2	314,1	314,2	313,6	313,2	311,9	310,4	306,6	307,8	308,3	307,2	308
1987	312,4	312,3	311,7	313,7	313,8	314,2	316,3	317,7	317,6	319,1	319,5	319,4
1988	318,5	318,5	319	320,2	321,5	323,2	325,6	326,6	329,1	330,4	331	332,2

Base 100 - Janvier 1975

COUITS UNITAIRES

EVOLUTION PARITE US\$/FF

EVOLUTION DU DOLLAR US PAR RAPPORT AU FRANC FRANCAIS (1970-1980)
- Moyennes mensuelles au fixing -

USD	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Janvier	5,5531	5,5186	5,1738	5,0832	5,0294	4,3652	4,4753	4,9694	4,7169	4,2412	4,0382
Février	5,5444	5,5178	5,0882	4,7692	4,9554	4,2810	4,4695	4,9788	4,8389	4,2761	4,0955
Mars	5,5431	5,5152	5,0403	4,5274	4,8234	4,1996	4,6236	4,9814	4,7134	4,2874	4,3136
Avril	5,5315	5,5155	5,0367	4,5526	4,8641	4,1972	4,6700	4,9644	4,5847	4,3506	4,3423
Mai	5,5212	5,5259	5,0135	4,4828	4,8632	4,0420	4,7003	4,9528	4,6512	4,4072	4,1810
Juin	5,5521	5,5271	5,0135	4,2508	4,9026	4,0042	4,7373	4,9398	4,5799	4,3649	4,1128
Juillet	5,5176	5,5133	5,0021	4,0546	4,7689	4,2249	4,8448	4,8507	4,4394	4,2446	4,0551
Août	5,5210	5,5146	5,0034	4,2448	4,7763	4,3758	4,9623	4,8943	4,3604	4,2572	4,1502
Septembre	5,5201	5,5203	5,0048	4,2602	4,8016	4,4710	4,9154	4,9220	4,3619	4,2001	4,1587
Octobre	5,5230	5,5330	5,0226	4,2140	4,7349	4,4094	4,9802	4,8592	4,2237	4,1966	4,2426
Novembre	5,5285	5,5243	5,0417	4,4173	4,6736	4,4051	4,9896	4,8538	4,3621	4,1607	4,4489
Décembre	5,5522	5,4155	5,0845	4,5895	4,5372	4,4584	4,9874	4,7935	4,3201	4,0659	4,5673

EVOLUTION DU DOLLAR US PAR RAPPORT AU FRANC FRANCAIS (1981-1989)
- Moyennes mensuelles au fixing -

Année	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Mois									
Janvier	4,6415	5,7155	6,7695	8,5925	9,6985	7,498	6,194	5,575	6,25
Février	4,9685	6,0175	6,8815	8,3235	10,0705	7,162	6,084	5,737	6,307
Mars	4,97	6,1425	7,0105	8,0015	10,1115	6,963	6,105	5,694	6,325
Avril	5,105	6,2435	7,3165	8,1135	9,4115	7,196	6,032	5,68	
Mai	5,4895	6,0135	7,4305	8,4497	9,4705	7,114	5,97	5,734	
Juin	5,6615	6,5795	7,6635	8,4195	9,3395	7,129	6,075	5,916	
Juillet	5,7995	6,8455	7,7795	8,7395	8,8775	6,927	6,151	6,215	
Août	5,9815	6,9155	8,0405	8,8625	8,5245	6,726	6,202	6,391	
Septembre	5,6445	7,0645	8,0605	9,2795	8,6585	6,68	6,052	6,35	
Octobre	5,6245	7,1475	7,9495	9,4175	8,068	6,549	6,019	6,2174	
Novembre	5,6145	7,2145	8,1725	9,1745	7,895	6,625	5,707	5,9702	
Décembre	5,7155	6,8575	8,3815	9,4965	7,698	6,543	5,5369	5,997	

COÛTS UNITAIRES

**TABLEAUX DES FORMULES
ET ABAQUES**

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT :
AERATION DE L'EAU (STATION DE TRAITEMENT)

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p>$Coût = 17\ 000 (Q\ M)^{0.74}$ où $Q\ M$ est exprimé en millions de gallons par jour soit $3785\ m^3/jour$</p> <p>$coût = 310\ Q_m^{0.74}$ où $Q\ M$ est le débit maximum journalier exprimé en $m^3/jour$ (parité 1 USD = 5,4347 - (juin 81)</p>	USA	USD	juin/81	4/83	Jawwa
		FF	Déc 88		

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT :
EGOUT EN TERRE CUITE ØDE 100 A 500 MM

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p>Coût au ml = $9,81 + 173 D^2 + 0,51 X^3$ où D est le diamètre en mètre et x la profondeur moyenne d'excavation en mètre.</p> <p>Coût au ml = $82,13 + 1450 D^2 + 4,27 X^3$ où D et X sont exprimés dans les mêmes unités que précédemment parité 1 USD = 4,5128 FF (juin 78)</p>	BRESIL	USD	78	4/82	JAWWA pp171-177
		FF	Déc 88		

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT :
STATION D'EPURATION . DUREE DE VIE 25 A 30 ANS

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p><i>Coût = 1110 Q^{1.08} où Q est le débit d'eau moyen mis en l/s</i></p> <p>coût = 9369 Q^{1.08} où Q est en l/s Parité 1 USD = 4,5128 FF (juin 78)</p>	BRESIL	USD	78	4/82	JAWWA pp171-177

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT :
REDUCTEUR DE PRESSION

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p><i>LN coût = 8,077 + 0,662 LN Ø</i> <i>ou LN est le logarithme neperien et Ø le diamètre du</i> <i>réducteur de pression en pouces</i></p>	USA	USD	JUIN 78	4/81	<i>Water</i> <i>ressource</i> <i>Bulletin</i> <i>vol17n°2</i>
<p>LN coût = 17.334 + 1,542 LN Ø où Ø est exprimé en mm Parité 1 USD = 4,512 FF (juin 78)</p>		FF	jan 89		

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT :
COMPTEUR D'EAU Ø 15 A 100 MM - DUREE DE VIE 5 A 7 ANS

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
$Coût = - 18,711 + 55,788 \varnothing + 24,004 \varnothing^2$ où \varnothing est le diamètre nominal du compteur en pouce	USA	USD	1/78	4/81	Water ressource vol.17n°2
$Coût = - 196,65 + 23,0843 \varnothing + 0,3910 \varnothing^2$ où \varnothing est le diamètre nominal en mm Parité 1 USD = 4,5127 FF (Jan 78)		FF	JANV 89		

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT :
ROBINET-VANNE DE Ø 40 A 400 MM

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p>$Coût = 213,700 - 47,664 \varnothing + 7,991 \varnothing^2$ où \varnothing est le diamètre nominal du robinet vanne en pouces</p>	USA	USD	1/78	4/81	Water ressour. vol17n°2
<p>$Coût = 2435,2 - 19,73 \varnothing + 0,1302 \varnothing^2$ où \varnothing est le diamètre nominal du robinet vanne en mm (Parité 1 USD = 4,5127 FF (jan 78))</p>		FF	janv 89		

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT :
CONDUITE EN AMIANTE CIMENT

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p>$LN \text{ Coût} = 0,667 + 0,127 \cdot L$ (conduite de \emptyset 150 mm) où LN est le logarithme neperien et L est la lonueur en pieds de la conduite de diamètre nominal 150 mm</p> <p>$LN \text{ coût} = 3,0193 + 0,417 L$ où L est la longueur de la conduite en mètres de diamètre nominal 150 mm Parité 1 USSD = 4,5127 FF (Jan 78)</p>	USA	USD	jan 78	4/81	Water resour. bulletin vol117n°12
<p>$LN \text{ coût} = 0,789 + 0,133 L$ (conduite de \emptyset 200mm) où LN est le logarithme neperien et L est la longueur en pieds de la conduite de diamètre nominal 200 mm</p> <p>$LN \text{ coût} = 3,1413 + 0,436 L$ ou L est la longueur de la conduite en mètres de diamètre nominal 200 mm (Parité 1 USD = 4,5127 FF (jan 78)</p>	USA	USD	janv 78	4/81	Water resour. bulletin vol117n°12
		FF	jan 89		
		FF	jan 89		

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT :
TUYAUX EN ACIER GALVANISE Ø 60 A 160 MM

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p><i>Coût en ml = 0,029286 D^{1.33}</i> <i>D = diamètre en mm</i></p>	<i>PHILIPPINE</i>	<i>USD</i>	<i>84</i>	<i>86</i>	<i>HYD 1562 Banque Mondiale n° 16</i>
<p>Coût en ml = 0,27856 D^{1.33} (D = diamètre en mm) Parité 1 USD = 8,419 FF (juin 84)</p>		FF	dec 88		

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT : CONDUITE EN PVC
COUTS SUIVANT LA LONGUEUR DE CANALISATION

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p>$Coût = 0,851 + 0,033 L^2$ (conduite de \emptyset 160 mm) où L est la longueur en pieds de la conduite</p> <p>$Coût = 8,944 + 3,733 L^2$ où L est la longueur en mètres de la conduite Parité 1 USD = 4,5128 FF (jan 78)</p>	USA	USD	01/78	04/81	Water ressour. bulletin v0117n°2
<p>$Coût = 0,864 + 0,039 L^2$ (conduite de \emptyset 200 mm) où L est la longueur en pieds de la conduite</p> <p>$Coût = 9,081 + 4,412 L^2$ où L est la longueur en mètres de la conduite Parité 1 USD = 4,5128 FF (janv 78)</p>	USA	USD	01/78	04/81	Water bulletin v0117n°2
<p>$Coût = 0,861 + 0,053 L^2$ (conduite de \emptyset 250 mm) où L est la longueur en pieds de la conduite</p> <p>$Coût = 9,049 + 5,996 L^2$ où L est la longueur en mètre de la conduite Parité 1 USD = 4,5128 FF (jan 78)</p>	USA	USD	01/78	04/81	Water Resour Bulletin v0117n°2

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT :
TUYAUX PVC Ø 60 A 160 MM DUREE DE VIE 20 ANS

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p>Coût au ml = $4,27 - 0,16 D + 0,025 D^{1.5}$ D = diamètre nominal en mm</p>	BRESIL	USD	1978	4/82	J.AWWA p171-177
<p>Coût au ml = $35,85 - 1,34 D + 0,2093 D^{1.5}$ D = diamètre nominal en mm Parité 1 USD = 4,5128 FF en 1978</p>		FF	dec 88		
<p>Coût au ml = $0,0257143 D^{1.32}$ D = diamètre nominal en mm coût comprenant fourniture et pose</p>	PHILIPINE	USD	1983	86	HYD 1562 Banque Mond N°16
<p>Coût au ml = $0,234 D^{1.32}$ D = diamètre nominal en mm Parité 1 USD = 7,6635 FF (juin 83)</p>		FF	dec 88		
<p>Coût au ml = $0,002257 D^{1.79}$ D = diamètre nominal en mm</p>	PHILIPINE	USD	1984	86	HYD 1562 Banque Mond n°16
<p>Coût au ml = $0,02106 D^{1.75}$ D = diamètre nominal en mm Parité 1 USD = 8,4195 FF (juin 84)</p>		FF	dec 88		

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT : RESERVOIR GENERAL
(valable pour une consommation journalière)

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p>$Coût = 9500 + 2090\ 000 (Q\ M)^{1.06}$ où $2\ M$ est le débit maximum journalier en millions de US gallons par jour ($1\ mgd = 3785\ m^3\ j^{-1}$)</p> <p>$coût = 76825 + 272.5\ Q\ M$ où $Q\ M$ est le débit maximum journalier en m^3 par jour</p>	USA	USD	juin 81	4/83	JAWWA
		FF	dec 88		

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT :
RESERVOIR AU SOL . DUREE DE VIE 25 A 30 ANS

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p>$Coût = 688 V^{0.67}$ ou V est en m^3 $Coût = 5900 V^{0.67}$ ou V est en m^3 Parité 1 USD = 4,5128 FF (juin 1978)</p> <p>(Réservoir métallique) $LN \text{ coût} = 6,3644 + 0,3954 LN V$ où LN est le logarithme neperien V est le volume du réservoir exprimé en US Gallon (1US gallon = 3,78 l)</p> <p>$LN = \text{coût} = 10,9216 + 0,3954 LNV$ où V est exprimé en m^3</p>	BRESIL	USD	78	4/82	JAWWA p 171-177
		FF	dec 78		
	USA	USD	78	4/81	Water Ressou. Bulletin vol17n°2
		FF	89		

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT : RESERVOIR
SURELEVE - DUREE DE VIE 25 A 30 ANS

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p>Coût = $200,93 Q^{0.92} H^{0.25}$ où Q = volume en m^3 H = hauteur du réservoir en m (H varie de 12 à 22 m et la hauteur de l'eau dans la cuve est de 5 m)</p> <p>Coût = $1828,4 Q^{0.92} H^{0.25}$ (Q est en m^3 et H en m) Parité 1 USD = 7,6635 FF (juin 1983)</p>	PHILIPPINE	4USD	juin/83	86	Banque Mondiale n° 16 Hyd 1562
		FF	Déc 88		
<p>Coût = $1775 V^{0.5375}$ où V est le volume en m^3</p> <p>Coût = $22\ 500 V^{0.5375}$ où V est le volume en m^3 (Parité 1 USD = 4,7797 FF (Juin 76)</p>		USD	76	76	Banque Mondiale AEP des Comm. Rurales
		FF	Déc. 88		
<p>Réservoirs métalliques surélevés de 30 000 à 400 000 US gallons (110 à 1500 m^3)</p> <p>Coût = $96\ 374 + 141.10^{-8} Q^2$ où Q est le volume en US gallons</p> <p>Coût = $1.012.900 + 1,0341 Q^2$ où Q est le volume en m^3 Parité 1 USD = 4,5127 FF (Janv. 78)</p>	USA	USD	1/78	4/81	Water Ress. Bull. Vol.17, N° 2
		FF	Janv.89		

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT : TRAITEMENT
EN EAU POTABLE - DUREE DE VIE 20 A 30 ANS

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p>$Cr = \alpha Qn^\beta$ où $Cr =$ Coût total de l'installation de traitement en milliers de dollars et $Qn =$ Capacité nominale en milliers de US gallons par jour ($1mgd = 3785 l/$)</p> <p>α et β sont des coefficients d'ajustement de la fonction On a $Cr = 257 Qn^{-0.33}$</p> <p>$Cr = 2399825 Q^{-0.33}$ où Q est en $m^3.j^{-1}$ Parité 1 USD = 6,0106 FF (< 1987)</p>	USA	USD	87	5/87	J. AWWA pp.57-61
<p>$Coût = 730 Q^{0.694}$ où Q est en $m^3.j^{-1}$</p> <p>$Coût = 6112 Q^{0.694}$ Q est en $m^3.j^{-1}$ Parité 1 USD = 4,5128 FF (Juin 78)</p>	BRESIL	USD	78	4/82	J. AWWA pp.171-177

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT : STATION DE
POMPAGE - HAUTE PRESSION

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p>Coût = 46.600 (Qm)^{0.19} où Qm est le débit maximum journalier en millions de US gallons par jour (1 mgd = 3785 m³.j⁻¹)</p> <p>Coût = 78.765 Qm^{0.19} où Qm est le débit maximum journalier en m³ par jour</p>	USA	USD	06/81	04/83	J. AWWA

PLANIFICATION ET GESTION DES
RESSOURCES - FICHE DE RECHERCHE

NATURE DU PRODUIT : STATION DE
POMPAGE (SP) - DUREE DE VIE : 20 ANS GENIE CIVIL
5 A 10 ANS ELECTROMECHANIQUE

DESCRIPTION DES FORMULES, DIAGRAMMES, ABAQUES, TABLEAUX...	ESTIMATION PAYS	DEVISE		REF. BIBLIO.	
		TYPE	DATE	DATE	TITRE
<p>$Coût = 1548 Q^{0.64} HMT^{0.23}$ où Q = débit de pointe en l/s et la hauteur monométrique totale (HMT) en m</p> <p>$Coût = 12961 Q^{0.64} HMT^{0.23}$ Q en l/s $Coût = 5710 q^{0.64} HMT^{0.23}$ Q en m³/h Parité 1 USD = 4,5128 FF (Juin 1978)</p> <p>On consultera dans l'annexe IV la courbe d'évaluation des coûts d'investissement de stations de pompage pour des débits allant de 100 m³/h (# 28 l/s) à 2500 m³/h (# 695 l/s)</p> <p>* Nota : l'abaque donne des prix moyens pratiqués en décembre 1981 d'une station de pompage pour une HMT de 5 à 8 m et d'une station de reprise pour une HMT de 50 à 100 m. Ces prix sont hors taxes, ils se rapportent à des installations complètes et comprennent : - le génie civil, les groupes électropompes, l'équipement hydraulique, la protection antibélier et l'équipement électrique complet</p> <p>La formule de réactualisation avec l'indice TP01 s'écrit : P = 1,367 Po Po = prix HT décembre 81 ; P = prix HT décembre 88</p>	BRESIL	USD	1978	4/82	J.AWWA pp.171- 177
		FF	Dec88		
		FF	1981		Cahier n° 11 (Agence de bassin Seine- Normand.

CHAPITRE 5

**ANALYSE FINANCIERE
ET ECONOMIQUE**

C H A P I T R E 5

SOMMAIRE

	Pages
1 - INTRODUCTION	1
2 - ANALYSE FINANCIERE SOMMAIRE D'UN PROJET	3
3 - REMARQUE GENERALE	11
4 - ANALYSE ECONOMIQUE D'UN PROJET	12

ANALYSE FINANCIERE ET ECONOMIQUE

1 - INTRODUCTION

1.1. LE CADRE GENERAL

L'élaboration d'un schéma directeur d'aménagement nécessite d'analyser globalement divers projets ou diverses variantes d'un même projet, et donc notamment les divers investissements nécessaires. Il importe donc de disposer d'outils pratiques permettant de faire un choix entre plusieurs investissements et permettant de rejeter ceux qui n'ont pas une rentabilité suffisante sur le plan financier et économique.

Les outils les plus fréquemment utilisés dans ce type d'étude sont la valeur nette (actualisée ou non) et le taux de rentabilité interne (TRI). Ils sont, en effet, de mise en oeuvre et d'emploi faciles.

Le but de la présente note est de replacer l'utilisation de ces outils dans le cadre général de l'analyse financière et de l'analyse économique.

La souplesse d'analyse mentionnée plus haut, due à la nécessité de pouvoir à tout moment modifier certaines caractéristiques des projets étudiés (les choix techniques en cours d'élaboration s'appuient sur de nombreux critères), oblige à concevoir l'évaluation financière et l'évaluation économique de manière simplifiée.

Les calculs de rentabilité seront donc effectués à partir d'analyses financières économiques sommaires. Ce type d'étude s'oppose donc aux évaluations détaillées qui n'ont lieu d'être qu'à partir du moment où les schémas techniques sont définitivement établis (stade APS). A ce stade terminal, il importe en effet d'intégrer dans les évaluations, des éléments d'analyse tels que les plans de financement qui permettront de vérifier l'équilibre de trésorerie du projet ou la capacité de remboursement des emprunts.

Après une introduction générale, seront successivement passés en revue les principes de l'analyse financière sommaire et de l'analyse économique sommaire. On rappelle que l'analyse financière permet de mesurer la rentabilité d'un projet vu du côté de l'entrepreneur ou du particulier décidé à investir alors que l'analyse économique qui découle de la première sert à mesurer l'intérêt du même projet vu du côté de la collectivité nationale.

Si ce dernier point de vue n'est que rarement pris en compte dans le cadre de projets privés, il est systématiquement examiné quand il s'agit de projets intéressants des capitaux cédés par la collectivité (généralement sous forme de prêts).

1.2. LA NOTION D'INVESTISSEMENT ET LA DECISION D'INVESTISSEMENT

L'investissement au sens large est la transformation de moyens financiers en biens ayant la capacité de produire des services pendant un certain temps. L'investissement peut donc être considéré comme un sacrifice de ressources que l'on fait aujourd'hui, dans l'espoir d'une série de recettes futures, dont le total sera supérieur au décaissement initial.

Trois notions essentielles sont donc à prendre en compte lorsqu'il s'agit d'investir :

- la notion de durée : les recettes espérées sont étalées dans le temps ;
- la notion de rentabilité : il importe que les recettes futures soient supérieures à la mise de fonds initiale ;
- la notion de risque : il n'est pas certain que les recettes futures seront supérieures à la mise de fonds initiale.

Toute décision d'investissement raisonnée, devra donc être subordonnée à deux conditions essentielles :

- a) le projet doit faire l'objet d'une étude de rentabilité,
- b) du fait de l'incertitude inhérente aux prévisions à long terme, la notion de risque doit être prise en compte lors de l'évaluation du projet.

Ainsi, un projet techniquement réalisable et apparemment prometteur peut ne pas trouver de justifications financières et économiques, ou bien présenter trop de risques pour être réalisé.

D'autres composantes devront également être prises en compte dès le départ de l'analyse d'un projet ; ce sont des composantes :

- sociales (considérations concernant l'emploi, les conditions de travail,),
- écologiques,
- fiscales,
- politiques, etc.

L'évaluation d'un projet apparaît donc comme une suite d'analyses diverses (analyse multicritères) qui doivent être confrontées les unes aux autres et organisées à l'aide de procédures assurant leur synthèse.

Dans le cadre de cette note, nous ne nous intéresserons qu'aux méthodes permettant de mesurer la rentabilité d'un projet tant du point de vue financier que du point de vue économique.

2 - ANALYSE FINANCIERE SOMMAIRE D'UN PROJET

2.1. PRINCIPE DE L'ANALYSE

L'analyse financière d'un projet part généralement de l'analyse de plusieurs investissements basés sur des budgets d'exploitation modèle. Ces budgets comparent les situations AVEC et SANS projet. Il convient, en effet, d'évaluer chaque solution par rapport à une même situation choisie comme référence.

Le principe de l'analyse financière consiste à mesurer le flux de trésorerie dégagé par les opérations d'exploitation relatives à l'investissement, les éléments prévisionnels à prendre en compte étant les éléments différentiels (les éléments modifiés par la décision d'investir, c'est-à-dire l'augmentation ou la diminution de charge résultant du projet ainsi que l'augmentation correspondante de la production).

De façon simplifiée, étudier un projet d'investissement consiste à comparer 2 flux financiers :

- l'un qui est lié à la réalisation de l'investissement et qui est généralement instantané ; l'investissement peut cependant être fractionné ;
- l'autre progressif et continu, qui est lié à l'exploitation du bien faisant l'objet de la décision.

En analyse financière, la mesure du flux continu lié à l'exploitation est donc de première importance. Effectuée sur toute la durée de vie de l'investissement, c'est cette mesure qui permet de savoir si on peut récupérer plus, moins, ou autant d'argent qu'il sera nécessaire d'en décaisser, pour réaliser l'investissement. Ainsi, un projet ne sera intéressant d'un point de vue financier, que s'il dégage un surplus monétaire.

On exprime cette exigence en disant que sa valeur nette ;

valeur nette = cumul des flux nets annuels - mise de fonds initiale

doit être positive.

Pour illustrer les propos ci-dessus, et ainsi calculer de manière pratique les flux nets de trésorerie, puis la valeur nette d'un projet, un exemple concret est choisi : il s'agit du projet pilote pour la mise en valeur agricole des eaux souterraines au Mali (zone de Fana et San).

L'étude de factibilité de ce projet a été effectuée en octobre 1986 par le groupement BCG (BRGM - CIRAD - GERSAR) sur un financement mixte FAC et Banque Mondiale. Le projet prévoit la mise en chantier de 280 forages et la création de 200 petits périmètres irrigués. Il est fondé sur le principe de la valorisation agricole des excédents d'eau des forages d'hydraulique villageoise après satisfaction prioritaire de l'alimentation en eau potable.

2.2. LE CALCUL DES FLUX NETS DE TRESORERIE D'UN PROJET

La méthode utilisée consiste à dresser sur un tableau récapitulatif un compte d'exploitation année par année et ensuite de retranscrire sur le même tableau toutes les autres opérations de trésorerie effectuées au cours de la vie du projet (20 ans dans le cas présent). Il s'agit ici des investissements initiaux, des frais de renouvellement et du besoin en fonds de roulement.

Nous nous proposons d'explicitier ce tableau (tableau 1) rubrique par rubrique.

2.2.1. Compte d'exploitation

Sont portés dans cette rubrique, les produits bruts de l'exploitation et les charges d'exploitation année par année. Il s'agit, bien entendu, de produits différentiels et de charges différentielles (différence entre la situation avec le projet et la situation sans le projet).

Les produits

Sont portés dans cette colonne, les produits différentiels tels qu'ils ont été déterminés prévisionnellement.

Il s'agit donc ici du chiffre d'affaires hors taxe apporté par le projet selon les prévisions de vente.

Dans le cas d'un projet agricole, il peut être utile de faire apparaître sur le même tableau les rendements espérés avec le projet et les rendements sans projet, de façon à bien faire apparaître les rendements différentiels et donc la production différentielle.

Dans l'exemple choisi (Mali), les produits bruts prévus augmentent jusqu'à la 4ème année pour tenir compte de la montée en puissance de la production. Au terme de la 4ème année, s'établit un régime de croisière.

Les charges

Dans le cadre de notre exemple, il s'agit des charges d'exhaure (c'est-à-dire les charges de fonctionnement de l'unité de pompage) et des charges liées aux intrants agricoles. Ce sont donc des coûts d'activité. Le travail familial n'apparaît pas dans les frais d'exploitation, ni d'ailleurs au niveau des investissements, car la famille d'exploitants agricoles est le bénéficiaire de l'avantage supplémentaire net qui apparaît dans le flux net de trésorerie. La faire apparaître au niveau des frais d'exploitation ou au niveau de l'investissement reviendrait à la comptabiliser deux fois.

Analyse financière sommaire

Années	* 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Compte expl. *																					

Produits bruts	*	4365	4365	5223	5223	5834	5834	5834	5834	5834	5834	5834	5834	5834	5834	5834	5834	5834	5834	5834	5834
Charges	*																				
exhaure	*	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2	1049,2
intrans agr.	*	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4	980,4
org.gestion	*	2413,8	2344,7	1723,7	865,08	395,28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Résultat brut	*	-78,4	-9,3	1469,7	2328,3	3409,1	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4
Impôts	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Résultat net	*	-78,4	-9,3	1469,7	2328,3	3409,1	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4	3804,4

Investissement*																					

Investiss. initiaux	*	4913,7																			
Renouvellement	*	0	0	625	675	0	625	0	675	625	1314	0	1300	0	0	625	675	0	625	0	0
Fonds de roulement	*	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	*	4913,7	1	1	625	675	0	625	0	675	625	1314	0	1300	0	0	625	675	0	625	0

Valeur de récup. des investissements	*																				210

FLUX NETS DE TRESORERIE	*	-4914,	-79,4	-10,3	844,7	1653,3	3409,1	3179,4	3804,4	3129,4	3179,4	2490,4	3804,4	2504,4	3804,4	3179,4	3129,4	3804,4	3179,4	3804,4	4014,4

TAUX DE RENTABILITE INTERNE. 20 ans	*																				0,29263

Tableau 1 : Analyse financière sommaire - Projet BCG MALI (1986)

Les valeurs sont exprimées en milliers de francs CFA.

Les dépenses d'entretien des matériels (comme les pompes) sont souvent incorporées aux dépenses d'exploitation des cultures au profit desquelles ils sont utilisés. Dans la plupart des projets agricoles, ces dépenses sont évaluées à 5 % du coût d'investissement initial à partir de l'année qui suit celle d'acquisition.

Les coûts de structure ou les coûts fixes posent un problème plus complexe. Seuls les coûts fixes modifiés par le projet (en application même de la notion de coûts différentiels) doivent être pris en considération.

La composante organisation et gestion, entièrement mise en place pour le projet Mali, est donc considérée dans sa totalité.

. résultat brut :

résultat brut = produits bruts - charges

. impôts :

cette rubrique prend en compte l'impôt différentiel (impôt résultant de l'accroissement d'activité, ou de la baisse d'activité, par rapport à la situation initiale). On rappelle que le calcul de l'impôt est effectué après déduction des frais financiers et des amortissements. Cette rubrique impôt n'est pas prise en compte dans notre exemple au Mali (projet de développement exonéré d'impôts).

. résultat net :

résultat net = résultat brut - impôts

2.2.2. Montant de l'investissement

Est inscrite sur le même tableau 1, la totalité des investissements effectués année par année. Bien souvent les investissements seront réalisés en une seule étape (à l'instant zéro). Dans le cas présent, les investissements ont lieu pendant toute la vie du projet pour tenir compte du renouvellement des matériels usés (pompes, groupes électrogènes, ...).

A la fin du projet, on prend en considération la valeur de revente des matériels (cf. année 20 - valeur de récupération des investissements - revente de la pompe d'irrigation qui n'est pas complètement usée).

Par ailleurs, et dans bien des cas, il devra être porté dans la colonne investissement, le besoin en fonds de roulement. On doit ainsi déterminer au niveau global du projet, ou alors au niveau particulier de chaque activité, le besoin supplémentaire résultant de l'accroissement d'activité attendu du projet. Ce besoin en fonds de roulement d'exploitation, induit de l'investissement, constitue une véritable demande de capitaux permanents qui s'ajoute en année 1, au coût initial de l'investissement de l'année 0.

Si au cours de l'année 2, l'activité est en hausse par rapport à celle de l'année 1, c'est un nouveau besoin différentiel en fonds de roulement qui apparaîtra. Il en sera ainsi tant que l'activité d'exploitation liée à l'investissement sera en expansion.

Comme pour les biens, ces besoins en fonds de roulement constituent des valeurs résiduelles supplémentaires qui sont récupérées à la fin du projet.

Cette récupération en fonds de roulement constitue alors une ressource (ligne valeur de récupération des investissements).

Flux nets de trésorerie ou avantages supplémentaires nets

On porte dans cette rubrique la somme des produits bruts et des valeurs de récupération diminuée de l'investissement, du total des charges et éventuellement des impôts. On obtient ainsi les flux nets de trésorerie.

Cette rubrique indique donc ce que gagnera l'exploitation étudiée, année par année, grâce à l'investissement, sans tenir compte du financement. On rappelle que le flux net de trésorerie est la différence entre les entrées différentielles et les sorties différentielles générées par le projet par rapport à une situation de référence. Dans le cas d'un projet d'irrigation, la situation de référence pourrait être celle qui existait avant la mise en place du réseau d'irrigation.

Il est à noter, que dans les premières années d'exploitation, les avantages supplémentaires nets peuvent être négatifs pendant la mise en place de l'investissement.

Le calcul des flux nets de trésorerie permet d'estimer les avantages supplémentaires nets résultant de l'existence du projet. C'est également la connaissance de ces flux, et par conséquent de la valeur nette, qui permettra de sélectionner divers investissements et d'en apprécier leur rentabilité.

Remarque : ce type de tableau est en général présenté en monnaie constante, non que les phénomènes inflationnistes soient négligés, mais parce que l'on estime que les prix évolueront parallèlement (ceci n'est pas complètement vrai, surtout en ce qui concerne le poste énergie).

2.3. LA SELECTION DES INVESTISSEMENTS

Nous examinerons successivement les différents outils pour sélectionner les investissements.

2.3.1. Le calcul de rentabilité sans actualisation - le taux moyen de rentabilité

Le taux moyen de rentabilité (TRM), est défini comme suit :

$$\text{TRM} = \frac{\frac{\sum \text{flux nets de trésorerie}}{\text{nombre d'années considéré}}}{\text{capital initialement investi}} \times 100$$

Il s'agit en fait d'un rapport résultats/capitaux engagés.

Le flux net de trésorerie est rapporté au nombre d'années considéré pour tenir compte du fait que les flux nets de trésorerie ne sont pas constants dans le temps.

Par ailleurs, on ne prend en considération que la moitié du capital initialement investi pour tenir compte du fait que les capitaux initialement investis diminuent régulièrement au fur et à mesure de l'exploitation de l'investissement en raison des amortissements.

Le taux moyen de rentabilité peut être utilisé comme critère de sélection : entre deux projets, on choisira celui dont le taux moyen de rentabilité est le plus élevé.

Ce peut également être un critère de rejet : tout projet dont le taux moyen de rentabilité est inférieur à une certaine norme est rejeté.

L'inconvénient du TRM est qu'il ne tient pas compte de l'étalement dans le temps des flux de trésorerie liés au projet, ni de l'échéancier de ces flux.

Avec cette méthode, deux projets qui présentent un taux moyen de rentabilité égal sont équivalents alors que l'échéancier des flux peut être plus favorable pour l'un que pour l'autre.

La méthode du TRM peut toutefois être utilisée pour l'étude comparative d'investissements de faible valeur et de durée relativement courte.

En ce qui concerne les projets faisant appel à des investissements importants, et d'une longue durée de vie, il est indispensable d'apprécier leur rentabilité après rémunération des capitaux.

Il faut non seulement récupérer les capitaux initialement investi, mais également assurer la rémunération de ces capitaux ; c'est le propre des méthodes faisant appel à la notion d'actualisation.

2.3.2. Le calcul de rentabilité avec actualisation - La valeur actuelle et le taux de rentabilité interne

2.3.2.1. La notion d'actualisation

La notion d'actualisation part du principe que l'utilisation d'un franc entraîne le versement d'un loyer de i francs, si i est le taux d'intérêt, de sorte qu'un investissement de 1 franc doit être compensé au cours de l'année suivante par une recette nette égale à $(1 + i)$ franc.

L'actualisation permet de calculer la valeur présente P d'une valeur future F : il y a, en effet, équivalence entre 1 franc dans n années et $\frac{1}{(1 + i)^n}$ franc d'aujourd'hui.

$$\frac{1}{(1 + i)^n}$$

C'est grâce à la technique d'actualisation qui prend le temps en compte que l'on peut :

- rapprocher valablement des sommes disponibles à des dates différentes ;
- comparer deux investissements dont les échéanciers de trésorerie sont différents.

Les tables d'actualisation fournissent directement, pour un taux d'actualisation choisi, le facteur d'actualisation qu'il faut appliquer à toute somme à payer ou à encaisser à une échéance donnée pour en connaître la valeur actuelle.

D'une manière générale, le taux d'actualisation choisi doit être identique pour tous les investissements d'un même projet. Si l'entreprise ou le projet s'autofinance très largement, on retient le taux auquel cette unité aurait pu prêter ses fonds à l'extérieur, augmenté d'une prime de risque. Si l'entreprise ou le projet emprunte massivement, on retiendra le taux d'intérêt du marché.

2.3.2.2. La valeur actuelle nette

La valeur actuelle nette est définie comme suit :

$$\text{VAN} = \Sigma \text{ flux nets de trésorerie actualisés} - \text{investissement initial}$$

La méthode de calcul consiste à :

- déterminer la valeur actualisée de chaque flux de trésorerie lié au projet ; cela comprend l'investissement initial, ainsi que les investissements ultérieurs, les flux nets de trésorerie d'exploitation et la valeur résiduelle de l'investissement ;
- faire la somme algébrique de ces valeurs actualisées.

Ainsi, la valeur actuelle nette positive est le surplus monétaire dégagé par le projet après avoir :

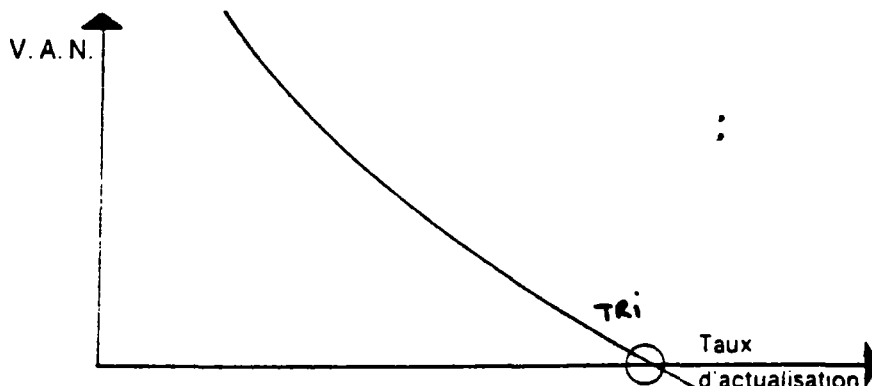
- remboursé le capital investi sur la durée de vie du projet ;
- rémunéré le capital encore investi au début de chaque période à un taux égal au coût des capitaux.

Ainsi, un projet n'est rentable que si la valeur actuelle nette est positive ; une valeur actuelle nette égale à 0 signifie en effet que le projet étudié permet de rembourser et de rémunérer le capital investi, mais qu'il ne laisse pas de surplus à l'entreprise.

Une valeur actuelle nette négative peut donc être utilisée comme critère de rejet. De même la valeur actuelle nette peut être utilisée comme critère de sélection : en effet, entre deux projets, on retient celui dont la valeur actuelle nette est la plus élevée.

2.3.2.3. Le taux de rentabilité interne

a) **Définition et signification du taux de rentabilité interne** : la valeur actuelle nette d'un projet diminue au fur et à mesure que le taux d'actualisation s'élève. La courbe de la VAN, fonction du taux d'actualisation, a l'allure suivante :



On appelle taux de rentabilité interne (TRI) d'un projet, le taux pour lequel la valeur actuelle nette est nulle.

C'est donc le taux i pour lequel il y a équivalence entre :

- le capital investi,
- la somme des flux nets de trésorerie d'exploitation, y compris la valeur résiduelle de l'investissement actualisée au taux i .

b) **Calcul du taux de rentabilité interne** : mathématiquement, ce taux correspond à la racine d'une équation au 2^{ème} degré, fort difficile à calculer.

Dans la pratique, la méthode consiste, pour chaque projet, à chercher par approximation successives le taux qui annule la valeur actuelle nette.

En conservant l'exemple malien (projet de développement agricole), on obtient un taux de rentabilité interne de 29,2 % (cf. tableau 1).

Il est maintenant devenu usuel d'utiliser des logiciels intégrés, type tableur, pour exécuter ce genre d'opération. Le tableur SuperCalc (licence BRGM) a une fonction particulière dénommée TRI, d'utilisation facile. Après affichage de la commande, il suffit d'introduire sur la feuille de calcul l'investissement initial (valeur négative) et les flux nets de trésorerie à intervalles réguliers. Le logiciel utilise une technique itérative pour calculer le taux de rentabilité interne.

A noter que, d'une manière générale, l'emploi d'un tableur est recommandé pour l'analyse d'un projet. On peut ainsi aisément modifier les données et alors effectuer des tests de sensibilité.

c) Utilisation de la notion de taux de rentabilité interne : pour l'emploi du taux de rentabilité interne la pratique est :

- qu'entre divers projets incompatibles, celui dont le taux de rendement est le plus élevé est préférable ;
- que le projet dont le taux de rendement est supérieur au taux d'intérêt moyen auquel sera financé le projet est, a priori, financièrement intéressant.

L'expérience prouve que ce critère est très fréquemment employé, car :

- le taux de rentabilité interne donne une indication sur le taux maximal d'intérêt que peut supporter un projet si la totalité de ses besoins de financement est couverte par des emprunts. Ce critère est en ce sens plus parlant qu'une somme de flux financiers actualisés à x % de y millions ;
- ce critère dispense d'autre part du choix d'un taux d'actualisation, choix qui exige un minimum de réflexion et dans lequel intervient une part de subjectivité. Il a donc un aspect objectif et donne, en outre, un chiffre unique qui permet un classement aisé de divers projets sur le plan financier.

3 - REMARQUE GENERALE

En aval de l'analyse financière sommaire, et selon le même principe de raisonnement, il est possible de réaliser une analyse financière détaillée. Celle-ci devient nécessaire dès que sont arrêtées les caractéristiques techniques du projet étudié, pour mettre au point le plan de financement.

Le passage de l'analyse financière sommaire à l'analyse financière détaillée va consister à affiner le compte d'exploitation prévisionnel, année par année, et à mettre en place un tableau Emplois - Ressources.

Il s'agit ici de pouvoir confronter à tout moment la somme des emplois (investissements, renouvellements, besoins en fonds de roulement, remboursement du capital) à la somme des ressources (capacité auto-financement, capital, emprunt).

On peut ainsi vérifier la présence d'un solde net de trésorerie cumulé toujours positif, même si certains soldes annuels sont négatifs.

On procède de la même façon que précédemment au calcul du taux de rentabilité du projet.

Ce type de démarche est toujours identique en matière d'évaluation financière. Des règles d'évaluation de projets, ont été fixées pour l'ensemble du groupe BRGM.

4 - ANALYSE ECONOMIQUE D'UN PROJET (analyse sommaire)

4.1. PRINCIPES GENERAUX DE L'EVALUATION ECONOMIQUE

Nous avons vu que le but de l'évaluation financière est de veiller à la rentabilité des capitaux investis par les entreprises privées.

L'évaluation économique aide à préparer et sélectionner les projets apportant la plus grande contribution au développement économique. Ce qui importe ici est que le projet étudié soit économiquement satisfaisant pour la collectivité nationale. Ainsi, dans le système d'analyse économique, tout ce qui restreint le niveau national est un coût et tout ce qui l'augmente est un avantage.

Le propos développé ici est de mettre l'accent sur l'intérêt de la réalisation d'évaluations économiques sommaires, en complément de l'étude financière sommaire permettant de donner un nouvel éclairage aux décisions qui définissent techniquement un projet. Une méthode simple fondée sur l'emploi d'un système de prix de référence est décrite ci-dessous.

4.2. LA METHODE DES PRIX DE REFERENCE

Les études financières sont effectuées en utilisant le système de prix imposé par le marché. L'emploi de prix de référence utilisé pour effectuer l'évaluation économique consiste à modifier le système des prix du marché, et à le remplacer par un système de prix théoriques qui est supposé exprimer de façon plus rigoureuse la valeur pour la collectivité des facteurs de production affectés au projet ainsi que des biens et services qu'il produit.

Les prix de référence tentent d'exprimer la valeur de biens et services en fonction de leur plus ou moins grande rareté, divers mécanismes ne permettant pas aux prix du marché de s'adapter au degré de rareté ou d'abondance de ces biens.

Ainsi, si le point de vente d'un produit se situe sur un marché assez ouvert à la concurrence, le prix de vente de ce produit sur ce marché représente probablement une estimation relativement bonne de sa valeur aussi bien économique que financière. Si le marché n'est pas suffisamment concurrentiel, en analyse économique, il faut ajouter le prix financier dont nous nous servons pour qu'il reflète mieux la valeur économique de la denrée en cause, compte tenu de sa rareté ou de son abondance.

Autrement dit, il est tenté, avec cette méthode, de saisir l'intérêt économique d'un projet à partir du coût pour la collectivité nationale de l'emploi de certaines ressources rares et de la valeur pour la collectivité des biens et services qu'il produit ou qu'il consomme.

En modifiant les prix du marché utilisés lors de l'étude financière, ou plus exactement en y substituant des prix de référence (théoriques), il est ainsi possible de calculer un bénéfice économique (somme algébrique de coûts et avantages économiques) qui exprime l'intérêt économique (et non financier du projet).

4.3. QUELQUES REGLES CONCERNANT LE CHOIX D'UN SYSTEME DE PRIX DE REFERENCE

La grande difficulté de la méthode des prix de référence réside dans les choix à faire lors de la mise en place du nouveau système de prix. Il convient en effet d'affecter un prix de substitution (prix de référence) au capital, aux devises, à la main d'oeuvre et enfin aux biens et services consommés ou produits par le projet.

S'il existe effectivement des principes clairement définis, les choix finaux reposent parfois sur des critères quelque peu subjectifs dans lesquels le métier de l'analyste intervient pour une bonne part.

Entre autre, la détermination des prix de référence du capital et des devises est une "affaire délicate" : pour la réalisation d'une étude économique, il convient donc d'obtenir les données relatives à ces deux points auprès de spécialistes de la planification (organismes d'Etat, bailleurs de fonds, ...).

Dans le cadre de cette note, nous ne nous intéresserons qu'aux prix de référence de la main d'oeuvre et des biens et services consommés ou produits par le projet.

Les choix à faire, obéissant à des principes simples, peuvent être réalisés dans le cadre d'un bureau d'étude.

4.3.1. Prix de référence de la main d'oeuvre

Le prix de référence de la main d'oeuvre va tenter de cerner le coût économique de l'emploi de cette main d'oeuvre en fonction de sa plus ou moins grande rareté et dans une moindre mesure, en fonction de la politique gouvernementale en matière d'emploi.

Dans une région à chômage permanent, le coût économique de la main d'oeuvre est nul car son affectation au projet ne provoquera vraisemblablement aucune chute de production.

S'il existe un sous emploi temporaire, son coût économique pourra être nul si la main d'oeuvre est employée temporairement sur le projet en période de sous emploi (cas des travaux d'infrastructures effectués en saison sèche) ou très élevée si elle se trouve réquisitionnée en période de labours ou de récolte. Si elle est affectée au projet en permanence, il faudra évaluer la chute de production dans le secteur d'origine (perte qui peut être compensée par une amélioration de la productivité dans ce même secteur). Dans ces cas, le prix de référence devra également prendre en compte le coût économique de transfert de la main d'oeuvre du secteur où elle était antérieurement employée vers la zone du projet.

4.3.2. Prix de référence des biens et services consommés et produits par le projet

Le principe est ici de saisir la valeur pour la collectivité de biens et services produits ou consommés par le projet. L'évaluation est donc faite à partir de prix pratiqués sur le marché international "pondéré" par les coûts d'acheminement sur la zone considérée.

4.3.2.1. Les biens importés : le coût économique d'un équipement importé est égal au coût frontière CAF hors taxes, augmenté du coût économique de son acheminement sur le site.

4.3.2.2. Les biens exportés : la valeur pour la collectivité d'une production exportée est exprimée par son prix frontière FOB hors taxes, diminué du coût économique de son acheminement à la frontière.

4.3.2.3. Les biens produits pour le marché local mais précédemment importés : la production de ces biens va permettre d'économiser des importations qui avaient été payées au prix CAF. Le prix de référence peut donc être exprimé par le prix frontière CAF.

4.3.2.4. Les biens achetés sur le marché local : la solution la plus couramment adoptée consiste à ajuster le prix de vente du bien considéré en le décomposant en ses divers éléments auxquels on applique les prix de référence correspondant à la main d'oeuvre, à la consommation, ou à l'amortissement de biens importés.

La situation est différente si l'entreprise qui fabrique les biens considérés peut exporter : le prix de référence du bien est alors égal au prix FOB d'exportation, déduction faite des coûts d'acheminement à la frontière.

De même, si la production locale est faible et que d'autres secteurs de l'économie se trouvent dans l'obligation d'importer le même bien, le prix de référence du bien est égal à leur prix CAF d'importation auquel s'ajoute les coûts économiques d'acheminement depuis la frontière.

4.4. LA SELECTION DES INVESTISSEMENTS (OU LA COMPARAISON DES COÛTS ET DES AVANTAGES)

La comparaison des coûts et avantages économiques évalués avec des prix de référence, s'effectuera à l'aide des techniques précédemment étudiées lors de l'étude financière sommaire :

- calcul de la somme des flux économiques actualisés ;
- calcul du taux de rentabilité interne économique.

Cette méthode d'évaluation économique est simple puisqu'on se borne à modifier les prix utilisés lors de l'étude financière en les multipliant par des coefficients de conversion.

Outre la simplicité de calcul, cette méthode est de mise en oeuvre pratique puisqu'elle dispense de la tâche délicate de l'estimation des effets indirects et induits. Les prix de référence sont, nous l'avons vu, calculés en fonction de la situation économique générale, extérieure au projet. Leur emploi intègre la situation de l'environnement économique et de l'impact du projet sur cet environnement.

4.5. REMARQUE GENERALE

L'analyse économique telle qu'elle est décrite ci-dessus, ne prend en compte que des coûts et des avantages tangibles, c'est à dire que les évaluations économiques sont toutes évaluées en terme monétaire. Mais, une analyse plus fine indique que très souvent un projet génère des avantages difficilement quantifiables. C'est le cas des projets BCG, qui, outre la production sur les PPI (Petits périmètres Irrigués), permettent :

- une meilleure mise en valeur des terres cultivées (pratiques culturales améliorées, introduction des engrais, ...)
- une diversification des habitudes alimentaires ;
- une baisse du taux d'exode.

Il apparaît donc indispensable lors d'une évaluation économique de mettre en évidence les justifications sociales attendues par le projet, en les quantifiant dans la mesure du possible.

A l'inverse, il importe également de considérer les effets négatifs introduits ou induits par le projet. On cite le plus souvent les problèmes posés par la pollution industrielle ou bien de développement de maladies hydriques (type bilharziose) favorisé par les projets d'irrigation.

4.6. EXEMPLE D'APPLICATION : EVALUATION ECONOMIQUE DU PROJET PILOTE POUR LA MISE EN VALEUR AGRICOLE DES EAUX SOUTERRAINES AU MALI (ZONES DE FANA ET SAN) (cf. rapport BCG d'octobre 1986)

Nous procéderons par étapes :

- Détermination des prix de référence de la production : les prix financiers ne sont modifiés que pour le maïs, le sorgho et le coton car seuls ces produits sont échangeables sur le marché international. On trouvera en annexe la détermination des prix de substitution. On considère le prix FOB hors taxe diminué du coût économique de l'acheminement jusqu'à la frontière.

Le tableau ci-dessous récapitule les prix du marché de ces 3 produits, ainsi que leurs prix de substitution (en F.CFA) :

	prix du marché	prix de substitution
maïs	55	96,2
sorgho	55	96,2
coton	100	86,2

- Détermination du prix de référence des biens importés : on conserve les mêmes coûts que pour l'analyse financière, dans la mesure où les taxes n'avaient pas été comptabilisées. Par ailleurs, il n'existe pas de problèmes de parité de devises puisque le Mali appartient à la zone franc.
- Détermination des prix de référence des consommations intermédiaires : les prix économiques des consommations intermédiaires sont identiques aux prix financiers, à l'exception :
 - . des engrais et des produits phytosanitaires qui sont subventionnés (les prix économiques sont obtenus en augmentant les prix financiers de 15 %) ;
 - . des carburants pour lesquels on a calculé les taxes (on ne tient compte que de 76 % TTC).
- Détermination du prix de la référence de la main d'oeuvre : on a considéré lors de l'évaluation économique du projet Mali que le coût d'opportunité de la main d'oeuvre était négligeable (le coût de la main d'oeuvre n'avait pas été non plus comptabilisé lors de l'évaluation financière car on a considéré qu'il s'agissait d'une main d'oeuvre familiale qui bénéficiait directement de l'avantage supplémentaire net résultant du projet).
- Calcul du flux net de trésorerie et calcul du TRI : (tableau 2)

$$\text{TRI} = 0,309 \text{ (30,9 \%)}.$$

Dans l'exemple choisi, le TRI financier et le TRI économique sont peu différents. Cela est dû au fait que lors de l'analyse financière aucune taxe sur les matériels d'importation, ni impôts n'avaient été considérée. De plus, les produits agricoles échangeables sur le marché international ne concernent qu'une très faible part de la production totale.

Analyse économique sommaire

Années	* 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

Compte expl. *																						

Produits bruts	*	4376	4376	5284	5284	5895	5895	5895	5895	5895	5895	5895	5895	5895	5895	5895	5895	5895	5895	5895	5895	
Charges	*																					
exhaure	*	897	897	897	897	897	897	897	897	897	897	897	897	897	897	897	897	897	897	897	897	
intrans agr.	*	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	
org.gestion	*	2413,8	2344,7	1723,7	865,08	395,28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Résultat brut	*	29,2	98,3	1627,3	2485,9	3566,7	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	
Impôts	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Résultat net	*	29,2	98,3	1627,3	2485,9	3566,7	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	3962	

Investissement*																						

Investiss. initiaux	*	4913,7																				
Renouvellement	*	0	0	625	675	0	625	0	675	625	1314	0	1300	0	0	625	675	0	625	0	0	
Fonds de roulement	*	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total	*	4913,7	1	1	625	675	0	625	0	675	625	1314	0	1300	0	0	625	675	0	625	0	

Valeur de récup.	*																					
des investissements	*																				210	

FLUX NETS DE	*																					
TRESORERIE	*	-4914,	28,2	97,3	1002,3	1810,9	3566,7	3337	3962	3287	3337	2648	3962	2662	3962	3962	3337	3287	3962	3337	3962	4172

TAUX DE RENTABILITE	*																					
INTERNE. 20 ans	*																					

Tableau 2 : Evaluation économique sommaire - Projet BCG MALI (1986)

Les valeurs sont exprimées en milliers de francs CFA.

EVALUATION ECONOMIQUE

Les prix de substitution aux prix économiques des produits agricoles

On considère qu'ils s'appliquent au coton et au maïs et sorgho.

Coton (en FCFA/kg)		
Prix de vente du coton fibre en Europe	350,0	
Commission COPACO	0,987	
Frêt maritime	30,129	
Prix FOB	382,805	
Droits enregistrement, licences	2,460	
Assurances stock Bamako	0,178	
Assurances stock Dakar	0,418	
Assurances transport	0,969	
Heures supplémentaires	0,015	
Main-d'oeuvre diverse	0,003	
Interventions transit	19,243	
Transport routier	23,125	
Transport ferroviaire	5,428	
Voyages commerciaux	0,100	
Frais de direction	0,274	
Frais financiers	0,591	
Equipement export	0,023	
Prix économique coton fibre ex-usine (1)	435,732	
Prix ex-usine de la fibre et de la graine (2)	166,885	6,787
Equivalent coton graine sortie usine	173,672	
Coût de transformation CMDT	30,123	
Prix coton graine livré usine	143,549	
Frais de marché, de collecte, entretien des pistes, protection des cultures, subvention, intrants, assurance coton graine, encadrement, appui technique CFDT, remboursement MS1, taxe municipale	57,338	
Prix producteur coton graine dont subvention intrant 6,068		86,211

(1) Source Banque Mondiale

(2) Source : CMDT avec rendement de 0,383 de coton fibre et 0,617 de graine.

Maïs (ou sorgho)

Prix FOB US \$/tonne (3)	100
Frêt maritime US \$	35
Perte et assurance 5 %	5
Valeur rendu Abidjan US \$	140
Soit en FCFA avec 1 US \$ = 330 FCFA	46,200
Transport Abidjan-Bamako-Zone du projet	50,000
Prix producteur (FCFA/kg)	96,2

CHAPITRE 6

ANALYSE MULTICRITERE

C H A P I T R E 6

SOMMAIRE

	Pages
1 - LE CADRE GENERAL	1
2 - PRINCIPE ET APPLICATION D'UNE ANALYSE MULTICRITERE	3
3 - OUTIL D'ANALYSE MULTICRITERE DEVELOPPE AU BRGM	8
4 - OUTIL D'ANALYSE MULTICRITERE DISPONIBLE AU BRGM	9

ANALYSE MULTICRITERE

1 - LE CADRE GENERAL

Le problème général de la décision est de choisir une ou plusieurs actions (ou variantes ou projets, ...) dans un ensemble d'actions possibles. Appréhender de manière la plus objective possible ce problème, suppose d'explicitier un ou plusieurs critères sur lesquels seront évaluées les actions, ceci pour déboucher sur le choix d'une action à mettre en oeuvre la plus proche possible de l'optimum recherché.

Il est souvent tentant d'utiliser comme unique critère de comparaison un critère économique comme le coût d'investissement ou le taux de rentabilité interne (TRI). Mais dans la réalité un certain nombre d'autres paramètres non économiques et non physiques, donc difficilement appréhendables, rentrent en jeu (importance stratégique, objectifs politiques, socio-politiques, contraintes de financement, impact sur les usagers et l'environnement,).

C'est à ce niveau qu'intervient l'analyse multicritère en tant qu'outil "d'aide à la décision". Elle permet d'utiliser des critères de choix "subjectifs" non quantifiables, en même temps que d'autres critères tout à fait quantifiables (générés par le projet, coût et taux de rentabilité interne de ce projet, etc.). Elle permet donc de prendre en compte les conséquences multiples des décisions envisagées.

Ces méthodes d'aide à la décision reposant sur des techniques de simulation sont donc des supports opérationnels qui permettent aux décideurs de mieux mesurer les conséquences de leur choix. Elles leur permettent, le cas échéant, d'apprécier dans quelle mesure les différents choix possibles s'inscrivent dans le cadre d'une politique générale.

Il convient cependant d'attirer l'attention sur les limites et les risques d'utilisation de telles méthodes, surtout lorsque celles-ci se présentent sur support informatique. D'une part l'outil ne doit pas se substituer au décideur ; il doit rester un outil d'aide, soumis à des analyses critiques et de sensibilité judicieusement choisies par le décideur. D'autre part, l'analyste peut être tenté, consciemment ou non, de s'approprier la décision à l'insu du décideur à qui on fait faire un choix dans un système que maîtrise l'analyste mais qui ne correspond pas forcément à sa propre conception.

Dans le cadre d'une optimisation d'un programme d'aménagements on peut distinguer deux types de démarche :

- le choix d'une variante parmi un ensemble fini de variantes ;
- l'optimisation proprement dite qui consiste à déterminer les caractéristiques optimales d'un ouvrage ou d'une action donnée.

C'est principalement le premier type de démarche qui pose des problèmes de prise de décision et qui donc entre dans le cadre de l'établissement d'un schéma d'aménagement et/ou d'un plan directeur. En pratique, les problèmes d'optimisation et de choix ne sont pas toujours aussi distincts. En effet, certaines variantes peuvent s'avérer inférieures à d'autres avant d'avoir été optimisées et, leur devenir supérieures une fois l'optimisation opérée. Il en résulte qu'avant l'utilisation d'une analyse multicritère il faille optimiser au mieux chacune des variantes afin que les gains supplémentaires qui en découlent soient inférieurs aux écarts entre variantes. Par contre, l'optimisation fine ne doit normalement s'opérer que sur la variante retenue. Elle vient donc après la comparaison et le choix de cette variante ; elle ne rentre donc plus dans l'établissement d'un schéma directeur mais entre dans le cadre de l'étude de l'avant-projet sommaire (APS).

Dans les cas de comparaison de variantes extrêmement simples (pas plus que 3 critères de choix et seulement quelques variantes), on peut penser qu'aucune méthode particulière n'est nécessaire pour guider le choix. En effet, il suffit d'évaluer chaque variante en regard de chaque critère, et l'intuition permet ensuite de faire le meilleur choix, en tenant compte de l'importance respective des critères.

Par contre, l'expérience montre que dès qu'il y a de nombreuses variantes à étudier et/ou un nombre important de critères de choix, il devient pratiquement impossible de trouver de manière exclusivement intuitive, la variante réalisant le meilleur compromis entre les divers facteurs considérés. C'est là que les méthodes d'aide à la décision s'avèrent précieuses. Elles permettent en effet de structurer la comparaison en une suite de démarches logiques compréhensibles et reproductibles à souhait, dans laquelle le jugement humain (souvent propice à la subjectivité) n'intervient que partiellement et que ponctuellement.

De plus, elles permettent d'analyser lorsque le décideur n'est pas unique (cas le plus fréquent) les préférences des différents partenaires de la décision et donc d'élaborer la stratégie la mieux appropriée au processus de décision.

Cependant, sur les points où ces méthodes ne peuvent supprimer toute appréciation qualitative et donc subjective, comme par exemple l'importance relative donnée aux critères de choix, celles-ci permettent de tester par des analyses de sensibilité, les effets de modification des jugements qu'elles intègrent.

Si de telles analyses mettent en évidence que l'un des jugements a des effets majeurs sur le résultat de la comparaison, l'utilisateur ou le décideur pourra chercher à l'approfondir, le préciser, ou, dans le cas où cela est possible, à lui substituer une évaluation objective. Cela est évidemment impossible en ce qui concerne les importances respectives des critères ainsi qu'en ce qui concerne les positions des variantes en regard d'un critère dit subjectif. Dans ce cas il faudra impérativement rechercher au cours d'un processus de concertation le plus large possible, un consensus sur ce jugement.

Devant le nombre important de cas à analyser et de tests de sensibilité à opérer, ces méthodes d'analyse multicritères devront être basées sur des modèles de simulation. L'intérêt de ces modèles est qu'ils permettent de simuler le système étudié et de ce fait d'exploiter à l'avance les conséquences des différentes décisions, sans avoir à intervenir réellement. Les limites d'application tiennent au fait que comme ils ne reproduisent pas exactement le système étudié (des simplifications sont indispensables), leur comportement peut dévier de celui du système réel. D'autre part la précision et la fiabilité des résultats des simulations ne peuvent dépasser celles des données d'entrée. Pour ces diverses raisons lorsqu'un tel modèle est utilisé pour comparer des variantes, il est nécessaire :

- de tester la fiabilité de la solution retenue, c'est-à-dire de voir dans quelle mesure le résultat final dépend des valeurs attribuées à certains coefficients ou paramètres plus ou moins arbitraires (tests de sensibilité) ;
- si deux ou plusieurs variantes apparaissent comme offrant des compromis de valeurs globales voisines, de ne pas faire un choix sans avoir auparavant recommencé la comparaison à l'aide d'un modèle moins simplifié et mieux calé dans lequel seront introduites des données d'entrée soigneusement établies grâce à des études sectorielles approfondies (modélisation évolutive).

2 - PRINCIPE ET APPLICATION D'UNE ANALYSE MULTICRITERE

2.1. PRINCIPE

Les modèles d'analyse multicritère proposés sont le plus souvent fondés sur la méthode récente "de relation de surclassement", méthode basée sur la comparaison, deux à deux, des différentes solutions ou scénarios à classer.

En effet, la simple méthode des sommes pondérées (chacun des scénarios fait l'objet d'une note pour chacun des critères, chacun des critères étant affecté d'un coefficient de pondération) semble le plus souvent inapplicable du fait :

- du caractère multicritère du choix du décideur et sa compétence imparfaite des sujets qu'il doit noter ;
- des incertitudes et imprécisions dont sont entachées les notes affectées aux différentes solutions ou scénarios ;
- de l'hypothèse d'indépendance des contributions de chaque critère, qui est souvent peu conforme à la réalité.

Pour mener à bien une analyse multicritère, il est nécessaire de disposer des données suivantes :

- une liste de solutions (ou scénarios) à comparer entre eux ;
- un tableau d'évaluation (quantitative ou qualitative) de chaque solution selon chaque critère. Cette évaluation peut être une note lorsque l'évaluation est subjective, elle peut être aussi le résultat de données objectives, telles que coût, TRI, population bénéficiaire, ;
- pour chaque critère, un coefficient de pondération (valeur que l'on attribue à chaque critère par rapport aux autres), ainsi que différents seuils permettant de justifier de la représentativité même du critère et/ou des comparaisons entre solutions.

2.2. APPLICATION

Il s'agit donc de présenter les éléments permettant de choisir, parmi l'ensemble des combinaisons possibles d'aménagements et les variantes qui les accompagnent, une seule combinaison de ces aménagements qui sera le support de la planification.

Remarque : l'application qui suit est basée sur l'utilisation du logiciel ELECTRE III de LAMSADE (Laboratoire d'Analyse et de Modélisation de Systèmes d'Aide à la Décision) de l'Université Paris Dauphine, qui utilise la pondération classique des critères les uns par rapport aux autres, mais qui introduit en plus, pour chaque critère, les notions de seuil de préférence et de seuil d'indifférence d'une solution par rapport à une autre.

2.2.1. Définition d'une liste de scénarios

Par "scénario", on entend un ensemble d'aménagements cohérents entre eux qui caractérise, à un horizon donné, une variante de solution avec les possibilités qui en découlent et qui seront appréciées pour chacun des critères définis par ailleurs.

Chaque scénario doit être apprécié en fonction d'objectifs fixés par le décideur.

A titre d'exemple, on peut citer les objectifs suivants :

- recherche d'une exploitation optimale des infrastructures et des équipements existants ;
- satisfaction des besoins et contraintes de qualité de service ;
- maintien et/ou création d'emplois ;
- promotion du potentiel régional (touristique, écologique, économique).

2.2.2. Définition des critères

Les critères doivent permettre de regrouper les points de vue des différents agents concernés. Le plus souvent, il s'agira des agents suivants :

- la collectivité (l'Administration),
- l'exploitant,
- l'usager,
- le financier (bailleurs de fonds).

Il importe d'être attentif à ce que les critères ne soient pas redondants entre eux.

Pour chaque catégorie d'agent, les critères susceptibles d'être retenus pourraient être (liste non exhaustive) :

a) Collectivité

- . Effet structurant et, en particulier, incidence sur l'activité économique actuelle et la création d'emplois directs ou induits.
- . Coût de projet comparé aux avantages.
- . Compatibilité avec d'autres projets.

b) Exploitant

- . Incertitudes sur les possibilités techniques de réalisation.
- . Coût de fonctionnement.
- . Souplesse d'adaptation à l'évolution économique ou géo-politique.
- . Incertitude sur les recettes.

c) Usager

- . Qualité du service rendu.
- . Incidence sur les bénéfices indirects.
- . Compatibilité et complémentarité avec les moyens et les structures existant actuellement.

d) Financier

- . Coût de l'investissement.
- . Possibilité d'échelonnement des gros investissements.
- . Possibilité de prise en charge d'une partie des investissements par d'autres entités que l'Administration.
- . Bénéfice financier.

2.2.3. Pondération des critères

La pondération qui sera faite pour chacun des critères aura une importance décisive sur le classement des "scénarios"; et donc le choix de la solution à retenir.

La pondération devra être faite en étroite collaboration avec le décideur et les autres entités impliquées.

2.2.4. Les seuils d'indifférence et de préférence

Pour tous les critères, on définira un seuil au-delà duquel un critère sera préféré à un autre (seuil de préférence) et un seuil en deça duquel, au contraire, la différence ne sera pas significative et ne permettra pas de comparaison valable (seuil d'indifférence).

Entre ces deux seuils, on considérera qu'il n'y a pas de comparaison possible.

Pour les critères "monétarisés" (coût, bénéfice, ...), ce seuil pourra être soit un pourcentage, soit une valeur fixe.

Par exemple :

- pour les investissements, le seuil d'indifférence pourrait être de 5 % et le seuil de préférence de 10 % ;
- pour l'incidence sur le bénéfice, le seuil d'indifférence pourrait être de 10 % et de préférence de 20 %, etc.

Pour les critères non monétarisés, un classement sera fait suivant une échelle prédéterminée (1 à 10 par exemple, selon la finesse d'appréciation que l'on veut apporter).

Le modèle, pour construire une matrice de surclassement, compare deux à deux les différentes actions à classer. Ainsi, une action A surclasse une action B si l'assertion : "A est au moins aussi bonne que B" est vérifiée. Cette relation est caractérisée par un certain degré de crédibilité qui prend en compte l'imprécision des évaluations représentées par les seuils d'indifférence et de préférence et introduit la notion de veto.

2.2.5. Le seuil de veto

Pour chaque critère, on définit une limite au-dessus de laquelle on refuse toute crédibilité au surclassement d'une solution par rapport à une autre, car la valeur donnée à l'action sur ce critère dépasse les possibilités techniques, économiques ou financières du décideur.

2.2.6. Présentation des résultats

Le résultat final de l'analyse est un ordre partiel, c'est-à-dire un ordre qui tolère la non-comparabilité de certaines actions (par exemple, l'aménagement d'un port de plaisance n'est pas comparable avec l'aménagement d'un port militaire).

Ce résultat se caractérise par un graphe dans lequel apparaissent les différents scénarios répartis en classes d'équivalence, de rang croissant :

<u>Rang 1</u>	<u>Rang 2</u>	<u>Rang 3</u>	<u>Rang 4</u>
3	2-6	4 1	5

Il existe une corrélation entre la précision des résultats et la finesse apportée dans l'appréciation des seuils de préférence et d'indifférence que l'on a fixés. On procède donc généralement par étapes successives (afin de minorer l'importance des études), les premières étapes étant destinées à éliminer les solutions sans intérêt. Les étapes ultérieures, dans lesquelles on sera plus exigeant au niveau de la précision des solutions comparées (seuil d'indifférence et de préférence plus bas), permettront de départager les solutions des premiers rangs.

Ici, l'action 3 est meilleure que toutes les autres actions. La 2 et la 6 sont équivalentes et dominent la 1 et la 4 qui, elles, sont incomparables entre elles. Enfin, l'action 5 est la moins bien classée.

L'utilisation de ce modèle informatique se prête particulièrement bien à l'étude d'un plan directeur local, régional ou national.

Son emploi est prévu pour permettre toute forme de tests de sensibilité sur le tableau des évaluations ou sur les caractéristiques de chaque critère.

Il peut fonctionner sur micro-ordinateur portable, donc est disponible à tout moment pour des tests ou d'autres calculs en bureau ou devant les décideurs.

L'avantage de ce modèle est aussi, et surtout, la possibilité de concertation qu'il offre avec les différentes unités intéressées par le projet, en prenant en compte leur propre perception relative à tout ou partie du projet, et en montrant l'impact sur la décision et le classement final de certaines options qui feraient l'objet de tests de sensibilité.

L'utilisation du modèle informatique à l'avantage, au vu des résultats, de pouvoir "tester" le poids que l'on peut donner aux différents critères et la précision dans l'évaluation des scénarios, soit en modifiant les seuils d'indifférence ou de préférence, soit en donnant un poids différent aux critères. On obtiendra soit un graphe très semblable dans l'hypothèse où cette nouvelle pondération des critères n'a que peu d'influence, soit un graphe différent en ce qui concerne le classement de certains scénarios.

Par une démarche itérative, il sera possible également d'effectuer une première optimisation du scénario le mieux classé en modifiant certains de ses paramètres (calendrier, type de réalisation,).

On trouvera ci-après l'organigramme type d'un modèle d'analyse multicritère.

3 - OUTIL D'ANALYSE MULTICRITERE DEVELOPPE AU BRGM

On dispose au BRGM d'un logiciel SOPHIE (Surclassement Ouvert Pour Homogénéiser et Induire un pré-ordre parmi des Evaluations) qui permet d'établir un classement sur un ensemble fini d'objets (projets, scénarios, candidats,) et ce en tenant compte simultanément de plusieurs points de vue ou critères non aisément réductibles à un seul.

SOPHIE est une méthode d'aide à la décision sans hypothèse préalable et basée sur la notion dite de surclassement, surclassement défini à partir des évaluations faites sur les objets (méthode ELECTRE II de B. ROY).

Si un objet est préféré à un autre objet suivant tous les critères, on peut affirmer que le premier objet surclasse le second.

De façon plus générale, on dit que l'objet A surclasse l'objet B si les deux conditions de concordance et de non-discordance sont réalisées :

- **Condition 1**, dite de concordance, se décompose en fait en deux. Il faut d'une part que la somme des poids des critères selon lesquels A est meilleur que B soit au moins égale à la somme des poids pour lesquels A est moins bon que B. D'autre part, la somme des poids des critères, selon lesquels A est considéré comme au moins aussi bon que B devra être suffisamment élevée (seuil empirique).
- **Condition 2**, dite de non-discordance ; pour tout critère selon lequel A est moins bon que B, la différence des notes (ou des valeurs) n'est pas trop importante (seuil empirique).

Les conditions 1 et 2 étant vérifiées, on parlera soit de surclassement fort soit de surclassement faible suivant les combinaisons de seuils utilisés dans les conditions de concordance et de non-discordance ; le surclassement fort correspond aux conditions largement remplies.

Le programme SOPHIE est actuellement opérationnel sur les ordinateurs VAX du BRGM (disponible depuis peu au département 3E).

Les données du programme SOPHIE se présentent sous la forme d'un tableau de notes (valeurs entières allant de 0 à 9), comportant autant de lignes que d'objets à classer (50 objets au maximum) et autant de colonnes que de critères d'évaluation (90 critères au maximum). Le tableau contient également des poids (valeurs entières allant de 0 à 9) attribués à chaque critère ; L'utilisateur pouvant d'ailleurs modifier à souhait les notes données à chacun des objets, les critères de choix, les poids donnés à chacun des critères, etc.

Une présentation complète de la méthode d'analyse et du logiciel SOPHIE existe dans le rapport BRGM 88 DT 031 ISA, rédigé par P.ROLET. Une notice d'utilisation de ce même logiciel est en cours d'établissement par J.BOBILLIER.

Si l'on compare le logiciel SOPHIE à d'autres modèles d'analyse multicritère existants sur le marché, on constate que sur le plan théorique SOPHIE utilise comme d'autres la méthode récente de "relation de surclassement". Par contre, du point de vue pratique SOPHIE pourrait et devrait être grandement amélioré. En effet, on ne peut concevoir d'outil d'aide à la décision que sur micro-ordinateur portable afin de faire participer concrètement (dans le cadre de réunions de travail) les décideurs au choix final. Il semble donc intéressant et nécessaire d'adapter le programme SOPHIE sur micro-ordinateur.

D'autre part SOPHIE mériterait d'être amélioré afin de pouvoir intégrer, à la place de notes de 0 à 9, des données réelles tel que le coût, le TRI, etc. Actuellement les données "monétarisées" ne peuvent être entrées qu'en leur affectant une note relative (d'un objet par rapport à un autre) comprise entre 0 et 9.

Enfin, l'interface logiciel - utilisateur mériterait sûrement d'être plus conversationnel et convivial dans la mesure où, à terme, ce type d'outil s'adressera autant à un décideur qu'à un technicien.

4 - OUTIL D'ANALYSE MULTICRITERE DISPONIBLE AU BRGM

Le Département Eau dispose depuis Juin 1969 du logiciel Electre III.IV élaboré par B. ROY de l'Université Paris-Dauphine. Electre III, décrit précédemment, permet en partant d'un ensemble fini d'actions évaluées sur une famille cohérente de critères d'agrèger ces préférences partielles en une relation de surclassement floue.

Electre IV autorise la construction d'une ou plusieurs relations de surclassement triviales lorsqu'il n'est pas possible d'affecter un poids à chaque critère. Ce logiciel est utilisable sur micro-ordinateur compatible IBM-PC.

CHAPITRE 7

PROGRAMMATION LINEAIRE

C H A P I T R E 7

SOMMAIRE

	Pages
1 - LE CADRE GENERAL	1
2 - LA PROGRAMMATION LINEAIRE - DEFINITION	1
3 - LES FONDEMENTS DE LA METHODE DU SIMPLEXE	2
4 - LES FONDEMENTS DE LA METHODE DU GRADIENT PROJETE	6
5 - LA PROGRAMMATION LINEAIRE DANS LE DOMAINE DE L'EAU	6
6 - CONCLUSION	10
EXEMPLE D'APPLICATION	

PROGRAMMATION LINEAIRE

1 - LE CADRE GENERAL

L'élaboration de schémas rationnels d'aménagement de ressources en eau requiert la prise en compte de données physiques et économiques imposées par les projets de mise en exploitation. La détermination de ces schémas peut en théorie être réalisée en résolvant un ensemble de relations représentant les diverses liaisons, contraintes et interférences entre les facteurs hydrauliques, hydrogéologiques et économiques définissant le système de ressources en eau.

La programmation linéaire, une des branches de la recherche opérationnelle, permet d'améliorer et d'optimiser la "marche" de tels systèmes complexes. La programmation linéaire permet en effet de répartir de manière optimale des ressources limitées entre plusieurs produits finis ou plusieurs activités.

La répartition optimale peut être celle qui optimise un avantage ou une utilité, par exemple le profit ou celle qui minimise le coût.

A une époque où la productivité décline et où les matières premières se font rares, il peut être très utile lors de l'étude d'un schéma d'aménagement de mieux répartir les ressources disponibles.

2 - LA PROGRAMMATION LINEAIRE-DEFINITION

Bien que l'ordinateur soit un outil essentiel pour résoudre les problèmes qui se posent en programmation linéaire, il ne faut pas dans cette expression prendre le mot programme dans son acception de programme informatique, mais dans le sens d'organisation et de planning.

L'adjectif linéaire se rapporte à certaines caractéristiques mathématiques des problèmes à traiter. On introduit en effet des contraintes linéaires (équations linéaires) de 3 types : minimum à respecter, maximum à respecter ou égalité imposée. Par ailleurs la recherche d'un objectif est représentée par une fonction linéaire à maximiser ou à minimiser.

Faisant appel à une formulation mathématique sous forme d'équations et d'inéquations, la programmation linéaire peut s'exécuter manuellement pour des problèmes assez courts. Au-delà, les temps de calculs sont très longs, si bien que la majorité des problèmes sont résolus par informatique.

Les applications possibles avec la programmation linéaire sont multiples, notamment dans le domaine de la distribution et des transports : la programmation linéaire permet de répartir la production entre divers dépôts afin de minimiser le coût total de distribution. Les problèmes de découpe de tissus, bois ou autres matériaux sont couramment résolus par les logiciels de programmation linéaire : l'objectif étant d'obtenir le moins possible de chutes ou de déchets.

Il est un secteur d'activité où ces outils sont bien implantés : le domaine agricole. En fonction de nombreux paramètres liés à la qualité des sols, l'ensoleillement... etc..., les techniciens obtiennent un dosage optimal pour la préparation et le traitement des sols.

La société EXXON applique couramment ces techniques de programmation linéaire pour établir les plans d'exécution de forages et répartir le pétrole brut entre les diverses raffineries.

La programmation linéaire peut trouver de nombreuses applications dans le domaine de l'eau.

C'est parce qu'il existe des algorithmes (méthodes qui procèdent pas à pas) efficaces et adaptables à de nombreuses situations, que la programmation linéaire a une grande importance économique : le premier algorithme à être utilisé dès 1947 a été la méthode du simplexe.

Nous allons présenter les fondements de cette méthode ainsi que celle du gradient LP beaucoup plus rapide que la précédente et qui a supplanté ces dernières années la méthode du simplexe.

3 - LES FONDEMENTS DE LA METHODE DU SIMPLEXE

3.1. REPRESENTATION D'UN CAS GENERAL PAR CONSTRUCTION GEOMETRIQUE

Considérons le cas suivant : il faut maximiser la fonction objectif $e_1A + e_2B$ sachant qu'il existe 3 constantes à respecter.

$$A + B < C \text{ (inéquation 1)}$$

$$a_1 A + a_2 B < D \text{ (inéquation 2)}$$

$$b_1 A + b_2 B < D \text{ (inéquation 3)}$$

A et B sont les 2 variables.

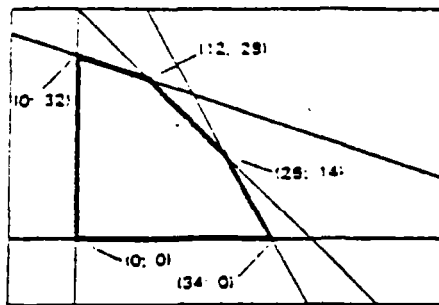


Fig. 1
Représentation graphique de la région admissible
(dans le domaine des solutions positives - quadrant NE - on est limité par 3 contraintes-inéquations 1, 2 et 3)

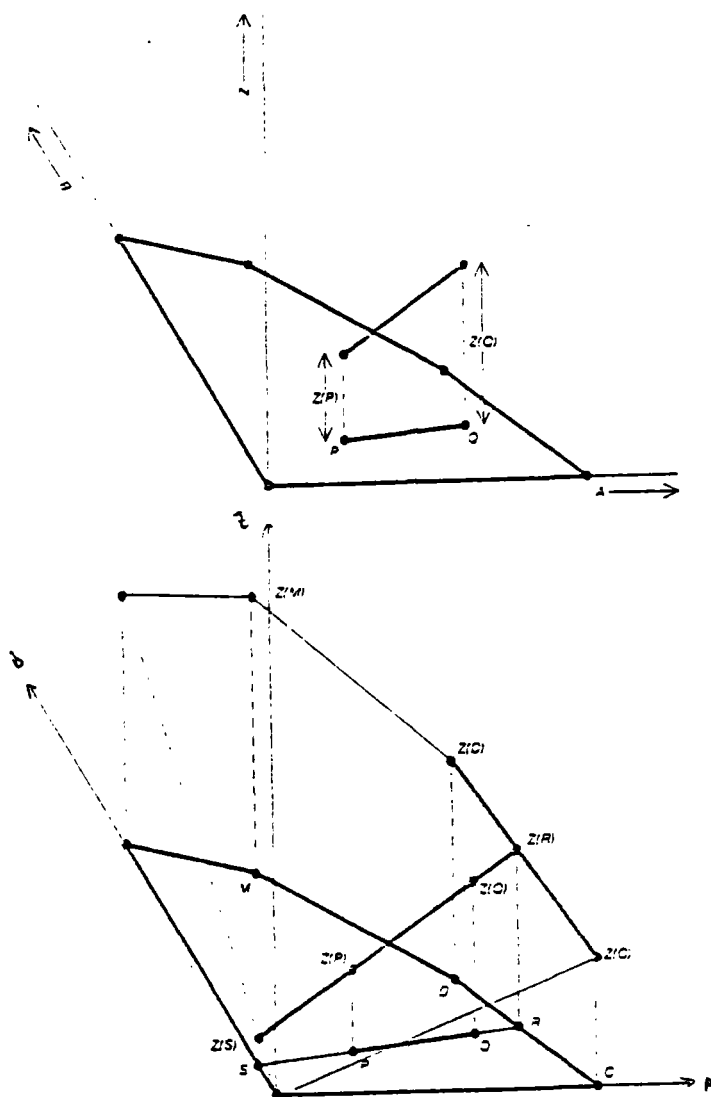


Fig. 2
Représentation graphique de la fonction objectif
au-dessous de la région admissible

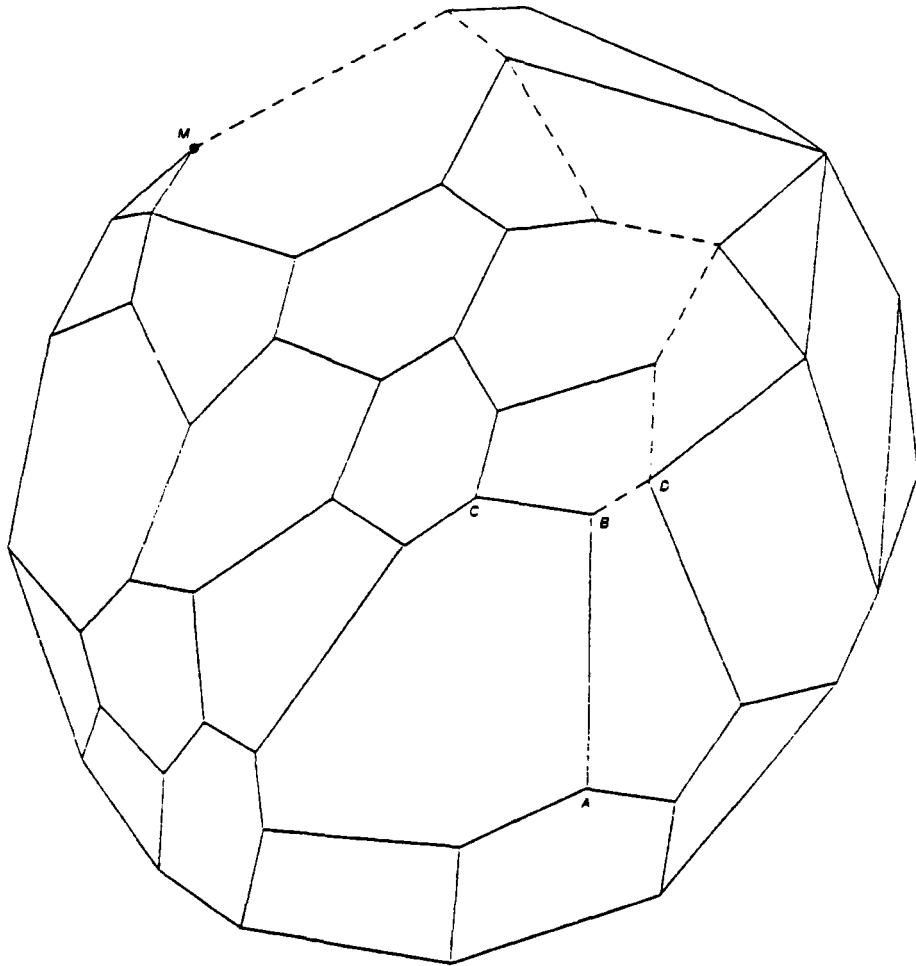


Fig. 3

Polyèdre à 3 dimensions représentant la région admissible d'un problème linéaire comprenant 3 variables (on se déplace de sommet en sommet le long des arêtes du polyèdre. Chaque point du polyèdre correspond à une gestion du travail, du capital ou d'autres types de ressources).

Si notre système d'équation linéaire définit un plan de production particulier, par exemple celle d'une brasserie, chacune des 3 contraintes représente la disponibilité des 3 ingrédients nécessaires à la fabrication de la bière : maïs, houblon.

On voit sur la figure qu'une augmentation de la valeur du second membre d'une des équations (augmentation de la disponibilité du produit) provoque un déplacement du sommet maximum de la région admissible.

On exerce ainsi une pression sur cette contrainte qui nous indique de combien on peut augmenter le profit si l'on suppose que l'on dispose d'une unité de "ressource" supplémentaire. A chaque itération et après pression sur chacune des contraintes. Ce sont ces prix marginaux qui guident l'algorithme de sommet en sommet.

4 - LES FONDEMENTS DE LA METHODE DU GRADIENT PROJETE (LES AMELIORATIONS APORTEES PAR RAPPORT A LA METHODE DU SIMPLEXE)

La méthode du gradient projeté est plus intuitive que la méthode du simplexe, dans la mesure où elle n'impose pas de se déplacer de sommet en sommet dans le polyèdre. Partant de l'origine, on prend la direction donnée par les coefficients de la fonction économique (direction que l'on appelle les gradients). Pour des problèmes simples, on retrouve dès la deuxième itération le même chemin que le simplexe mais pour les problèmes comprenant plusieurs centaines d'itérations, seules les dernières sont semblables. La méthode est donc moins contraignante que celle issue du simplexe et les calculs sont plus rapides, surtout au début.

5 - LA PROGRAMMATION LINEAIRE DANS LE DOMAINE DE L'EAU

5.1. OUTILS DEVELOPPES AU BRGM

Le logiciel PROLI conçu pour maximiser ou minimiser une fonction objectif est bâti suivant la méthode du simplexe.

Il autorise l'introduction de contraintes linéaires de 3 types : minimum à respecter, maximum à respecter ou égalité imposée.

La version standard permet la prise en compte de 50 variables et de 50 contraintes (langage FORTRAN).

En ce qui concerne la gestion des eaux souterraines, ce programme n'est exploitable que lorsque les contraintes hydrogéologiques interviennent seules dans la définition d'un projet. Le principe de superposition est considéré comme représentant la réalité (aquifères captifs restant en charge, et aquifères libres avec variations du niveau piézométrique faibles par rapport à l'épaisseur mouillée de l'aquifère). A noter que ce programme vient en remplacement du OPPER qui ne permettrait que de minimiser un objectif.

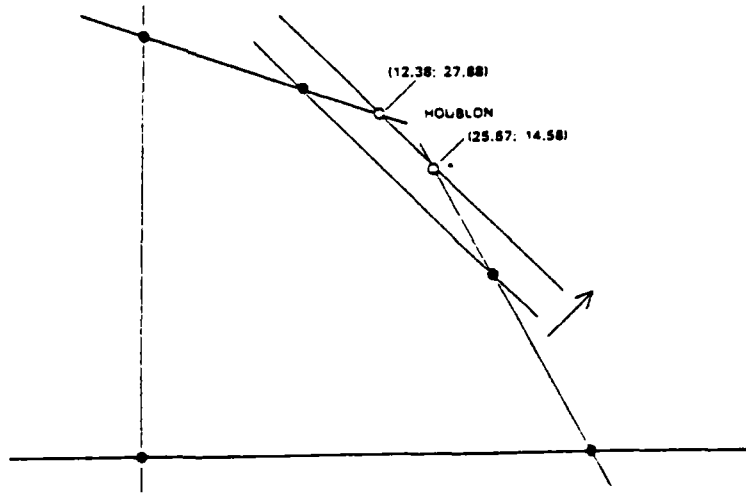


Fig. 4

Exemple d'une brasserie. Un accroissement de la disponibilité d'un produit rare augmente le bénéfice potentiel de l'exploitant de façon prévisible. Si l'on peut disposer de x grammes de houblon supplémentaire, le profit maximum est accru de n francs, variation de la fonction objectif qui se traduit par un déplacement du sommet maximum de la région admissible du point noir au cercle blanc.

Les exemples d'utilisation sont les suivants :

- . exploitation d'un champ de captage : maximiser un débit global préalable sur n ouvrages en limitant les rabattements provoqués en n points de surveillance ;
- . dénoyage d'une excavation de génie civil : minimiser le débit pompé sur n ouvrages disposés autour d'une excavation à réaliser.

- Logiciel PLIBI (rapport BRGM 76 SGN 528 AME)

Même domaine d'intervention que le logiciel PROLI. L'algorithme de programmation linéaire permet ici la prise en compte simultanée de variables réelles et binaires dans l'expression de la fonction objectif. La version standard permet la résolution d'un problème comprenant un maximum de 20 variables binaires, 20 contraintes et une arborescence comportant 100 solutions.

Ce programme (langage FORTRAN) est bien adapté pour minimiser l'investissement total dans un problème d'aménagement de ressources en eau, l'introduction de variables binaires liées aux variables continues (les débits) permettant de formuler une loi investissement-débit. Grâce à l'introduction de variables binaires il y a possibilité d'éliminer ou de prendre en compte les termes qui varient par paliers).

- Logiciel MAPPLI (Rapport BRGM 76 SGN 528 AME)

Même domaine d'intervention que le logiciel PROLI. L'algorithme de résolution permet également de traiter des problèmes exprimés sous une forme non linéaire. Les objectifs peuvent être exprimés avec des termes linéaires, quadratiques et cubiques. Les contraintes peuvent contenir des termes linéaires et quadratiques.

La technique de résolution utilise une méthode d'approximations linéaires successives, résolues chacune par un algorithme de programmation linéaire.

Ce programme a une grande utilité dans le cas où le prix de revient de l'eau est un critère important de décision. En effet, il permet de prendre en compte, de manière physique les réactions de l'aquifère autour des ouvrages et les réactions des ouvrages eux-mêmes à une exploitation donnée. (Les termes quadratiques permettent de "modéliser" par exemple une réduction de hauteur mouillée, le caractère tridimensionnel des écoulements ou les pertes de charge en régime turbulent dans les ouvrages de captage). Ce programme est écrit en langage FORTRAN. L'inconvénient de ces 3 logiciels est qu'ils ne sont utilisables au BRGM que sur le VAX.

5.2. OUTIL DISPONIBLE AU BRGM

- Logiciel intégré gradient LP

Le département EAU dispose depuis juin 1989 d'un logiciel intégré bâti selon la méthode du gradient projeté - Logiciel Gradient LP de la société Eurodécision. La version standard permet la prise en compte de 1000 variables et de 2000 contraintes (langage PASCAL) et est utilisable sur micro-ordinateur compatible IBM-PC, d'où sa grande facilité d'emploi. Sur ce plan, la version interactive est dotée de puissantes fonctions d'édition qui permettent de construire rapidement un modèle de grande taille. Comme avec un tableur, on se déplace sur les lignes et les colonnes de la matrice à construire.

Un menu principal permet de choisir les options désirées. L'option "optimise" exécute le calcul de la fonction objectif à maximiser ou à minimiser. Le programme se déroule en affichant les itérations et en donnant certains renseignements quant à la mémoire utilisée, ainsi que les valeurs prises par la fonction économique et la variable artificielle toutes les 10 itérations. La valeur de la fonction objectif est calculée de 2 façons différentes (solution primale, solution duale) ce qui permet pour des problèmes de grande taille d'avoir une indication sur la précision des résultats obtenus.

Ce logiciel a en outre l'avantage d'effectuer automatiquement une analyse de sensibilité sur les coûts unitaires.

Pour décrire de manière pratique le logiciel gradient LP, un exemple d'application est proposé ci-après. Cet exemple est issu du rapport BRGM 73 SGN 433 AME et résolu préalablement avec le logiciel PROBLI.

5.3. DES OUTILS D'AVENIR UTILISES POUR LA PLANIFICATION

Les outils de programmation linéaire tels qu'ils ont été décrits plus haut, deviennent d'utilisation délicate, voire inopératoires quand il s'agit de maximiser ou de minimiser une fonction objectif relevant de phénomènes ou de critères parfois conflictuels. Le problème devient encore plus délicat à traiter dans la situation où un processus de décision nécessite une approche multi-objectif comme c'est souvent le cas en matière de planification.

Dans le domaine de la gestion et de la planification de ressources en eau, une difficulté supplémentaire apparaît quand doivent être pris en compte des phénomènes stochastiques comme par exemple la pluviométrie ou le débit d'un cours d'eau.

Au total, on assiste depuis plusieurs années au développement d'outils assez complexes capables de résoudre et de gérer des problèmes mettant en jeu de nombreux critères avec parfois prise en compte du facteur incertitude.

Cette voie de travail et de recherche de "programmation linéaire multicritère" a été suivie par de nombreux laboratoires de recherche, notamment aux Etats-Unis depuis une quinzaine d'années. Ces outils sont maintenant utilisés par un certain nombre d'agences locales et fédérales ayant en charge des responsabilités de programmation et de planification, surtout dans le domaine de l'eau : Geological Survey Bureau of Reclamation, Council on Environmental Quality, Environmental Protection Agency.

Un autre exemple connu à l'étranger est celui du Rio Colorado en Argentine où une étude multi-objectif du bassin a été conduite par le Massachusetts Institute of Technology (MIT) en 1973. Le but principal de l'étude était de mettre en place une méthodologie moderne de planification de la ressource en eau à l'échelle du bassin qui s'étend sur 900 km depuis les Andes jusqu'à l'Atlantique en passant par les régions arides du Centre du pays.

L'équipe du MIT avait notamment pour mission de spécifier le nombre et la capacité de barrages, d'usines électriques, et d'aires d'irrigation ainsi que l'occurrence de transferts interbassins.

En aval des modèles mathématiques ayant permis de simuler de nombreux schémas d'aménagement (approche déterministe et approche stochastique) a été développé un modèle de programmation linéaire multicritère pour maximiser dans le même temps les bénéfices attendus de chacun des aménagements.

6 - CONCLUSION

Loin de vouloir donner à des logiciels plus ou moins performants tout le pouvoir de la décision, la programmation linéaire doit être considérée comme un outil "d'aide à la décision" où le gestionnaire et le planificateur doivent garder le contrôle de tout ce qui est jugement, interprétation des résultats, conduite de processus. Dans cette optique l'utilisateur pilote le système et renvoie à la "machine" les calculs et les problèmes combinatoires, souvent trop complexes pour lui.

D'un point de vue utilisation et pour résoudre des problèmes de faible taille, les logiciels disponibles sur micro-ordinateur sont les mieux adaptés car conviviaux. Au-delà et pour des problèmes plus complexes (nombre de variables élevés, objectifs multiples), il paraît opportun de s'adresser à des sociétés de services spécialisés qui conçoivent des maquettes (logiciels adaptés aux besoins des clients, des modules spécifiques permettant ensuite de peaufiner l'outil en fonction des nécessités temporelles).

Dans le domaine de l'optimisation, la programmation linéaire n'est pas la seule voie de travail suivie : il faut citer à ce sujet la méthode de Rosenbrack (non linéaire). Un programme d'optimisation basé sur cette méthode est d'ailleurs disponible au BRGM (sous programme d'optimisation automatique ROSEMB. Note technique n° 79.3 D. Thiery).

METHODE DU GRADIENT LP

Exemple d'application

1 - DEFINITION DU PROBLEME

On désire irriguer la totalité d'une zone agricole en captant un aquifère de grande épaisseur à partir de deux ouvrages déjà implantés. On admet que lors des exploitations de l'aquifère le principe de superposition peut être appliqué.

Lors des pompages, on souhaite que les rabattements au niveau des captages n'excèdent pas une valeur limite et qu'une zone marécageuse soit simultanément asséchée par un abaissement minimum du niveau de la nappe actuellement affleurante.

Deux types de cultures peuvent être pratiquées. Chaque culture produit un bénéfice proportionnel au volume d'eau d'irrigation. On désire maximiser les bénéfices réalisés.

2 - DETERMINATION DES VARIABLES ET DES PARAMETRES

2.1. DONNEES INITIALES

S	Superficie agricole totale
S_1, S_2	rabattements maximums admis sur les ouvrages de captage
S_3	rabattement minimum du niveau de la nappe en zone marécageuse
e_1, e_2	superficie de culture 1 ou 2 irriguée avec un débit unitaire
C_1, C_2	bénéfice réalisé par un débit d'irrigation unitaire pour les cultures 1 ou 2.

2.2. VARIABLES UTILISEES

$v_1 + v_2$	Débit total d'irrigation pour les cultures de types 1 et 2
$Q_1 + Q_2$	Débit total prélevé sur les deux ouvrages de captages

2.3. TERMES INTERMEDIAIRES

On admet que le principe de superposition peut être appliqué, les rabattements limites étant faibles vis-à-vis de l'épaisseur de l'aquifère.

a_{ij} : rabattement créé à l'emplacement j par un pompage à débit unitaire sur l'ouvrage i.
i prend les valeurs 1 et 2, j les valeurs 1, 2 et 3. Les 6 termes a_{ij} peuvent être obtenus :

- . par pompage d'essai ou
- . par l'emploi de formules analytiques (ex. THEIS...) ou
- . à l'aide d'un modèle de simulation.

3 - ECRITURE MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME

L'objectif à satisfaire est :

$$\text{Max } \sum_1 c_1 v_1 = \text{Max } (c_1 v_1 + c_2 v_2)$$

et les contraintes à satisfaire sont les suivantes :

3.1. MISE EN VALEUR DE LA TOTALITÉ DE LA SURFACE AGRAIRE

$$e_1 v_1 + e_2 v_2 = S$$

3.2. ÉGALITÉ DES DÉBITS POMPES ET D'IRRIGATION

$$v_1 + v_2 - Q_1 - Q_2 = 0$$

3.3. RABATTEMENTS LIMITÉS SUR LES OUVRAGES DE CAPTAGE

$$a_{11} Q_1 + a_{21} Q_2 \leq s_1$$

$$a_{12} Q_1 + a_{22} Q_2 \leq s_2$$

3.4. SUPPRESSION DE LA ZONE MARECAGEUSE

$$a_{13} Q_1 + a_{23} Q_2 \geq s_3$$

De plus, toutes les variables doivent être positives ou nulles.

L'écriture du problème en termes mathématiques conduit donc à maximiser un objectif économique en respectant des contraintes à caractère hydraulique et économique.

En posant :

$$x_1 = v_1$$

$$x_2 = v_2$$

$$x_3 = Q_1$$

$$x_4 = Q_2$$

Le problème doit répondre aux conditions suivantes :

$$\text{MAX } \sum_1 c_i x_i$$

avec

$$e_1 x_1 + e_2 x_2 = S$$

$$x_1 + x_2 - x_3 - x_4 = 0$$

$$a_{11} x_3 + a_{21} x_4 < s_1$$

$$a_{12} x_3 + a_{22} x_4 < 2$$

$$a_{13} x_3 + a_{23} x_4 > s_3$$

et $x_i > 0 \quad i = 1, \dots, 4$

4 - APPLICATION NUMERIQUE

Les débits sont exprimés en m^3 par minute. Les diverses valeurs des coefficients constants sont :

$$c_1 = 20 \cdot 10^3 \text{ F/m}^3$$

$$c_2 = 30 \cdot 10^3 \text{ F/m}^3$$

$$S = 10 \text{ hectares}$$

$$e_1 = 8 \text{ hectares par } m^3 \text{ par minute}$$

$$e_2 = 2 \text{ hectares par } m^3 \text{ par minute}$$

$$a_{11} = 3 \text{ m/m}^3/\text{mn} \qquad a_{21} = 1 \text{ m/m}^3/\text{mn}$$

$$a_{12} = 1.5 \text{ m/m}^3/\text{mn} \qquad a_{22} = 2 \text{ m/m}^3/\text{mn}$$

$$a_{13} = 1 \text{ m/m}^3/\text{mn} \qquad a_{23} = 1 \text{ m/m}^3/\text{mn}$$

Le problème est alors traduit par le système linéaire suivant :

Maximiser $(20 x_1 + 30 x_2)$ en respectant les contraintes :

$$8 x_1 + 2 x_2 = 10$$

$$x_1 + x_2 - x_3 - x_4 = 0$$

$$3 x_3 + x_4 < 6$$

$$1.5 x_3 + 2 x_4 < 6$$

$$x_3 + x_4 > 3$$

$$\text{et } x_i > 0 \quad i = 1, \dots, 4$$

5 - SOLUTION

Avec 6 itérations, la solution est la suivante :

$$G_{\text{primal}} = 94,44 \text{ F/m}^3$$

$$G_{\text{dual}} = 94,44 \text{ F/m}^3$$

Les valeurs des variables x_1, x_3, x_4 sont respectivement égales à 0,56, 2,78, 1,33 et 2 m^3/mn

En sortie, les 2 tableaux suivants apparaissent à l'écran :

Libellés	Mini	Valeur	Maxi	Coût min.	Coût	Coût max.	Coût F
x ₁	0,00	0,56	100 000,00	- 99 999,00	20,00	30,00	0,00
x ₂	0,00	2,78	100 000,00	20,00	30,00	99 999,00	0,00
x ₃	0,00	1,33	100 000,00	- 8,33	0,00	66,67	0,00
x ₄	0,00	2,00	100 000,00	- 22,22	0,00	11,11	0,00

Libellés	1° membre	2° membre	Surplus	Valeur duale
Cont. surface	10,00	10,00	0,000	- 1,667
Cont. débit	0,00	0,00	0,000	33,333
Rabattement 1	6,00	6,00	0,000	3,704
Rabattement 2	6,00	6,00	0,000	14 815
Rabattement 3	3,33	3,00	0,333	0,000

6 - EXPLICATION DES DONNEES FOURNIES

a) Fenêtre variable :

En plus de la valeur de chacune des variables, l'analyse de sensibilité donne la plage de variation de chaque coût unitaire (colonnes "coût min." et "coût max."). Ainsi, tant que le coût unitaire (bénéfice réalisé pour un débit d'irrigation unitaire) reste compris entre 0 et 30, la solution optimale pour la variable x, restera la même. Le bénéfice global sera naturellement modifié puisqu'on change un bénéfice unitaire, mais pas la solution.

b) Fenêtre contrainte :

Dans cette fenêtre, la colonne surplus donne la différence entre le 2° membre (données d'entrée) et le 1° membre (données calculées avec optimisation).

Le logiciel gradient LP est doté d'une option particulière (valeur duale) qui permet de connaître l'impact d'une modification marginale de la valeur du second membre. Ainsi, lorsque le surplus est différent de 0, une modification locale de la valeur du second membre est sans effet sur l'optimum. La valeur duale associée à cette contrainte est dans ce cas nécessairement nulle. C'est une situation où la contrainte ne joue pas (n'est pas active) et la "pression" sur cette dernière est nulle.

En valeur, si la valeur duale est différente de 0, la variable d'écart (surplus) est nécessairement nulle. La contrainte correspondante est activée et une "pression" s'exerce sur elle. La valeur de la variable duale nous indique de combien on peut augmenter le bénéfice si l'on suppose que l'on dispose d'une unité de ressource supplémentaire. La solution optimale sera dans ce cas modifiée.

Par exemple, examinons le cas du rabattement admis limité à 6 m au niveau des ouvrages de captage. Avec une unité de ressource supplémentaire (7 m), le bénéfice unitaire global passera de 94,444 à 98,148 F/m³.

On voit ainsi que les valeurs duales permettent de guider le choix d'hypothèses. C'est grâce à l'interprétation économique des valeurs duales et de cette possibilité d'analyse post optimale que la programmation linéaire constitue un puissant outil de planification stratégique.

CHAPITRE 8

AMENAGEMENT DES EAUX

C H A P I T R E 8

SOMMAIRE

	Pages
1 - LES MOYENS DE RENFORCEMENT DE LA RESSOURCE NATURELLE	2
2 - LES ACTIONS SUR LA DEMANDE	4
3 - LA REUTILISATION DES EAUX USEES	7
4 - L'AJUSTEMENT ET LE MAINTIEN DE LA QUALITE	8

AMENAGEMENTS DES EAUX

La ressource en eau R varie dans l'année en fonction de sa nature, du climat et des calamités naturelles, sécheresses ou inondations. Comme exposé dans des annexes précédentes, les variations de cette ressource, qui peuvent être appréhendées par des valeurs moyennes mensuelles ou par des valeurs ayant une fréquence de retour définie seront confrontées aux variations de la demande D.

Il y aura pénurie de la ressource si pendant un certain temps la demande D est telle que :

$$R - D < Q$$

Q étant une quantité d'eau représentant les besoins écologiques (par exemple le débit réservé d'une rivière).

La pénurie peut être momentanée, saisonnière ou même généralisée ; il y a donc mauvaise adéquation entre l'offre et la demande d'où la nécessité d'aménager le système afin de mieux faire coïncider (en qualité, en quantité et dans le temps) les deux composantes du bilan.

Quatre solutions sont possibles pour rétablir l'équilibre :

- **Solution 1** : accroître les ressources par une mobilisation accrue de celles-ci :

- . A qualité constante, les solutions sont la construction de barrages-réservoirs (étiages et crues), la suralimentation et la surexploitation des nappes, le transfert d'eau à partir d'une UTGE où il n'y a pas de pénurie, le dessalement d'eau de mer.

- Solution 2 : agir sur les demandes afin de les réduire. Les solutions sont la lutte contre les fuites et contre le gaspillage (en quantité et en qualité).
- Solution 3 : agir sur les ressources afin de les affecter à plusieurs types de demandes. Les solutions sont la réutilisation des rejets et des eaux usées.
- Solution 4 : améliorer et/ou maintenir la qualité de la ressource. Les solutions sont le traitement des eaux brutes (avant usage) et des rejets (maintien d'un objectif de qualité aval), ainsi que la protection des nappes.

Dans cette annexe, les divers moyens techniques possibles (afin de rétablir l'équilibre du BRB et correspondant à ces 3 alternatives) seront étudiés sommairement. Le choix des solutions les meilleures n'est pas abordé ici, dans la mesure où ce problème a été traité dans le cadre de l'annexe sur l'analyse multicritère.

1 - LES MOYENS DE RENFORCEMENT DE LA RESSOURCE NATURELLE

1.1. LA REALISATION DES BARRAGES

Au cas où un déséquilibre fondamental apparaît pour couvrir la pointe d'été (due aux concentrations estivales et à l'irrigation), et satisfaire les besoins usuels, l'aménagement des rivières par des ouvrages de stockage permet d'augmenter le débit d'étiage des rivières en période sèche. Le stock d'eau pouvant être prélevé lors des crues exceptionnelles, ces ouvrages permettent donc aussi de lutter contre les inondations. Mais ces deux usages (déjà peu compatibles entre eux notamment aux périodes de soudure, comme pour les crues de printemps) sont souvent contradictoires avec d'autres utilisations des barrages. Une approche globale est donc nécessaire.

Les barrages peuvent en effet avoir de nombreuses fonctions qui peuvent être classées suivant les besoins des différents usages : population, agriculture, industrie ou navigation.

Pour certains de ces usages, les conditions de fonctionnement optimum nécessitent d'une part soit un plan d'eau fixe, soit au contraire un plan d'eau variable comme pour la régularisation. Elles nécessitent d'autre part soit une utilisation de l'eau à l'aval dans la rivière, soit à partir d'une conduite prélevant l'eau dans la retenue.

Ces conditions sont souvent incompatibles surtout quand, dans un même bassin ou sur un même cours d'eau, les besoins à satisfaire sont multiples. Pour les satisfaire, il est souvent nécessaire de procéder à la fois à l'écrêtement des crues, au soutien des étiages, à la création de plans d'eau et à l'utilisation énergétique des chutes.

Il apparaît donc nécessaire de rechercher les meilleures conditions techniques, économiques et écologiques pour assurer l'ensemble de ces fonctions, ce qui conduit naturellement à tenter de les associer dans un même ouvrage ou dans un aménagement comprenant un groupe d'ouvrages complémentaires. Il s'agit donc de hiérarchiser ces

fonctions en donnant des priorités de gestion. On aboutit à un ouvrage (ou un aménagement) à buts multiples dont la ou les fonctions, c'est-à-dire les effets sur les caractéristiques de la ressource naturelle, sont déterminées par les objectifs souhaitables et souhaités pour améliorer la satisfaction des besoins.

1.2. LA SURALIMENTATION ET LA SUREXPLOITATION DES NAPPES

Les nappes constituent un tampon vis à vis des fluctuations climatiques car elles présentent une certaine inertie aux variations de capacité (stockage - déstockage, alimentation - exploitation). De plus le moment où leur capacité est maximum est décalé par rapport à celle des rivières. Aussi, on peut accroître le rôle de réservoir de la nappe en y accumulant de l'eau de rivière pendant les périodes de forte hydraulicité et en la restituant à la rivière en périodes d'étiages ; ceci implique cependant des conditions particulières de relation nappe-rivière (indépendance, réaction différée dans le temps, ...).

La suralimentation des nappes peut être un moyen d'accroître la productivité des forages ; en effet, l'alimentation par le sol améliore la qualité et accroît la quantité de la ressource souterraine. On peut même envisager réinjecter des eaux usées ayant subi une épuration préalable suivie d'un traitement tertiaire.

Cette alimentation forcée peut se faire soit par infiltration dans des bassins, soit par injection à partir de puits ou de forages.

Dans le cas de la technique des bassins, on réalise un traitement systématique de l'eau (afin de la rendre limpide, mais non stérile), que l'on envoie dans des sablières qui jouent le rôle de filtre. Il se constitue alors à la surface du sable une membrane biologique qui rend l'eau stérile. Cette membrane peut après un certain temps devenir quasiment étanche et on estime qu'il faut environ une fois par an refaire les fonds des sablières. Aussi plusieurs bassins sont nécessaires pour permettre et assurer un fonctionnement en continu.

En ce qui concerne la qualité, deux paramètres sont à prendre en compte : la qualité de l'eau de surface qu'on veut injecter et l'objectif de qualité de l'eau de nappe qu'on vise en fonction de l'usage qu'on veut en faire. La nécessité d'un traitement et la nature de celui-ci dépendront de ces deux paramètres et du pouvoir épurateur de l'infiltration.

La technique de suralimentation par puits ou forages concerne, elle plutôt, les nappes profondes. Ce procédé consiste simplement à utiliser des forages qui pendant la majorité de l'année servent à exploiter la nappe, en tant que points d'injection d'eau de réalimentation. Ce système a toutefois un inconvénient, c'est que les ouvrages utilisés pour l'injection ont tendance à s'obstruer peu à peu et nécessitent donc des nettoyages assez fréquents.

Enfin, la surexploitation des nappes est une technique de régularisation saisonnière des cours d'eau, permettant en période d'étiage des rivières, de prélever par forages des débits importants dans les nappes et de les restituer aux cours d'eau.

1.3. LES GRANDS TRANSFERTS D'EAU

Lorsque le captage à proximité de l'utilisation est difficile ou impossible, on va chercher l'eau plus loin et on la transporte par conduite ou canal sur de grandes distances. C'est ce qui se passe pour de nombreuses agglomérations avec des transports sur des dizaines ou des centaines de kilomètres (100 à 120 km à Paris, beaucoup plus à New-York ou Mexico). Alors qu'avant 1900, ces ouvrages étaient des ouvrages gravitaires (cas des aqueducs à l'air libre des ouvrages antiques), actuellement les moyens de pompage facilitent le travail du projeteur.

Il est également possible pour des transferts importants de bassin à bassin d'utiliser comme vecteur le système de canaux de navigation ou les rivières elles-mêmes. On pompe dans un site d'un bassin où des ressources sont disponibles et on transfère par conduite jusqu'à une rivière (ou un canal) d'un autre bassin. Le débit sera ainsi augmenté, permettant un prélèvement accru d'autant à l'aval (aux pertes par évaporation et infiltration près).

Les transports d'eau par terre, rail ou mer sous forme liquide ou solide sont à rapprocher de ce type d'équipement.

1.4. LE DESSALEMENT D'EAU DE MER

Le dessalement d'eau de mer (ou tout simplement d'eau saumâtre) peut apporter une solution aux problèmes posés en milieu défavorisé (petite île, zone désertique, ...) pour la satisfaction des besoins en eau dans des domaines aussi variés que les usages domestiques, industriels et agricoles.

Malgré leur coût important de mise en oeuvre, le développement rapide des techniques de dessalement permet, aujourd'hui et dans des cas critiques, de fournir de l'eau de consommation à un prix intéressant et concurrentiel.

Les différentes techniques de dessalement existantes se classent en 3 catégories selon le procédé appliqué :

- procédé agissant sur les liaisons chimiques : l'échange d'ions,
- procédé utilisant des membranes : électrodialyse et osmose inverse,
- procédé faisant intervenir un changement de phase : congélation et distillation.

2 - LES ACTIONS SUR LA DEMANDE

Pour faire face à un accroissement de la demande, on peut essayer de réduire la demande :

- soit en agissant sur les quantités d'eau déjà utilisées,
- soit en substituant à une eau de qualité supérieure aux normes strictement nécessaires, une eau correspondant plus précisément à l'usage que l'on veut.

2.1. REDUCTION EN QUANTITE DE LA DEMANDE

2.1.1. Demandes industrielles

Pour la production d'électricité par exemple on peut passer du refroidissement en circuit ouvert au refroidissement atmosphérique humide (semi-ouvert) et, pour des puissances moyennes, à des aéroréfrigérants. Le gain est considérable puisqu'on divise les débits nécessaires par 10 ou même 100.

Dans les rivières, on est limité avec les circuits ouverts par le débit d'étiage en aval et les échauffements admissibles. On doit donc passer à des circuits fermés et préparer des schémas thermiques pour limiter les échauffements.

Ce même schéma peut s'appliquer aux circuits de refroidissement de l'ensemble des branches industrielles.

Cependant, des freins économiques et technologiques existent : les circuits fermés coûtent plus chers (2 à 3 % du coût global d'investissement dans les usines produisant de l'électricité nucléaire) et les aéroréfrigérants sont bruyants et ne peuvent dépasser pour l'instant 200 MW.

Pour obtenir une réduction de la demande en eau de l'industrie, il est nécessaire de séparer les circuits d'eau (eaux de refroidissement, de procédé, de lavage, de vapeur, etc.), car les systèmes permettant une économie d'eau sont différents de même que la qualité des eaux nécessaires.

Au delà des économies sur l'eau de refroidissement, le recyclage des eaux de différents circuits avec épuration est le moyen qui permet de réduire dans les proportions considérables (souvent de 10 à 1) les besoins.

Cette réduction peut être due au recyclage dans des circuits de réfrigération utilisant des tours de refroidissement, ou à l'introduction du refroidissement à air, soit directement soit par l'intermédiaire d'échangeurs de chaleur air-eau en circuit fermé.

On peut aussi économiser l'eau de traitement par un recyclage répété au cours d'un même processus et en la traitant entre les divers stades d'utilisation.

2.1.2. Demandes agricoles

Pour l'irrigation, l'évolution des techniques du système traditionnel à la raie, à l'aspersion et enfin au goutte à goutte vont dans le même sens.

Il faut noter que tous ces gains facilitent la lutte contre la pollution car il est plus facile d'épurer une eau plus chargée qu'une eau diluée. On gagne ainsi sur les investissements eau propre et eau sale.

2.1.3. Demandes domestiques

Pour les utilisateurs domestiques, plusieurs voies sont possibles :

- lutter contre les fuites entre prélèvements et robinet ; elles sont souvent le double ou le triple de ce qui est considéré comme normal (15 à 20 %) ;
- réduire les fuites chez l'abonné (robinets, chasse d'eau) est difficile et nécessite l'appui des populations, mais l'enjeu peut être très important ;
- pour la réduction des fuites dans le réseau, il faut d'abord les déceler et les situer et en estimer l'importance avant de décider si elles méritent réparation. Divers matériels acoustiques comportant ou non un discriminateur électronique peuvent être employés avec succès. C'est à l'exploitant du réseau de juger jusqu'où il doit aller dans l'emploi de ces outils et de ces techniques. Les résultats ont été très significatifs et on a vu depuis quelques années une amélioration de la moyenne des rendements des réseaux en France qui se situe en zone urbaine de 0,75 à 0,85 conjuguée à une forte augmentation de la consommation unitaire passée de 150 l/habitant/j en 1954 à 250 l/habitant/j en 1980 ;
- l'action chez l'abonné est plus difficile. Elle n'est d'ailleurs pas motivante pour l'exploitant pour lequel le succès signifie certes un certain report d'investissement mais d'abord une réduction des ventes. C'est donc plus l'affaire des pouvoirs publics.

Toute cette politique passe obligatoirement par une information des usagers de façon à déclencher chez eux une large approbation et les transformer en éléments moteurs.

2.2. ACTION SUR LA DEMANDE EN QUALITE

Il y a autant de qualité d'eau que d'usages ; chaque usage nécessitant une eau adaptée par ses constituants aux conditions d'utilisation.

Chaque usage de l'eau requiert donc une certaine quantité d'eau dans une qualité minima mesurée par une valeur à ne pas dépasser (norme) pour tout ou partie des paramètres physiques, chimiques ou bactériologiques qui caractérisent l'eau. En matière de potabilité par exemple, les normes les plus couramment utilisées sont celles de la CEE et/ou de l'OMS.

Cette approche catégorielle met en évidence l'intérêt, en cas de pénurie, et pour chaque utilisateur, de ne faire appel qu'à une eau de qualité strictement nécessaire.

Cela signifie notamment favoriser l'utilisation des eaux superficielles pour les usages industriels le permettant, réduire au maximum les prélèvements industriels dans les nappes et réserver les eaux souterraines aux usages domestiques et prioritairement à l'alimentation en eau potable.

3 - LA REUTILISATION DES EAUX USEES

Au fur et à mesure de l'augmentation des prélèvements pour couvrir les besoins, on accroît le volume des eaux usées rejetées au milieu naturel. Celles-ci sont d'ailleurs le plus souvent régénérées dans les rivières ou sur le sol, si leur flux n'est pas trop élevé vis-à-vis du milieu récepteur.

Cependant on peut aussi pousser leur traitement avant leur rejet d'une façon telle qu'elles puissent être à nouveau utilisées. Si cela est fait chez l'utilisateur domestique et/ou industriel, c'est le recyclage qui permet de réduire le besoin net ou le prélèvement.

Si cela se fait à la sortie d'un rejet ou d'un réseau de collecte, c'est une réutilisation d'eaux usées.

Diverses techniques de traitement sont possibles :

- épuration plus poussée par divers procédés,
- lagunage de finition,
- ruissellement contrôlé avec traitement par la végétation,
- prétraitement et affinage par infiltration dans le sol et stockage.

3.1. L'EPURATION POUSSEE

Cette solution permet d'obtenir une gamme de qualité d'eau correspondant à presque tous les usages.

Les traitements complémentaires les plus couramment utilisés actuellement sont : la décantation à la chaux, le stripping à l'ammoniac, l'ozonation, l'osmose inverse, ...

3.2. LE LAGUNAGE DE FINITION

Il consiste à faire passer par des bassins de dimension adaptée des effluents ayant déjà subi un traitement primaire et secondaire dans une station classique.

La pollution résiduelle est dégradée :

- par l'activité bactérienne,
- par l'action photosynthétique et l'assimilation des substances minérales,
- par le pouvoir germicide de la lumière et de certaines algues.

L'épuration se fait par voie naturelle ou avec aération par des aérateurs de surface.

La surface et le volume nécessaires sont importants. Ce procédé tertiaire permet à l'aval la recharge de nappes destinées à l'agriculture, ou directement l'irrigation de parcs et jardins.

3.3. LE RUISSELLEMENT CONTROLE

C'est une méthode de traitement où les pentes herbeuses sont arrosées d'effluent qui s'écoule sur le sol entre la végétation où se produit l'épuration pour aboutir dans un collecteur.

Il se pratique sur des pentes faibles (0,6 pour cent) et on cherche à réduire l'infiltration. Il y a à la fois irrigation et épuration. La longueur optimum de parcours de l'eau dépend de la charge entrante et de la pente, mais également du type de culture. Le dispositif fonctionne bien si le sol est assez imperméable. L'eau collectée peut être utilisée pour l'irrigation, mais l'élimination des germes bactériens ne permet pas de garantir l'absence totale de danger ; il est donc nécessaire de chlorer selon l'usage futur.

3.4. L'INFILTRATION

Elle traite l'effluent sur une surface minimale de sol où l'eau usée est épanchée à doses élevées pendant plusieurs jours ou plusieurs semaines. Les périodes d'infiltration sont suivies d'une période de repos pour permettre au sol de se ressuyer et de retrouver une bonne capacité d'infiltration.

Suivant l'usage de l'eau infiltrée dans la nappe, l'effluent devra subir un traitement préalable plus ou moins fourni.

Remarque : ces techniques de réutilisation des eaux usées posent des problèmes au niveau sanitaire. En effet, véhiculés par l'eau certains germes pathogènes mal ou non éliminés par les traitements successifs, risquent d'être transmis à l'utilisateur et/ou au milieu récepteur. Aussi, ces techniques sont à employer avec précaution et uniquement dans des cas bien précis : irrigation de plantes fourragères, refroidissement industriel,

4 - L'AJUSTEMENT ET LE MAINTIEN DE LA QUALITE

4.1. L'AJUSTEMENT EN QUALITE

Les différents moyens évoqués précédemment portent essentiellement sur la quantité, mais l'ajustement des ressources en qualité peut être un moyen de faire face aux besoins en ramenant à un niveau convenable les ressources naturelles plus ou moins polluées.

L'action peut se faire en traitant les eaux avant usage ou en préservant la qualité de la ressource par une réduction de la pollution des rejets.

4.1.1. Le traitement des eaux brutes

Le traitement des eaux prélevées en rivière ou même dans les nappes pour les amener à la qualité requise par l'usage est devenue de plus en plus souvent indispensable avec l'accroissement de la pollution.

On dispose pour le faire de techniques de plus en plus performantes, soit pour agir sur la qualité physico-chimique ou sur la qualité bactériologique. Elles comprennent notamment la pré-chloration, la coagulation, la floculation, la décantation, la filtration sur sable et/ou sur charbon actif en grains, la désinfection à l'ozone et au chlore.

4.1.2. L'épuration des effluents avant rejet

Pour améliorer la qualité du milieu récepteur, ce qui est susceptible d'accroître les ressources disponibles pour une certaine qualité, il faut épurer les effluents avant de les rejeter.

Ces moyens sont actuellement très puissants ; d'importants progrès ayant été faits, tant sur les procédés biologiques qui utilisent des processus naturels que sur les procédés physico-chimiques plus récents. L'obstacle est d'ordre économique, car le coût d'investissement et de fonctionnement s'accroît fortement avec le taux d'élimination de telle ou telle substance contenue dans l'effluent et dépend de celle-ci.

On doit cependant noter que les coûts s'abaissent avec la taille des installations mais avec une asymptote correspondant à la taille maximum de certains composants des stations ; par exemple le diamètre limité des bassins pour des raisons de stabilité. Cela peut conduire à un certain regroupement des effluents car les prix de la collecte et du transport sont très élevés (dans un réseau urbain, le prix de l'épuration représente environ 20 %, les égouts 80 %).

4.1.3. La politique de lutte contre la pollution - Objectif de qualité

Comment établir une stratégie pour la réhabilitation des rivières atteintes par la pollution ?

- Une première voie pourrait être de traiter systématiquement tous les rejets en éliminant au maximum la pollution, compte tenu des seules possibilités techniques. Evidemment, une telle politique serait ruineuse et dans beaucoup de cas inutile et superfétatoire. Pourquoi, en effet, traiter à grand coût des pollutions peu gênantes vis-à-vis du milieu et de son usage alors que l'auto-épuration peut l'éliminer naturellement et gratuitement ?
- Une autre voie consiste à tenir compte des usages actuels et futurs de l'eau de la rivière et de viser à une amélioration qui permette de développer ces usages. Une telle démarche passe par les étapes suivantes :
 - . recensement des usages actuels des eaux de surface et de ceux qui sont souhaités par les riverains ainsi que découpage de la rivière en tronçons homogènes (exemple : prise d'eau à tel endroit pour l'alimentation en eau potable, pêche sportive sur tel tronçon de cours d'eau, etc.).
 - En fonction de ces usages, déduction de la qualité d'eau nécessaire, grâce aux grilles "usage-qualité" ;

- . comparaison de la qualité actuelle de l'eau aux qualités désirées, et pour les paramètres critiques, identification des sources de pollution responsables des teneurs constatées dans la rivière ;
- . définition des flux polluants maxima ainsi définis et provenant des activités actuelles et du développement économique et démographique prévisible dans le bassin, définition des traitements d'élimination des pollutions à mettre en oeuvre et évaluation des coûts d'investissements et de fonctionnement.

Les avantages de cette stratégie sont les suivants, par rapport aux politiques qui ne tiennent pas compte du milieu récepteur et de son utilisation :

- . tout d'abord accroissement de l'efficacité des investissements, ceux-ci s'appuyant les uns les autres et profitant pleinement de l'auto-épuration des rivières ;
- . réalisation par étapes successives rationnelles, l'obtention de l'objectif final le plus ambitieux passant obligatoirement par des phases correspondant à des objectifs moins contraignants (chaque objectif intermédiaire pouvant être obtenu par une série d'investissements de dépollution cohérents dont le coût global croît avec l'ambition de l'objectif correspondant) ;
- . mise en évidence de l'ensemble des travaux à réaliser, qu'il s'agisse des ouvrages d'élimination de la pollution des collectivités ou des industries, ou de ceux correspondant au relèvement des étiages ou aux curages des rivières éliminant les dépôts artificiels induits par les pollutions antérieures non traitées, d'où une obligation de réalisations cohérentes s'intégrant dans une programmation rationnelle ;
- . obligation également d'aller au fond des choses, en ne négligeant pas les pollutions en provenance des déchets industriels et des ordures ménagères, les liaisons nappe-rivière, et les conséquences des pollutions accidentelles ;
- . enfin incitation à une réflexion sur les rapports entre cette politique et l'aménagement du territoire. En effet, plus l'objectif retenu est ambitieux, plus les flux de pollution rejetés par les divers agents économiques doivent être réduits, plus les coûts de dépollution sont élevés, et plus seront serrées les contraintes qui pèsent sur de nouvelles implantations économiques. De plus, en l'absence de possibilités de relèvement des débits d'étiages (barrages-réservoirs ou injections-prélèvements en nappe) ou d'amélioration de la technologie des ouvrages de dépollution, peuvent être bloqués tous les nouveaux développements industriels et démographiques.

Cette seconde voie est celle de la politique d'objectif de qualité ou de carte départementale de "reconquête des rivières".

4.2. LA PROTECTION DES NAPPES

Les eaux souterraines sont moins vulnérables aux pollutions que les eaux de surface du fait de la couverture du sol qui joue le rôle de filtre entre le milieu extérieur et la ressource. Ainsi, les nappes libres sont plus ou moins vulnérables selon l'épaisseur et la nature de la couverture. Les nappes captives sont par contre protégées de toute pollution par infiltration par les couches imperméables qui les surmontent.

Cependant, si une pollution quelconque atteint la nappe, la détérioration de celle-ci sera durable du fait de la faible vitesse de circulation, voire même irréversible (condamnation de la nappe au moins à l'échelle humaine).

La protection généralisée des aquifères supposerait des moyens techniques et financiers considérables. Aussi les politiques de protection des ressources souterraines s'orientent plutôt vers :

- Une réglementation des activités humaines potentiellement polluantes sur l'ensemble du territoire (ex. épandage, décharge, fosse sceptique,) qui découle de divers documents législatifs : la réglementation des établissements classés, le code rural, la loi sur l'eau, ...
Les coûts engendrés par cette réglementation ne sont supportés ni par l'Etat ni par les collectivités locales, mais par chaque occupant du sol d'où un coût global cumulé très important.
- Une protection supplémentaire des (seuls) captages pour l'AEP, par la mise en place de périmètres de protection à l'intérieur desquels sont interdites ou réglementées certaines installations potentiellement polluantes. L'étendue de ces zones est définie à l'issue d'études hydrogéologiques fondées sur le temps de parcours de l'eau entre la surface du sol et le point de captage.
Les coûts engendrés par cette protection incombent à la fois à l'Etat et aux collectivités (achat des terrains et du périmètre rapproché), aux occupants du sol (activités réglementées des périmètres proches et éloignés).

La gestion de la qualité des nappes se résume donc actuellement, essentiellement à l'application d'une réglementation générale et de la protection des captages AEP. Cependant, sans vouloir opérer une classification précise et systématique des nappes à protéger, ainsi que des pollutions à combattre, l'effort doit porter en priorité :

- sur les nappes de bonne qualité ;
- sur les pollutions chroniques les plus aiguës ;
- sur la protection des futurs captages et/ou champs captants.

Les collectivités soucieuses de protéger l'eau souterraine qui les alimente (ou qui pourrait les alimenter dans l'avenir) disposent en France, en plus du code rural et du code de la santé publique de documents d'urbanisme (SDAU, PAR et surtout POS) très utiles pour orienter à l'avenir la protection des eaux souterraines.

